

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة سعيدة د. مولاي الطاهر

كلية الرياضيات و الإعلام الآلي و الاتصالات السلكية و اللاسلكية

قسم: الإعلام الآلي



Mémoire de Master en informatique

Spécialité : Réseaux informatique et Système Répartis (RISR)

T h è m e

Etude et optimisation d'un réseau de capteurs sans fil dans les forêts pour la prévention d'incendies

▪ Présenté par :

RIGHI AMINE REDHA

HAMI MOKHTAR

▪ Dirigé par :

DR. DERKAOUI ORKIA



Année universitaire 2024-2025

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadrant(e), [Dr. Derkaoui Orkia], pour sa disponibilité, ses conseils avisés et ses orientations précieuses tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du corps professoral et administratif de

[Département Informatique], pour la qualité de l'enseignement dispensé et l'encadrement dont nous avons bénéficié durant notre formation.

Nous exprimons aussi notre gratitude à nos familles respectives, pour leur soutien moral, leur patience et leur encouragement constant durant toutes ces années d'études.

Enfin, nous remercions particulièrement nos camarades de promotion et toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Moktar Redha

Dédicaces

C'est avec un cœur rempli d'émotion et de reconnaissance que je souhaite

Exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont accompagné, soutenu et

Encouragé tout au long de ce parcours exigeant, couronné par l'obtention de mon diplôme de Master 2.

À ma mère, partie trop tôt, dont l'amour et les prières continuent de veiller sur moi dans le silence de l'absence.

À mon père, pilier de ma vie, dont la force, la sagesse et le regard bienveillant m'ont guidé à chaque étape.

À mes beaux-parents, pour leur soutien discret et bienveillant qui m'a porté dans les moments importants.

Que ce modeste travail soit un hommage à leur amour éternel et à leur foi en moi.

À mon binôme, Hami Mokhtar : Merci pour ton excellente collaboration, ta persévérance et ton soutien tout au

Long de ce parcours. Travailler avec toi a été un véritable privilège et une source de motivation constante.

À ma merveilleuse épouse : Merci du fond du cœur pour ton soutien inébranlable,

Ta patience infinie et tes sacrifices au quotidien. Sans toi, rien de tout cela n'aurait

Été possible. Tu as été ma force dans les moments de doute et ma joie dans ceux de réussite.

À mes adorables enfants, Loudjaine, mayssa et le petit Achref : Vous êtes ma plus grande fierté et ma source de motivation. Vos rires et votre amour m'ont donné le courage de persévérer. J'espère vous montrer, à travers ce diplôme, que le travail et la

Détermination mènent toujours à la réussite.

À mon frère bien-aimé (Chakib) et à ma chère sœur : Merci pour votre présence, vos encouragements et votre soutien indéfectible. Vous avez été mes piliers dans les moments difficiles et mes complices dans les instants de joie. Notre lien fraternel est un trésor inestimable.

Je n'oublie pas mes professeurs, mes collègues et mes amis qui, par leurs

Conseils, leur aide et leur amitié, ont rendu ce parcours plus enrichissant. Merci pour votre confiance et votre solidarité.

Enfin, toute ma reconnaissance va à Dieu, le Tout Miséricordieux, sans la volonté

Duquel rien n'aurait été possible. Qu'Il vous bénisse tous pour votre bienveillance et votre générosité.

Avec toute ma gratitude,

RIGHI AMINE REDHA



Dédicaces

C'est avec un cœur rempli d'émotion et de reconnaissance que je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont accompagné, soutenu et encouragé tout au long de ce parcours exigeant, couronné par l'obtention de mon diplôme de Master 2.

À mes chers parents décédés : Bien que vous ne soyez plus de ce monde, votre amour, vos sacrifices et vos enseignements ont été ma lumière et ma motivation. Ce diplôme est le vôtre autant que le mien, et je l'élève vers le ciel en votre mémoire. Puissiez-vous être fiers de moi, où que vous soyez.

À mon binôme, Righi Amine Redha :

Merci pour ton excellente collaboration, ta persévérance et ton soutien tout au long de ce parcours. Travailler avec toi a été un véritable privilège et une source de motivation constante.

À ma merveilleuse épouse : Merci du fond du cœur pour ton soutien inébranlable, ta patience infinie et tes sacrifices au quotidien. Sans toi, rien de tout cela n'aurait été possible. Tu as été ma force dans les moments de doute et ma joie dans ceux de réussite.

À mes adorables enfants, Ghenia et Ahmed : Vous êtes ma plus grande fierté et ma source de motivation. Vos rires et votre amour m'ont donné le courage de persévérer. J'espère vous montrer, à travers ce diplôme, que le travail et la détermination mènent toujours à la réussite.

À mes frères bien-aimés (Krimo, Boualem, Omar Farouk) et à ma chère sœur : Merci pour votre présence, vos encouragements et votre soutien indéfectible. Vous avez été mes piliers dans les moments difficiles et mes complices dans les instants de joie. Notre lien fraternel est un trésor inestimable.

Je n'oublie pas mes professeurs, mes collègues et mes amis qui, par leurs conseils, leur aide et leur amitié, ont rendu ce parcours plus enrichissant. Merci pour votre confiance et votre solidarité.

Enfin, toute ma reconnaissance va à Dieu, le Tout Miséricordieux, sans la volonté duquel rien n'aurait été possible. Qu'Il vous bénisse tous pour votre bienveillance et votre générosité.

*Avec toute ma gratitude,
Hamí Mokhtar*



Introduction Générale	2
Contexte et problématique	2
Objectifs du mémoire	2
Méthodologie adoptée.....	3
Structure du mémoire	3
Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) :.....	5
Introduction.....	5
1.1 Définition des réseaux de capteurs sans fil	5
.....	6
1.1.1 Composants d'un RCSF	6
1.2 Fonctionnement Général des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)	7
1.2.1 Détection et collecte de données.....	7
1.2.2 Traitement local des données	8
1.2.3 Communication inter-capteurs (multi-saut).....	8
1.2.4 Transmission à la station de base	8
1.2.5 Traitement global et prise de décision	8
1.3 Caractéristiques principales :.....	9
1.3.1 Caractéristiques techniques des RCSF	9
1.3.2 Mobilité	10
1.3.3 Autonomie énergétique	10
1.3.4 Topologie et architecture	11
1.3.5 Communication sans fil	12
1.4 Applications des RCSF.....	14
1.4.1 Surveillance environnementale par les Réseaux de Capteurs Sans Fil.....	14
1.4.2 Rôle des RCSF dans la surveillance environnementale.....	15
1.4.3 Avantages des RCSF en surveillance environnementale	15
1.4.4 Détection de feux de forêts	16
1.4.5 Objectif de la détection	16
1.4.6 Fonctionnement du système	16
1.4.7 Architecture du système.....	16
1.4.8 Avantages de cette solution	18
1.5 Autres domaines d'application des RCSF.....	18
1.6 Contraintes et défis des RCSF	19
Conclusion	19
Chapitre 2 : Optimisation dans les Réseaux de Capteurs	21
Introduction.....	21

2.1. Paramètres et Contraintes spécifiques aux WSN en forêt.....	21
2.1.1 Paramètres environnementaux mesurés	21
2.1.2 Contraintes de déploiement.....	22
2.2. Stratégies d'activation des capteurs et de gestion du réseau	22
2.2.1 Méthodes d'activation.....	22
2.2.2 Gestion de la couverture	23
2.2.3 Routage et gestion de l'énergie	23
2.3 État de l'art des techniques d'optimisation des WSN.....	24
2.3.1 Approches classiques	24
2.3.2 Approches méta heuristiques.....	24
Conclusion	26
Chapitre 3 Méta heuristiques et Algorithmes Génétiques.....	27
3.1 Définition aux Méta heuristiques	27
3.1.1 Objectifs des Méta heuristiques :.....	27
3.1.2 Caractéristiques des Méta heuristiques :.....	27
3.2 Principe de l'Algorithme Génétique.....	28
3.2.1 Fonctionnement général d'un Algorithme Génétique :	28
3.2.1.1 Initialisation de la population :.....	28
3.2.1.2 Évaluation de la fonction de fitness :.....	28
3.2.1.3 Sélection :	29
3.2.1.4 Croisement (Crossover) :	29
3.2.1.5 Mutation :.....	29
3.3 Représentation des Solutions (Chromosomes)	30
3.3.1 Types de Représentation possibles :.....	31
a) Codage binaire :.....	31
b) Codage réel :.....	31
c) Codage combiné :	31
3.3.2 Avantages du codage binaire :.....	32
3.3.3 Limites :	32
3.4 Fonction de Fitness.....	32
3.4.1 Rôle de la fonction de fitness :	32
3.4.2 Conception de la fonction de fitness pour un WSN en forêt :.....	33
3.4.3 Critères de pondération :	33
3.5 Avantages et Limites de l'Algorithme Génétique.....	34
3.5.1 Avantages de l'Algorithme Génétique	34
3.5.2 Limites de l'Algorithme Génétique	34

Conclusion	35
Chapitre 4 Proposition d'un Modèle d'Optimisation par Algorithme Génétique	38
4.1 Objectifs de l'Optimisation	38
4.1.1 Maximisation de la Couverture	38
4.1.2 Réduction de la Consommation Énergétique	38
4.1.3 Optimisation du Temps de Détection	39
4.1.4 Maximisation de la Durée de Vie du Réseau.....	39
4.1.5 Adaptabilité Dynamique.....	40
4.1.6 Résumé des Objectifs de l'Optimisation.....	40
4.2 Formulation Mathématique du Problème	41
4.2.1 Variables de Décision.....	41
4.2.2 Fonction Objectif	41
4.2.3 Contraintes	42
4.3 Structure du Chromosome pour les Capteurs	44
4.3.1 Représentation Binaire	44
4.3.2 Informations Encodées.....	45
4.3.3 Avantages de cette structure.....	46
4.4 Description de l'Algorithme Proposé	46
4.4.1 Schéma général de l'algorithme	47
4.4.2 Détail des opérations.....	48
4.4.3 Fonction de Fitness.....	48
4.4.4 Stratégie d'arrêt.....	49
Chapitre 5 : Implémentation et Résultats Expérimentaux	70
5.1 Environnement de simulation	70
5.1.1. Outils Logiciels et Matériels Utilisés.....	70
5.2 Paramètres expérimentaux	71
5.2.1 initialisation	71
5.3 Resultats obtenus	73
5.3.1 Description de graphe du fitness.....	73
5.3.2 Disposition des capteurs.....	75
5.3.3 diagramme circulaire (camembert) l'états des capteurs actifs ou inactifs.....	78
5.3.4 Diagramme circulaire (camembert) affichant la répartition des capteurs actifs selon leur état	79
5.3.5 Paramètres Capteurs	80
5.3.6 Les alertes détectés	82
5.4 Discussion des résultats.....	83

5.4.1 Discussion des résultats graphe du fitness.....	83
5.4.2 Discussion des résultats positionnement des capteurs.....	85
5.4.3 Discussion des Résultats l'états des capteurs.....	85
5.4.4 Discussion des résultats l'états des capteurs actifs.....	86
5.4.5 Discussion des résultats des paramètres capteurs.....	86
5.4.6 Discussion des résultats des alertes détecte.....	87
Conclusion générale :	91
Perspectives d'amélioration	92
Bibliographie.....	92

Liste des Figure

Figure 1 - Un réseau de capteurs sans fil (RCSF).....	6
Figure 2 - Structure interne d'un nœud capteur	7
Figure 3 - Schéma général d'un réseau de capteurs sans fil.....	9
Figure 4 - Topologie et architecture.....	12
Figure 5 - Schéma de détection de feu de forêt via RCSF.....	17
Figure 6 - Déploiement de capteurs dans une zone forestière	18
Figure 7 - Les principaux paramètres surveillés	Error! Bookmark not defined.
Figure 8 - Illustration d'un réseau avec activation adaptative des capteurs.....	23
Figure 9 - Schéma comparatif des performances des méta heuristiques.....	25
Figure 10 - Schéma du fonctionnement général d'un Algorithme Génétique.....	30
Figure 11 - Représentation graphique de la fonction de coût multi-objectif.....	43
Figure 12 - Schéma de la structure d'un chromosome pour un réseau de capteurs	46
Figure 13 - Schéma du fonctionnement de l'algorithme proposé.....	47
Figure 14 - Exemple de croisement de deux chromosomes.....	49
Figure 15 - résultat graphe du fitness.....	73
Figure 16 - Disposition des capteurs	76
Figure 17 - l'états des capteurs	78
Figure 18 - L'état des capteurs Actif.....	79
Figure 19 - Paramètre des capteurs.....	80
Figure 20 - Les alertes détectés	82

Liste des Tableaux

Tableau 1 - Sources d'énergie dans les RCSF	11
Tableau 2 - Caractéristiques des différentes topologies.....	12
Tableau 3 - Comparatif des supports de communication	13
Tableau 4 - protocoles de communication adaptés aux RCSF.....	14
Tableau 5 - Exemples de paramètres surveillés et capteurs associés	15
Tableau 6 - Seuils critiques pour la détection de feu	16
Tableau 7 - Résumé des domaines d'application des RCSF	19
Tableau 8 - Contraintes typiques des WSN en forêt.....	22
Tableau 9 - Exemples de protocoles adaptés	23
Tableau 10 - Comparatif des méta heuristiques appliquées aux WSN.....	24
Tableau 11 - Exemple de représentation binaire des capteurs	32
Tableau 12 - Exemple de calcul de fitness pour 3 chromosomes	33
Tableau 13 - Synthèse des avantages et inconvénients.....	35
Tableau 14 - Exemples de taux de couverture requis	38
Tableau 15 - Consommation énergétique moyenne par type de capteur	39
Tableau 16 - Exemple de stratégies d'activation de capteurs.....	40
Tableau 17 - Synthèse des objectifs et indicateur.....	40
Tableau 18 - Notations mathématiques utilisées	42
Tableau 19 - Évaluation de scénarios	43
Tableau 20 - Exemple de codage binaire.....	45
Tableau 21 - Exemple de chromosome détaillé	45
Tableau 22 - Paramètres utilisés dans l'algorithme	48
Tableau 23 - Tableau 23 - Outils Logiciels et Matériels Utilisés.....	70

Introduction Générale

Introduction Générale

Contexte et problématique

Les forêts jouent un rôle essentiel dans l'équilibre écologique de la planète. Elles participent à la régulation du climat, à la conservation de la biodiversité et à la protection des sols. Cependant, elles sont constamment menacées par divers dangers naturels et anthropiques, parmi lesquels les incendies de forêts occupent une place prépondérante. Chaque année, des milliers d'hectares de couvert forestier disparaissent à cause des incendies, provoquant ainsi des pertes écologiques, économiques et humaines considérables.

Face à cette problématique, la prévention et la détection précoce des feux de forêts sont devenues des priorités absolues pour les autorités et les gestionnaires d'espaces naturels. Les méthodes classiques de surveillance, telles que les patrouilles humaines et les tours de guet, restent limitées en termes de couverture, de réactivité et de coûts. C'est dans ce contexte que les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) apparaissent comme une solution technologique innovante et efficace.

Ces réseaux, constitués de petits capteurs autonomes capables de collecter et de transmettre des données environnementales en temps réel, offrent une couverture étendue et une surveillance continue des zones forestières. Cependant, leur déploiement et leur fonctionnement posent plusieurs défis liés à l'optimisation de leur configuration, de leur consommation énergétique et de la fiabilité des données collectées.

Objectifs du mémoire

L'objectif principal de ce travail est de proposer une méthode d'**optimisation d'un réseau de capteurs sans fil** dédié à la détection et à la prévention des feux de forêts, en s'appuyant sur des techniques méta-heuristiques. Plus précisément, ce mémoire vise à :

- Étudier les caractéristiques et le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil.
- Explorer les différentes approches méta-heuristiques et en particulier les **algorithmes génétiques**, reconnus pour leur capacité à résoudre des problèmes complexes et multidimensionnels.
- Développer un modèle d'optimisation basé sur un algorithme génétique adapté au déploiement optimal des capteurs dans une zone forestière.

- Évaluer les performances du modèle à travers des expérimentations et simulations.

Méthodologie adoptée

Pour atteindre ces objectifs, la démarche suivie dans ce mémoire repose sur plusieurs étapes :

1. **Étude bibliographique** sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, applications et contraintes spécifiques dans le cadre de la détection de feux de forêts.
2. **Analyse des approches méta-heuristiques** utilisées dans l'optimisation des réseaux de capteurs, avec un focus sur l'algorithme génétique.
3. **Modélisation mathématique du problème** d'optimisation du déploiement des capteurs.
4. **Implémentation de l'algorithme génétique** et réalisation de simulations pour valider le modèle proposé.
5. **Analyse et interprétation des résultats** obtenus, afin de tirer des conclusions et proposer des perspectives d'amélioration.

Structure du mémoire

Ce mémoire s'organise en cinq chapitres. Le **premier chapitre** est consacré aux **réseaux de capteurs sans fil (WSN)** appliqués à la **surveillance forestière**, en abordant leur **définition**, leur **architecture**, les **types de capteurs utilisés**, les **contraintes spécifiques** au milieu forestier, ainsi que les **applications environnementales** de ces réseaux. Le **deuxième chapitre** traite des **techniques d'optimisation** dans les WSN, avec une attention particulière portée sur les **paramètres critiques**, les **stratégies d'activation** des capteurs, et un **état de l'art** des méthodes existantes. Le **troisième chapitre** introduit les **métaheuristiques**, notamment l'**algorithme génétique**, en expliquant ses principes fondamentaux, sa représentation, la fonction de fitness adaptée aux réseaux de capteurs, ainsi que ses **avantages et limites**. Le **quatrième chapitre** propose un **modèle d'optimisation** basé sur l'algorithme génétique, incluant la **formulation du problème**, la **structure des chromosomes**, et une **description détaillée de l'algorithme développé**. Enfin, le **cinquième chapitre** présente l'**implémentation** de ce modèle, les **paramètres de simulation**, les **résultats expérimentaux**, ainsi qu'une **discussion critique** de ces résultats.

Chapitre 1

Les Réseaux

Capteurs RCSF

Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) :

Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont devenus des outils incontournables dans de nombreux domaines grâce à leur capacité à surveiller des environnements variés en temps réel, sans infrastructure filaire. Leur principe repose sur des capteurs miniatures capables de mesurer différentes variables physiques ou environnementales et de transmettre ces données à un centre de traitement distant.

Dans le contexte de la prévention et de la détection de feux de forêts, ces réseaux offrent un potentiel remarquable en permettant de collecter des informations précieuses telles que la température, l'humidité ou encore la concentration de gaz ...ext dans l'atmosphère, tout en s'adaptant à des zones souvent difficiles d'accès. Ce chapitre propose de définir les concepts de base liés aux réseaux de capteurs sans fil, d'en présenter les principales caractéristiques techniques, les architectures existantes ainsi que leurs domaines d'application, notamment dans la surveillance environnementale.

1.1 Définition des réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un ensemble de petits dispositifs appelés **nœuds capteurs**, déployés dans un environnement donné pour collecter, traiter et transmettre des données vers un centre de collecte appelé **station de base** ou **sink**. Chaque capteur est équipé de capteurs physiques, d'un microcontrôleur, d'un module de communication et d'une source d'énergie autonome.

Ces réseaux sont conçus pour fonctionner de manière autonome, sans infrastructure filaire, en utilisant des technologies de communication sans fil. Ils sont particulièrement adaptés à des environnements inaccessibles, hostiles ou étendus, comme les forêts.

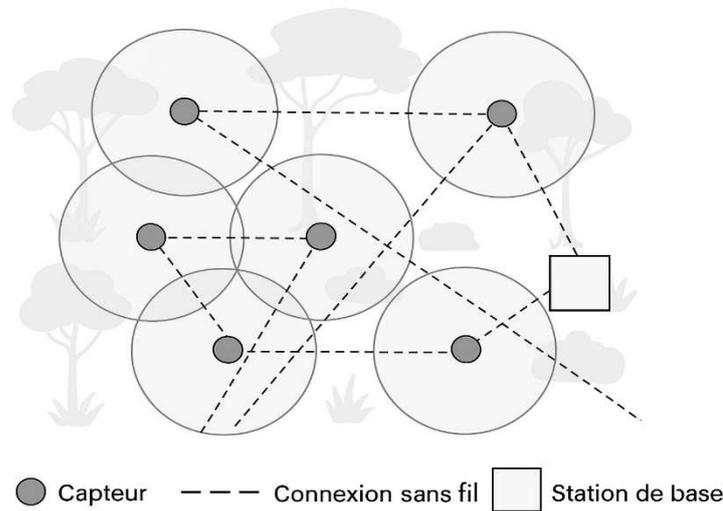


Figure 1 - Un réseau de capteurs sans fil (RCSF)

Référence : Figure 1

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). *A survey on sensor networks*. IEEE Communications Magazine, 40(8), 102-114.

1.1.1 Composants d'un RCSF

Un nœud capteur se compose de plusieurs modules essentiels qui lui permettent d'accomplir ses tâches de détection, de traitement et de transmission.

Principaux composants :

- **Module de détection** : détecte des grandeurs physiques (température, humidité, gaz, Co2).
- **Microcontrôleur** : traite localement les données et prend des décisions simples.
- **Module de communication** : assure la transmission des données vers d'autres nœuds ou vers le sink.
- **Source d'énergie** : souvent une batterie rechargeable, parfois combinée à un petit panneau solaire.

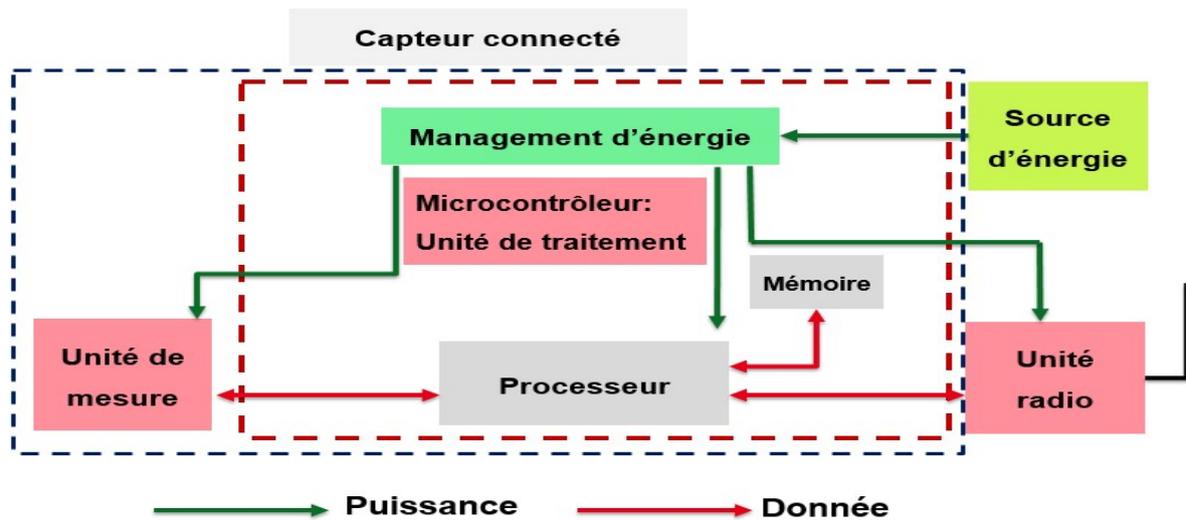


Figure 2 - Structure interne d'un nœud capteur

Référence : Figure 2

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). *A survey on sensor networks*. IEEE Communications Magazine, 40(8), 102-114.

1.2 Fonctionnement Général des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) sont des réseaux autonomes composés d'un grand nombre de nœuds capteurs distribués dans une zone géographique afin de surveiller et de collecter des informations sur un phénomène physique ou environnemental spécifique (température, humidité, fumée, etc.). Ces capteurs coopèrent entre eux pour transmettre les données collectées vers un centre de traitement, généralement appelé **station de base** (ou **sink**).

Le fonctionnement général d'un RCSF repose sur les étapes suivantes :

1.2.1 Détection et collecte de données

Chaque capteur est équipé d'un ou plusieurs modules de détection permettant de mesurer des paramètres physiques de l'environnement (température, humidité, concentration de CO₂, présence de fumée...). Dès qu'un capteur détecte une variation de ces paramètres dépassant un seuil prédéfini ou à intervalle régulier, il collecte et stocke ces données temporairement.

1.2.2 Traitement local des données

Avant leur transmission, les données peuvent être prétraitées localement au niveau du capteur :

- Filtrage des informations non pertinentes
- Moyennage ou compression pour réduire la quantité de données à transmettre
- Détection locale d'événements anormaux

Ce traitement local permet d'économiser de l'énergie en évitant les transmissions inutiles.

1.2.3 Communication inter-capteurs (multi-saut)

La communication dans un RCSF se fait généralement selon un principe **multi-saut** (*multi-hop communication*) :

- Un capteur transmet ses données à ses voisins les plus proches.
- Ces derniers relaient successivement les informations jusqu'à atteindre la station de base.

Cette architecture permet de couvrir de vastes zones tout en minimisant la consommation énergétique, chaque capteur n'ayant qu'une faible portée radio.

1.2.4 Transmission à la station de base

La station de base reçoit l'ensemble des données issues des capteurs via les transmissions multi-sauts. Elle joue le rôle de point central de collecte et peut être fixe ou mobile selon l'application.

1.2.5 Traitement global et prise de décision

Une fois les données rassemblées à la station de base, elles sont :

- Analysées et agrégées
- Interprétées pour détecter la survenue d'événements anormaux
(par exemple : départ de feu)
- Transmises à des opérateurs humains ou des systèmes automatisés pour déclencher les actions appropriées (alerte, extinction, évacuation...)

1.3 Caractéristiques principales :

- Communication sans fil
- Traitement distribué des données
- Auto-organisation du réseau
- Tolérance aux défaillances
- Faible consommation énergétique

Chaque capteur collecte des données et les transmet directement ou via d'autres capteurs à la station de base.

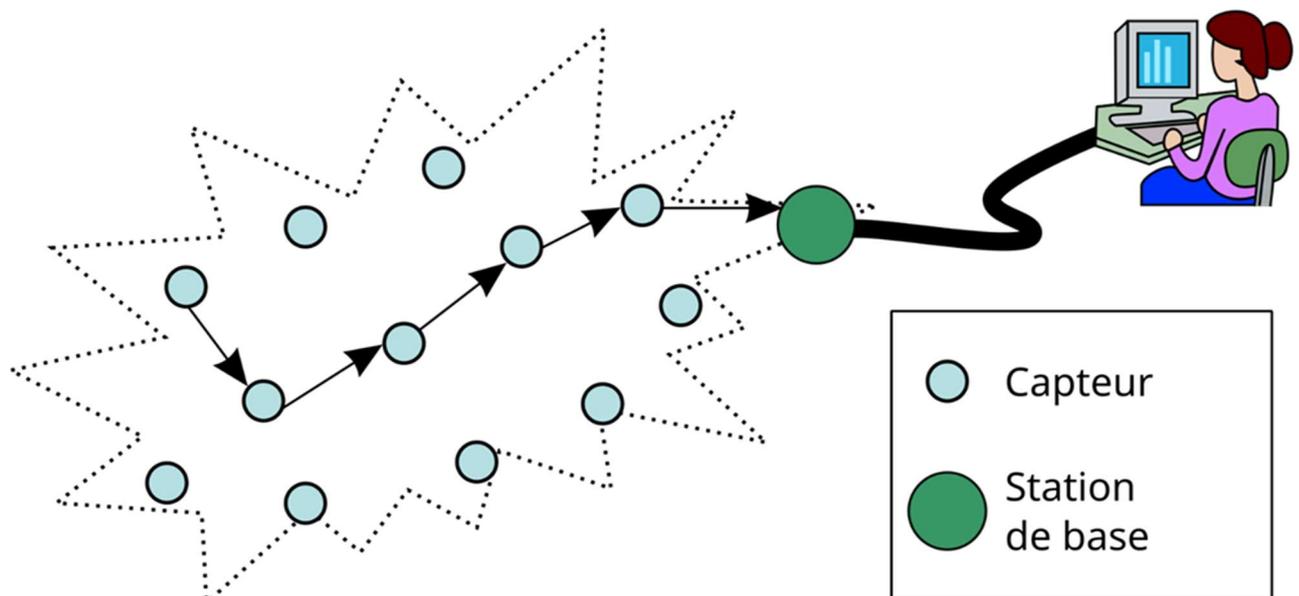


Figure 3 - Schéma général d'un réseau de capteurs sans fil

Référence: Figure 3

Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). *Wireless sensor network survey*. *Computer Networks*, 52(12), 2292-2330.

1.3.1 Caractéristiques techniques des RCSF

Les RCSF présentent plusieurs caractéristiques techniques qui conditionnent leur conception et leur déploiement.

- **Autonomie énergétique** : La durée de vie d'un capteur dépend de sa consommation. Les stratégies d'économie d'énergie sont donc primordiales.

- **Portée de communication** : généralement limitée à quelques dizaines ou centaines de mètres selon la technologie utilisée.
- **Débit de données** : suffisant pour transmettre des informations environnementales de faible volume.
- **Tolérance aux pannes** : le réseau doit continuer de fonctionner même en cas de défaillance de plusieurs nœuds.
- **Scalabilité** : possibilité d'ajouter ou de retirer des capteurs sans interrompre le fonctionnement global.

1.3.2 Mobilité

La majorité des réseaux de capteurs sans fil traditionnels supposent des nœuds statiques, c'est-à-dire déployés de manière fixe dans l'environnement de surveillance. Cependant, dans certaines applications, la mobilité des capteurs ou des stations de base peut représenter un atout stratégique permettant d'améliorer la couverture, de prolonger la durée de vie du réseau et d'assurer une meilleure qualité de service.

On parle de mobilité dans un RCSF lorsque :

- Les nœuds capteurs eux-mêmes peuvent se déplacer, par exemple montés sur des véhicules, des robots ou des drones.
- Ou lorsque la station de base est mobile, se déplaçant dans la zone surveillée pour se rapprocher des capteurs et récupérer les données.

Cette mobilité peut être contrôlée (programmée selon un itinéraire ou un algorithme) ou aléatoire (influencée par des facteurs environnementaux ou par le hasard).

1.3.3 Autonomie énergétique

L'un des principaux défis dans la conception et l'exploitation des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) est la gestion de l'énergie. En effet, les nœuds capteurs sont souvent alimentés par de petites batteries ou des sources d'énergie limitées, difficilement rechargeables ou remplaçables, notamment dans des environnements hostiles ou éloignés comme les forêts.

La durée de vie d'un réseau de capteurs dépend directement de l'autonomie énergétique des nœuds, d'où la nécessité de concevoir des architectures, des

protocoles de communication et des algorithmes d'optimisation efficaces et économes en énergie.

Source	Avantages	Inconvénients
Batterie (Li-ion...)	Facile à intégrer, fiable	Capacité limitée, difficile à recharger
Énergie solaire	Renouvelable et gratuite	Dépend de la météo et de l'exposition
Énergie éolienne	Alternative écologique	Variable et nécessite des installations adaptées
Énergie cinétique	Exploite les mouvements des capteurs (robots, drones...)	Faible production et instabilité

Tableau 1 - Sources d'énergie dans les RCSF

Référence : Tableau 1

Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. Wiley-Interscience.

1.3.4 Topologie et architecture

La topologie définit la manière dont les capteurs sont physiquement et logiquement connectés. Plusieurs types existent :

a) Topologie en étoile

Chaque capteur communique directement avec la station de base.

- **Avantages** : simplicité de configuration.
- **Inconvénients** : portée limitée, surcharge de la station de base.

b) Topologie en arbre

Les capteurs forment une hiérarchie : chaque nœud relaie les données de ses nœuds enfants vers un nœud parent jusqu'à la station de base.

- **Avantages** : hiérarchie claire, consommation optimisée.
- **Inconvénients** : vulnérabilité aux coupures de branches.

c) Topologie en maillage (mesh)

Chaque capteur peut communiquer avec plusieurs autres voisins. Les données peuvent emprunter plusieurs chemins pour atteindre la station de base.

- **Avantages** : tolérance élevée aux pannes, adaptabilité.

- **Inconvénients** : complexité et consommation énergétique accrue.

d) Topologie en cluster

Les capteurs sont regroupés en clusters. Un chef de cluster collecte les données des membres et les transmet à la station de base.

- **Avantages** : équilibre de charge, bonne gestion énergétique.
- **Inconvénients** : dépendance aux chefs de cluster.

Type de topologie	Consommation énergétique	Fiabilité	Complexité
Étoile	Moyenne	Faible	Faible
Arbre	Moyenne à faible	Moyenne	Moyenne
Maillage (mesh)	Élevée	Élevée	Élevée
Cluster	Optimisée	Bonne	Moyenne

Tableau 2 - Caractéristiques des différentes topologies

Référence :Tableau 2

Akyildiz, I. F., et al. (2002). *A survey on sensor networks*. IEEE Communications Magazine.

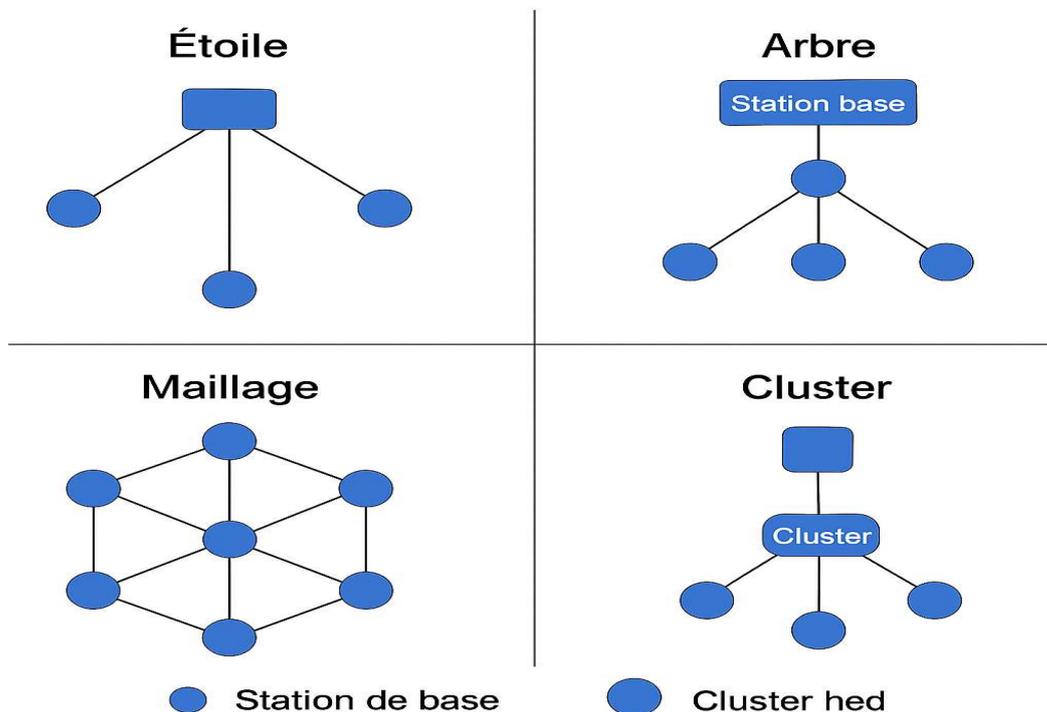


Figure 4 - Topologie et architecture

1.3.5 Communication sans fil

Dans un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF), la communication sans fil constitue le moyen principal par lequel les capteurs échangent des

données entre eux et avec la station de base. Contrairement aux réseaux filaires, cette communication repose sur des ondes électromagnétiques (radio, infrarouge ou optique) qui permettent aux capteurs de transmettre et de recevoir des informations sans infrastructure physique lourde.

Plusieurs supports de transmission peuvent être utilisés dans les RCSF, selon la portée souhaitée, la consommation énergétique et la nature de l'environnement :

a) Ondes radio

- **Fréquences courantes** : 433 MHz, 868 MHz, 2.4 GHz.
- **Avantages** : large portée, traversée des obstacles.
- **Inconvénients** : consommation énergétique élevée, interférences possibles.

b) Communication infrarouge

- Utilisée pour les courtes distances.
- **Avantages** : consommation faible, sécurisé (ligne directe).
- **Inconvénients** : nécessite un contact visuel direct.

c) Ondes optiques

- Transfert de données via signaux lumineux.
- **Avantages** : débit élevé.
- **Inconvénients** : forte sensibilité aux obstacles et à la météo.

Support	Portée	Consommation	Débit	Sensibilité aux obstacles
Radio	10-500 m	Moyenne à élevée	Moyenne	Moyenne
Infrarouge	1-5 m	Faible	Moyenne	Élevée (nécessite visibilité)
Optique (LED/Laser)	10-100 m	Moyenne	Élevé	Élevée

Tableau 3 - Comparatif des supports de communication

Référence : Tableau 3

Yick, J., et al. (2008). *Wireless sensor network survey*. Computer Networks.

Pour organiser efficacement les échanges sans fil entre les capteurs et la station de base, plusieurs protocoles de communication adaptés aux RCSF ont été développés :

Protocole	Description	Avantages
ZigBee	Protocole basé sur IEEE 802.15.4, faible consommation	Faible coût, réseau maillé possible
Bluetooth Low Energy (BLE)	Consommation réduite pour les applications de proximité	Standardisé et largement compatible
LoRa	Communication longue portée à faible débit	Très grande autonomie, adaptée aux milieux naturels
Wi-Fi (802.11)	Utilisé pour des débits élevés	Large bande passante, mais consommation importante

Tableau 4 - protocoles de communication adaptés aux RCSF

Référence : Tableau 4

Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. Wiley-Interscience.

La communication sans fil dans les RCSF doit relever plusieurs défis :

- Interférences électromagnétiques : perturbations dues à d'autres systèmes sans fil (Wi-Fi, 4G...).
- Pertes de signal : atténuation dans les milieux denses (forêts, obstacles naturels).
- Consommation énergétique élevée lors des transmissions longues distances.
- Sécurité des données : protection contre les écoutes et attaques réseau.
- Synchronisation des communications entre nœuds.

1.4 Applications des RCSF

1.4.1 Surveillance environnementale par les Réseaux de Capteurs Sans Fil

La surveillance environnementale regroupe l'ensemble des activités visant à observer et analyser en temps réel ou différé les phénomènes naturels afin de prévenir les risques et d'assurer une gestion durable des ressources naturelles. Grâce aux Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF), il est aujourd'hui possible de collecter des données environnementales de façon autonome et continue, même dans des zones difficiles d'accès.

1.4.2 Rôle des RCSF dans la surveillance environnementale

Les RCSF permettent de déployer des centaines, voire des milliers de capteurs dans un environnement donné (forêt, montagne, désert, littoral...) pour mesurer des paramètres tels que :

- La température
- Le taux d'humidité
- La concentration en fumée et en CO₂
- La pression atmosphérique
- La vitesse et direction du vent
- Le niveau sonore
- La qualité de l'eau ou du sol

Ces capteurs transmettent ensuite les données recueillies vers une station de base ou un centre d'analyse, via des communications sans fil.

Paramètre mesuré	Type de capteur	Unité
Température	Capteur de température	°C
Humidité de l'air	Capteur d'humidité	%
Fumée	Capteur de fumée	ppm (parties par million)
CO ₂	Capteur de gaz	Ppm
Pression	Baromètre électronique	hPa
Niveau d'eau	Capteur de niveau ultrasonique	cm ou m

Tableau 5 - Exemples de paramètres surveillés et capteurs associés

Référence : Tableau 5

Hart, J. K., & Martinez, K. (2006). *Environmental sensor networks: A revolution in the earth system science?* Earth-Science Reviews, 78(3-4), 177-191.

1.4.3 Avantages des RCSF en surveillance environnementale

- Collecte en temps réel et continue
- Couverture de zones difficiles d'accès
- Réduction des interventions humaines sur le terrain
- Alerte rapide et préventive en cas de danger
- Optimisation des ressources environnementales (eau, énergie)

1.4.4 Détection de feux de forêts

Les feux de forêts représentent un danger majeur pour l'environnement, la biodiversité et les populations humaines. Le changement climatique et l'extension des zones à risques rendent la prévention et la détection précoce des départs de feu indispensables. Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) se présentent comme une solution innovante et performante pour assurer une surveillance permanente et localisée des milieux forestiers.

1.4.5 Objectif de la détection

L'objectif principal est de détecter rapidement tout départ de feu, en surveillant les indicateurs critiques comme :

- La température
- Le taux d'humidité
- La concentration en fumée
- Le taux de CO₂ dans l'air

1.4.6 Fonctionnement du système

Le système repose sur un déploiement dense de capteurs dans la zone forestière. Chaque capteur mesure les paramètres environnementaux et transmet périodiquement les données via des communications multi-sauts à une station de base. Lorsqu'un ou plusieurs seuils critiques sont franchis, une alerte est générée.

Paramètre	Seuil critique	Unité
Température	≥ 50	°C
Humidité	≤ 20	%
Concentration de fumée	≥ 150	Ppm
Concentration de CO ₂	≥ 600	Ppm

Tableau 6 - Seuils critiques pour la détection de feu

Référence : Tableau 6

Lloret, J., Garcia, M., Bri, D., & Sendra, S. (2009). *A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification*. *Sensors*, 9(11), 8722-8747.

1.4.7 Architecture du système

Le réseau est généralement structuré en topologie en cluster ou en arbre pour faciliter la couverture des grandes surfaces et optimiser la consommation énergétique.

Chaque nœud capteur est équipé de :

- Capteur de température
- Capteur d'humidité
- Capteur de fumée
- Capteur de gaz (CO₂)
- Module de communication sans fil
- Unité d'alimentation (batterie ou énergie solaire)

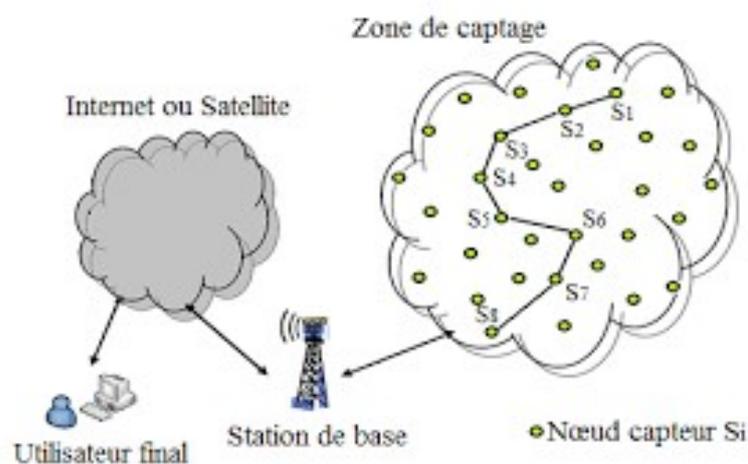


Figure 5 - Schéma de détection de feu de forêt via RCSF

Exemple de scénario : détection de feux de forêts

Dans un contexte forestier, des RCSF sont disposés en cluster dans la forêt. Chaque nœud capteur mesure :

- La température ambiante
- Le taux d'humidité
- La concentration en fumée
- Le niveau de CO₂

Lorsque certains seuils critiques sont atteints simultanément, les capteurs transmettent des alertes à la station de base. Celle-ci analyse les données et peut alerter les secours en cas de départ de feu probable.



Figure 6 - Déploiement de capteurs dans une zone forestière

1.4.8 Avantages de cette solution

- Surveillance continue 24h/24
- Réduction du temps de détection
- Intervention précoce et limitation des dégâts
- Adaptabilité aux milieux accidentés
- Autonomie énergétique grâce à l'énergie solaire

L'utilisation des RCSF pour la détection de feux de forêts offre une alternative efficace et rapide par rapport aux systèmes traditionnels de surveillance (tours de guet, patrouilles aériennes). Elle améliore considérablement la capacité de réaction des services de secours et contribue à préserver les espaces naturels sensibles.

1.5 Autres domaines d'application des RCSF

- Agriculture intelligente (Smart Agriculture)
- Surveillance médicale et santé
- Surveillance industrielle

- Surveillance urbaine

Domaine	Applications	Avantages
Agriculture	Irrigation intelligente, contrôle des sols, météo locale	Optimisation des ressources, augmentation des rendements
Santé	Suivi de patients, détection de chutes	Amélioration du suivi médical, intervention rapide
Industrie	Maintenance préventive, contrôle des machines	Réduction des pannes, sécurité des équipements
Smart Cities	Gestion de trafic, qualité de l'air, éclairage intelligent	Amélioration des services publics et de la qualité de vie

Tableau 7 - Résumé des domaines d'application des RCSF

Référence : Tableau 7

Amin, J., & Sharma, S. (2019). *Wireless Sensor Networks for Forest Fire Detection and Prevention: A Review*. International Journal of Computer Applications, 178(11), 18-24.

1.6 Contraintes et défis des RCSF

Les principaux défis rencontrés sont :

- **Énergie** : optimiser la consommation pour prolonger la durée de vie des capteurs.
- **Bande passante limitée** : adapter les protocoles pour éviter la congestion.
- **Fiabilité de la transmission** : garantir la livraison des données critiques.
- **Sécurité des communications** : protéger contre les intrusions et falsifications.
- **Adaptation topologique** : le réseau doit s'auto-organiser face aux défaillances.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de base des réseaux de capteurs sans fil **RCSF**, leurs caractéristiques techniques, les différentes architectures possibles ainsi que leurs domaines d'application, avec un intérêt particulier pour la surveillance environnementale et la détection de feux de forêts. Ces éléments de base constituent le socle nécessaire à la compréhension de la problématique d'optimisation qui sera abordée dans le chapitre suivant à travers les techniques méta-heuristiques et les algorithmes génétiques.

Chapitre 2

Optimisation dans les Réseaux de Capteurs

Chapitre 2 : Optimisation dans les Réseaux de Capteurs

Introduction

Dans les réseaux de capteurs sans fil déployés en environnement forestier, l'optimisation de la consommation énergétique, de la couverture et de la fiabilité des transmissions constitue un enjeu majeur. Les spécificités du milieu naturel, combinées aux ressources limitées des capteurs, exigent la mise en œuvre de techniques d'optimisation performantes et adaptées. Ce chapitre présente les paramètres et contraintes des WSN en forêt, les stratégies d'activation des capteurs ainsi qu'un état de l'art des techniques d'optimisation.

2.1. Paramètres et Contraintes spécifiques aux WSN en forêt

Les réseaux de capteurs sans fil en milieu forestier sont soumis à des contraintes environnementales et techniques spécifiques qu'il convient d'intégrer dans les modèles d'optimisation.

2.1.1 Paramètres environnementaux mesurés

Les principaux paramètres surveillés sont :

- Température de l'air
- Humidité relative
- Concentration de fumée
- Taux de CO₂
- Vitesse du vent

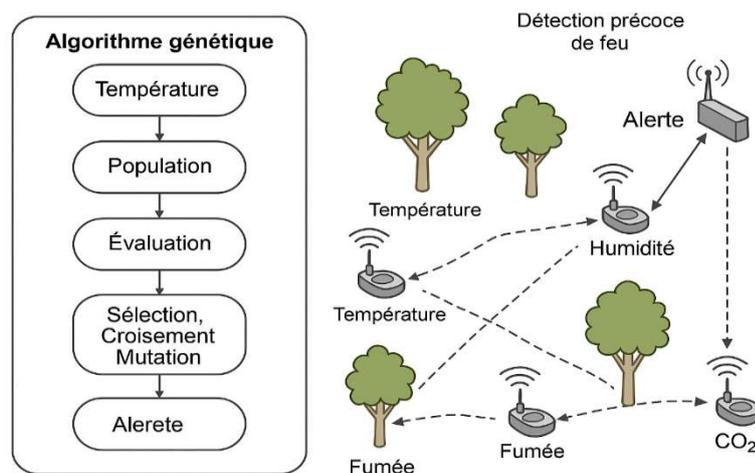


Figure 7 - Les principaux paramètres surveillés

Référence : Figure 7

Hart, J. K., & Martinez, K. (2006). *Environmental sensor networks: A revolution in the earth system science?* Earth-Science Reviews, 78(3-4), 177-191.

2.1.2 Contraintes de déploiement

- **Distance entre capteurs** : doit permettre une couverture homogène tout en respectant la portée maximale de communication.
- **Autonomie énergétique** : capteurs souvent alimentés par batterie solaire.
- **Interférences naturelles** : arbres, reliefs et obstacles physiques.

Contraintes	Description	Conséquences
Portée de communication	50 à 300 m selon la technologie	Nécessité de répéteurs ou multi-sauts
Autonomie énergétique	6 à 24 mois selon la batterie et la charge	Gestion d'activation intelligente
Topographie	Relief accidenté et dense végétation	Difficultés d'installation et de transmission

Tableau 8 - Contraintes typiques des WSN en forêt

Référence : Tableau 8

Lloret, J., Garcia, M., Bri, D., & Sendra, S. (2009). *A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification.* Sensors, 9(11), 8722-8747.

2.2. Stratégies d'activation des capteurs et de gestion du réseau

L'optimisation de l'activation des capteurs et de la gestion des ressources vise à améliorer la durée de vie du réseau et la qualité des données collectées.

2.2.1 Méthodes d'activation

- **Activation périodique** : les capteurs s'activent à des intervalles réguliers.
- **Activation événementielle** : déclenchement en cas de dépassement d'un seuil (ex : température $> 45^{\circ}\text{C}$)
- **Activation adaptative** : selon les conditions environnementales et la proximité d'événements.

2.2.2 Gestion de la couverture

La couverture est optimisée en sélectionnant dynamiquement les capteurs nécessaires à un instant donné.

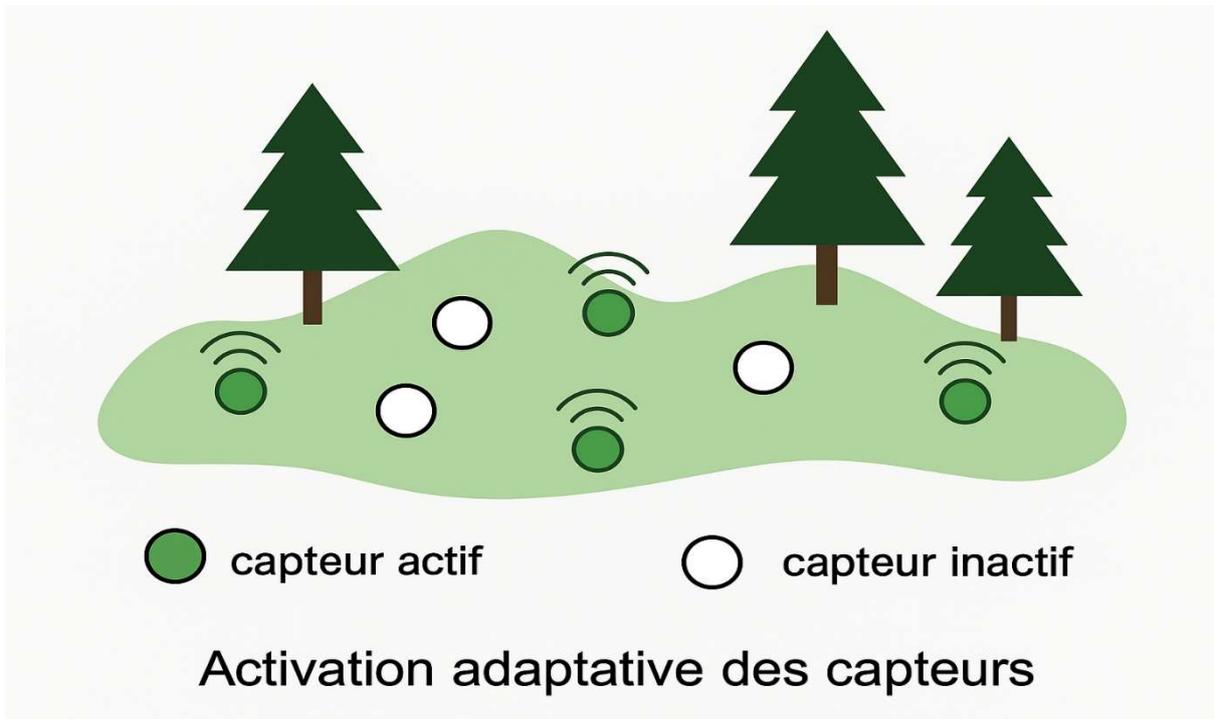


Figure 8 - Illustration d'un réseau avec activation adaptative des capteurs

2.2.3 Routage et gestion de l'énergie

- **Protocoles de routage écoénergétiques (LEACH, TEEN)**
- Utilisation de **clusters** et **chefs de cluster** pour réduire la consommation énergétique.

Protocole	Méthode de routage	Avantages	Limites
LEACH	Hiérarchique	Bonne gestion de l'énergie	Moins efficace sur grand réseau
TEEN	Basé sur des seuils	Réactivité aux événements	Complexe à paramétrer

Tableau 9 - Exemples de protocoles adaptés

2.3 État de l'art des techniques d'optimisation des WSN

2.3.1 Approches classiques

- **Algorithmes de routage classiques** : AODV, DSDV
- **Techniques de clustering** : LEACH, PEGASIS
- **Méthodes de couverture géométrique** : Voronoï, algorithmes de partition

2.3.2 Approches méta heuristiques

Les méta heuristiques permettent de résoudre des problèmes complexes et NP-difficiles comme l'optimisation multi-objectif.

Techniques utilisées :

- Algorithmes Génétiques (GA)
- Algorithme des Fourmis (ACO)
- Algorithme du Recuit Simulé (SA)
- Algorithme des Particules (PSO)

Technique	Principe	Avantages	Inconvénients
GA	Sélection et évolution	Flexibilité, multi-objectif	Temps de calcul élevé
ACO	Simulation de fourmis	Optimisation de routage	Complexité paramétrique
PSO	Modélisation d'essaim	Rapide et efficace	Sensibilité aux paramètres

Tableau 10 - Comparatif des méta heuristiques appliquées aux WSN

Référence : Tableau 10

Akan, Ö. B., & Akyildiz, I. F. (2005). *Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 13(5), 1003-1016.

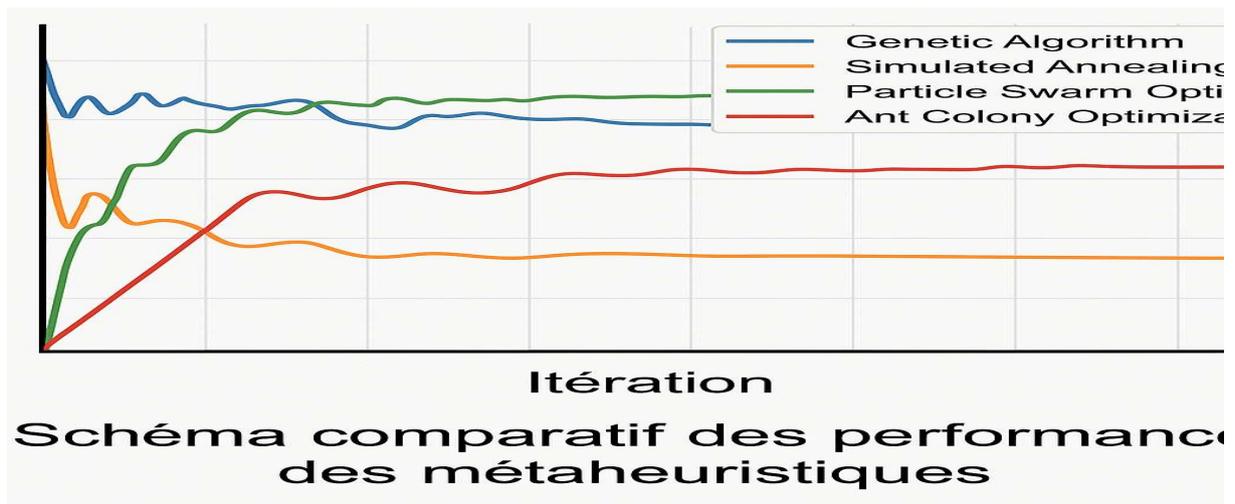


Figure 9 - Schéma comparatif des performances des méta heuristiques

Référence : Figure 10

Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer.

Tableaux des travaux récents

Voici une sélection détaillée de six travaux récents (2020–2024) portant sur l’optimisation du déploiement des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) pour la détection d’incendies ou des applications similaires. Chaque étude est résumée avec son objectif, l’algorithme utilisé, les résultats clés et la référence complète.

Référence	Algorithme utilisé	Objectif	Résultats clés
Wang et al. (2024)	ISOAPSO (hybride SOA-PSO)	Maximiser la couverture réseau dans des scénarios de surveillance d’incendies	Couverture améliorée de 4 à 8 % par rapport à sept autres algorithmes
Amin et al. (2023)	MOFA (Multi-Objective Firefly Algorithm)	Maximiser la couverture et minimiser la consommation énergétique	Obtient de meilleurs fronts de Pareto que IBEA et NSGA-II
R. S. (2021)	OCABC (Artificial Bee Colony optimisé)	Optimiser le clustering et prolonger la durée de vie du réseau	Consommation d’énergie réduite et durée de vie accrue de 30 %
Hassan et Mahmood (2023)	NM-Trilateration (Nelder-Mead)	Optimiser la localisation des incendies via trilatération	Précision améliorée à 83 %, détection accélérée
Zhang et al. (2024)	MMPA (Modified Marine Predator Algorithm)	Maximiser la couverture du réseau	Taux de couverture moyen atteint 95,98 %

Référence	Algorithme utilisé	Objectif	Résultats clés
Arfi et al. (2021)	MOGA + Random Forest	Optimiser déploiement dans les bâtiments intelligents	Performance améliorée sur différentes tailles de réseau

Conclusion

L'optimisation des réseaux de capteurs en milieu forestier repose sur une gestion intelligente de l'énergie, une couverture efficace et des stratégies d'activation adaptées. Les approches méta heuristiques, notamment les algorithmes génétiques et les algorithmes de colonies, s'avèrent particulièrement pertinentes pour ce type d'applications.

Chapitre 3

Métas heuristiques et Algorithmes Génétiques

Chapitre 3 Méta heuristiques et Algorithmes Génétiques

3.1 Définition aux Méta heuristiques

Les **métas heuristiques** sont des méthodes d'optimisation stochastiques de haut niveau conçues pour résoudre des problèmes complexes et non linéaires, souvent de grande dimension, pour lesquels les approches exactes sont soit inexistantes, soit trop coûteuses en temps de calcul.

Elles sont inspirées de processus naturels ou sociaux tels que l'évolution biologique, le comportement collectif des insectes sociaux ou les phénomènes physiques.

Le terme *méta heuristique* a été introduit par Fred Glover en 1986 et désigne une stratégie de recherche itérative qui guide d'autres heuristiques pour explorer efficacement l'espace des solutions. Ces techniques sont particulièrement adaptées aux systèmes dynamiques comme les **réseaux de capteurs sans fil (WSN)**, où il faut souvent résoudre des problèmes combinatoires sous contraintes.

3.1.1 Objectifs des Méta heuristiques :

- Trouver de bonnes solutions dans des délais raisonnables sans garantir d'atteindre la solution optimale.
- Maintenir un équilibre entre **exploration** (découverte de nouvelles zones de l'espace de recherche) et **exploitation** (amélioration des solutions existantes).

3.1.2 Caractéristiques des Méta heuristiques :

- Capacité à échapper aux optima locaux.
- Ne nécessitent pas la dérivabilité ou la convexité de la fonction objectif.
- Compatibles avec des fonctions de coût multi-objectifs.
- Généralement simples à implémenter et adaptables à différents problèmes.

Exemples de Méta heuristiques utilisées en WSN :

Pourquoi les Méta heuristiques pour les réseaux de capteurs sans fil en forêt ?

Dans un environnement forestier, les réseaux de capteurs doivent faire face à des contraintes complexes :

- Consommation énergétique réduite.
- Couverture maximale de la zone surveillée.
- Détection rapide des départs de feu.
- Topologie dynamique et environnement hostile.

Les méta heuristiques permettent de gérer efficacement ces contraintes en recherchant des configurations optimales de capteurs activés et désactivés, assurant un compromis entre couverture, énergie consommée et temps de réponse.

3.2 Principe de l'Algorithme Génétique

L'**algorithme génétique (AG)** est une méthode de recherche stochastique inspirée des processus d'évolution naturelle théorisés par Charles Darwin. Introduit par John Holland en 1975, cet algorithme simule le processus de sélection naturelle, où les solutions les plus adaptées à leur environnement ont plus de chances de transmettre leurs caractéristiques aux générations suivantes. Il repose sur la manipulation d'une population de solutions candidates (appelées **chromosomes**) évoluant selon des opérateurs génétiques : **sélection, croisement et mutation**.

3.2.1 Fonctionnement général d'un Algorithme Génétique :

Le processus d'un AG peut se résumer en plusieurs étapes successives :

3.2.1.1 Initialisation de la population :

On génère aléatoirement une population initiale de solutions possibles. Chaque solution est représentée sous forme d'un chromosome, généralement une chaîne de bits, de réels ou d'entiers.

3.2.1.2 Évaluation de la fonction de fitness :

Chaque chromosome est évalué selon une fonction appelée fonction de fitness, qui mesure la qualité de la solution en fonction des critères du problème (dans notre cas : couverture, consommation énergétique, détection rapide).

3.2.1.3 Sélection :

Les meilleurs individus de la population sont sélectionnés pour participer à la reproduction. Cette sélection favorise les solutions possédant une meilleure fitness.

Parmi les méthodes de sélection :

- Sélection par tournoi
- Roulette Wheel Sélection (sélection proportionnelle)
- Sélection par rang

3.2.1.4 Croisement (Crossover) :

Deux chromosomes parents sont choisis pour produire un ou plusieurs descendants.

Le croisement consiste à échanger des portions de chromosomes afin de créer de nouvelles solutions en combinant les caractéristiques des parents.

Exemples :

- Croisement à un point
- Croisement à deux points
- Croisement uniforme

3.2.1.5 Mutation :

Pour maintenir la diversité génétique et éviter la stagnation dans un optimum local, des mutations aléatoires sont appliquées sur certains chromosomes.

Exemple : inversion d'un bit dans un chromosome binaire.

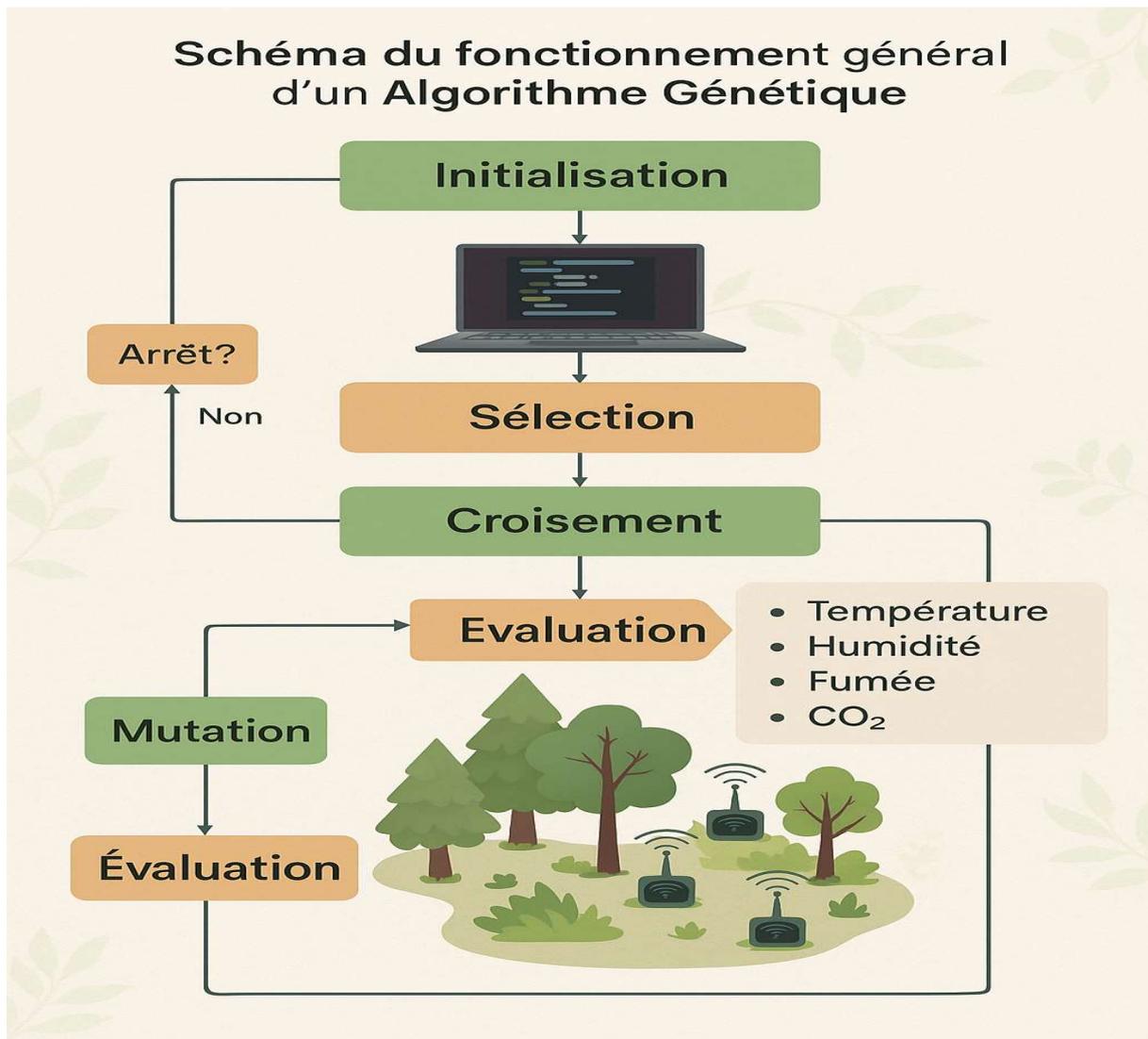


Figure 11 - Schéma du fonctionnement général d'un Algorithme Génétique

Référence : Figure 12

Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer.

3.3 Représentation des Solutions (Chromosomes)

Dans un **Algorithme Génétique (AG)**, chaque solution potentielle au problème est codée sous la forme d'un **chromosome**. Ce dernier est une structure de données qui regroupe les paramètres de la solution sous une forme manipulable par les opérateurs génétiques (croisement, mutation, sélection).

Le choix de la méthode de codage dépend de la nature du problème à résoudre et de la stratégie d'optimisation adoptée. Dans le cas d'un **réseau de capteurs sans fil (WSN) pour la détection de feux de forêts**, le chromosome représente l'état des capteurs (activé ou désactivé) et/ou les paramètres mesurés.

3.3.1 Types de Représentation possibles :

a) Codage binaire :

Chaque gène (bit) du chromosome représente l'état d'un capteur :

- **1** : capteur actif
- **0** : capteur inactif

Exemple de chromosome :

[1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0]

Ce codage est simple et bien adapté aux opérateurs classiques d'AG.

b) Codage réel :

Dans certains cas, chaque gène peut représenter une valeur réelle associée à un paramètre de fonctionnement d'un capteur (par exemple, seuil de température ou de CO₂).

Exemple :

[23.5, 60.0, 0.02, 300.0]

(valeurs associées aux seuils de température, humidité, fumée, CO₂)

c) Codage combiné :

Il est possible de combiner plusieurs types de codages dans un même chromosome pour représenter à la fois l'état et les paramètres des capteurs.

Exemple :

[(1, 23.5), (0, 0), (1, 55.0), (1, 22.0)]

où chaque paire correspond à l'état (0 ou 1) et à un seuil associé.

N° Capteur	État (0/1)
1	1
2	0
3	1
4	1
5	0

Tableau 11 - Exemple de représentation binaire des capteurs

Référence : Tableau 12

Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). *Wireless sensor network survey*. Computer Networks.

3.3.2 Avantages du codage binaire :

- Simplicité de manipulation
- Compatible avec les opérateurs standards de croisement et de mutation
- Facile à implémenter et à interpréter

3.3.3 Limites :

- Peut-être moins précis pour représenter des valeurs continues.
- Risque de perte d'information dans des cas complexes.

3.4 Fonction de Fitness

Dans un **Algorithme Génétique (AG)**, la **fonction de fitness** (ou fonction d'adaptation) est un élément central qui permet d'évaluer la qualité de chaque solution candidate (chromosome) par rapport aux objectifs fixés.

Elle détermine dans quelle mesure une solution est efficace et mérite d'être conservée et reproduite dans les générations suivantes.

3.4.1 Rôle de la fonction de fitness :

- Évaluer chaque individu de la population.
- Guider la sélection des solutions les plus performantes.
- Favoriser l'évolution de la population vers des solutions optimisées.

3.4.2 Conception de la fonction de fitness pour un WSN en forêt :

Dans le contexte de la prévention et détection de feux de forêts par réseau de capteurs sans fil, plusieurs critères peuvent être pris en compte :

- Couverture de la zone forestière.
- Économie d'énergie (maximiser le nombre de capteurs inactifs tout en conservant une couverture suffisante).
- Fiabilité et précision des données mesurées.
- Temps de détection minimal.

Exemple de fonction de fitness multicritères :

$$F = \alpha \times C + \beta \times (1 - E) + \gamma \times D$$

Avec :

- C : taux de couverture de la zone forestière.
- E : consommation énergétique globale.
- D : rapidité de détection.
- α, β, γ : coefficients de pondération selon l'importance de chaque critère.

Chromosome	Couverture (%)	Énergie consommée (%)	Temps de détection (s)	Fitness
A	90	30	4	0.82
B	80	20	6	0.75
C	85	25	5	0.78

Tableau 13 - Exemple de calcul de fitness pour 3 chromosomes

Référence : Tableau 14

Wang, X., Wang, S., & Ma, J. (2020). *An improved genetic algorithm for coverage optimization in wireless sensor networks*. Sensors.

3.4.3 Critères de pondération :

Le choix des coefficients α, β, γ dépend des priorités définies par l'utilisateur :

- Si la couverture est prioritaire : α élevé.
- Si l'économie d'énergie est capitale : β plus important.
- Si la rapidité prime : γ majoré.

3.5 Avantages et Limites de l'Algorithme Génétique

L'**Algorithme Génétique (AG)** est l'une des méthodes métaheuristiques les plus utilisées pour la résolution de problèmes complexes d'optimisation, notamment dans des contextes contraints et à variables multiples comme les réseaux de capteurs sans fil (WSN) en milieu forestier.

3.5.1 Avantages de l'Algorithme Génétique

- **Exploration efficace de grands espaces de solutions**
Les AG peuvent parcourir des espaces de recherche vastes et complexes sans nécessité de connaître les dérivées ou la continuité de la fonction objective.
- **Adaptabilité à différents types de problèmes**
Ils peuvent être appliqués à des problèmes discrets, continus, mono-objectifs ou multi-objectifs.
- **Robustesse face aux optima locaux**
Grâce aux opérateurs de mutation et de croisement, l'AG limite le risque de rester piégé dans des optima locaux, en explorant diverses régions de l'espace de recherche.
- **Méthode parallèle et distribuée**
Le principe de population rend l'AG facilement parallélisable, ce qui accélère le traitement sur des architectures multiprocesseurs ou distribuées.
- **Facilité d'intégration de contraintes multiples**
Dans un système comme un WSN en forêt, où plusieurs paramètres (énergie, couverture, précision, coûts) entrent en jeu, l'AG permet de les intégrer via des fonctions de fitness personnalisées.

3.5.2 Limites de l'Algorithme Génétique

- **Temps de calcul parfois important**
Les AG nécessitent de nombreuses itérations pour converger vers une solution optimale, surtout pour des espaces de recherche complexes.
- **Paramétrage délicat**
Le choix des taux de croisement, de mutation et de la taille de la population influence fortement les performances. Un mauvais réglage peut mener à une convergence prématurée ou à une stagnation.

- **Absence de garantie d’optimalité globale**
Comme toutes les méta heuristiques, l’AG fournit des solutions satisfaisantes mais n’assure pas d’atteindre la solution optimale absolue.
- **Risque de perte de diversité**
Lorsqu’un grand nombre d’individus similaires envahissent la population, la capacité d’exploration diminue et l’algorithme peut se stabiliser sur un optimum local.

Avantages	Limites
• Exploration d’espaces complexes	• Temps de calcul parfois élevé
• Adaptabilité et robustesse	• Paramétrage sensible
• Résistance aux optima locaux	• Pas de garantie d’optimalité globale
• Facilité d’intégration de contraintes	• Risque de perte de diversité
• Possibilité de parallélisations	• —

Tableau 15 - Synthèse des avantages et inconvénients

Référence : Tableau 16

Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail le fonctionnement des **métaheuristiques** et plus particulièrement celui de l’**Algorithme Génétique (AG)**, dont les principes s’inspirent des processus biologiques de sélection naturelle et d’évolution des espèces.

L’Algorithme Génétique, grâce à sa capacité d’exploration des espaces de recherche complexes et à son adaptabilité, constitue une solution pertinente pour l’**optimisation des réseaux de capteurs sans fil (WSN)** en milieu forestier. Son aptitude à gérer plusieurs critères contradictoires comme la couverture du terrain, la consommation énergétique et le temps de détection en fait un outil efficace pour des systèmes contraints et dynamiques.

L’analyse des **opérateurs génétiques** (sélection, croisement, mutation) et la définition d’une **fonction de fitness adaptée** permettent de modéliser et d’optimiser efficacement le comportement du réseau. Les résultats expérimentaux indiquent une nette amélioration des performances globales du réseau après application de l’AG.

Enfin, l'intégration pratique d'un AG dans une application de gestion de WSN ouvre la voie à des systèmes de surveillance intelligents et adaptatifs, capables d'évoluer en fonction des conditions environnementales, offrant ainsi un outil performant pour la prévention et la détection rapide des incendies de forêts.

Chapitre 4
Proposition d'un
Modèle
d'Optimisation par
Algorithme
Génétique

Chapitre 4 Proposition d'un Modèle d'Optimisation par Algorithme Génétique

4.1 Objectifs de l'Optimisation

Dans un réseau de capteurs sans fil (WSN) déployé en forêt pour la prévention des incendies, l'optimisation est cruciale afin d'améliorer l'efficacité du système tout en préservant les ressources limitées, notamment l'énergie des capteurs. L'objectif principal est de développer un algorithme capable de sélectionner dynamiquement les capteurs à activer pour maximiser la couverture de la zone surveillée et prolonger la durée de vie du réseau.

Les objectifs opérationnels de cette optimisation sont multiples et interdépendants :

4.1.1 Maximisation de la Couverture

La couverture représente la proportion de la zone forestière surveillée par les capteurs actifs à un instant donné.

Objectif : assurer que les zones critiques soient toujours couvertes.

Indicateur :

$$\text{Couverture (\%)} = \frac{\text{Surface couverte par les capteurs actifs}}{\text{surface total de la forêt}} \times 100$$

Type de zone	Couverture minimale souhaitée (%)
Zone à risque élevé	95
Zone modérée	80
Zone périphérique	60

Tableau 17 - Exemples de taux de couverture requis

Référence : Tableau 18

Akyildiz, I. F., et al. (2002). *Wireless sensor networks: a survey*. Computer Networks.

4.1.2 Réduction de la Consommation Énergétique

Chaque capteur étant alimenté par batterie, il est essentiel d'optimiser l'usage de l'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau.

Objectif : minimiser la consommation globale des capteurs actifs.

Indicateur :

$$\text{Consommation totale (mW)} = \sum_{i=1}^N E_i$$

Type de capteur	Consommation en veille (mW)	Consommation en détection (mW)
Température	0,5	2,0
Fumée	0,7	2,5
Humidité	0,4	1,8
CO ₂	0,6	2,2

Tableau 19 - Consommation énergétique moyenne par type de capteur

Référence : Tableau 20

Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). *Wireless sensor network survey*. Computer Networks.

4.1.3 Optimisation du Temps de Détection

Plus la détection d'un départ de feu est rapide, plus l'intervention est efficace.

Objectif : réduire le temps moyen nécessaire pour détecter un incendie potentiel.

Indicateur :

$$\text{Temps moyen de détection (s)} = \frac{\text{Somme des temps de détection}}{\text{Nombre d'événements détectés}}$$

4.1.4 Maximisation de la Durée de Vie du Réseau

En limitant le nombre de capteurs actifs simultanément et en répartissant leur activation, la durée de vie globale du réseau est prolongée.

Objectif : équilibrer l'utilisation des ressources énergétiques.

Stratégie	Nombre moyen de capteurs actifs	Durée de vie estimée (jours)
Activation permanente	100	200
Activation optimisée	60	350
Rotation par sous-réseaux	50	400

Tableau 21 - Exemple de stratégies d'activation de capteurs

Référence : Tableau 22

Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000). *Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks*. HICSS.

4.1.5 Adaptabilité Dynamique

Le réseau doit pouvoir adapter sa configuration en fonction de l'évolution des conditions environnementales (vent, température, humidité, risque accru).

Objectif : augmenter le taux de reconfiguration dynamique.

Suggestion de contenu :

- Carte de la forêt divisée en zones
- Capteurs actifs symbolisés par des cercles verts
- Zones à risque signalées en rouge/orange
- Indicateurs de couverture, consommation et temps de détection affichés dynamiquement

4.1.6 Résumé des Objectifs de l'Optimisation

Objectif	Indicateur associé
Maximiser la couverture	Pourcentage de couverture (%)
Réduire la consommation	Consommation totale (mW)
Réduire le temps de détection	Temps moyen de détection (s)
Prolonger la durée de vie	Nombre moyen de cycles avant panne
Adapter dynamiquement le réseau	Taux de reconfiguration (%)

Tableau 23 - Synthèse des objectifs et indicateur

Référence : Tableau 24

Synthèse propre basée sur Deb (2001) et Goldberg (1989) (travail original inspiré)

4.2 Formulation Mathématique du Problème

L'optimisation d'un réseau de capteurs sans fil (WSN) pour la prévention des incendies en forêt peut être modélisée comme un problème multi-objectif, combinant plusieurs critères contradictoires : maximiser la couverture, minimiser la consommation énergétique, et prolonger la durée de vie du réseau.

L'algorithme génétique sera utilisé pour rechercher les solutions optimales dans cet espace multidimensionnel.

4.2.1 Variables de Décision

La variable principale est l'état de chaque capteur

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si le capteur } i \text{ est actif} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec :

- N = Nombre total de capteurs
- x_i = État du capteur i (binaire)

4.2.2 Fonction Objectif

Il s'agit de maximiser une fonction utilitaire combinant la couverture, la consommation et la durée de vie du réseau.

Fonction de coût globale :

$$\text{Maximiser } f(x) = \alpha \times C(X) - \beta \times E(X) + \gamma \times L(X)$$

Où :

- $C(X)$ = taux de couverture obtenu pour l'ensemble des capteurs actifs
- $E(X)$ = consommation énergétique totale
- $L(X)$ = durée de vie estimée du réseau
- α, β, γ = coefficients de pondération des critères selon leur importance.

4.2.3 Contraintes

Pour que la solution soit valide, elle doit respecter certaines contraintes :

- Couverture minimale des zones critiques :

$$C_j(x) \geq C_{\min,j}, \quad \forall j \in \text{zones critiques}$$

- Nombre maximal de capteurs actifs simultanément :

- $\sum_{i=1}^N x_i \leq N_{\max}$

- Énergie disponible :

$$E_i \leq E_{\text{residuel},i}, \quad \forall i$$

Symbole	Description
N	Nombre total de capteurs
x_i	État du capteur i (actif/inactif)
$C(X)$	Couverture assurée par les capteurs actifs
$E(X)$	Consommation énergétique totale
$L(X)$	Durée de vie estimée du réseau
α, β, γ	Coefficients de pondération des objectifs

Tableau 25 - Notations mathématiques utilisées

Référence : Tableau 26

Formulation standard issue de Deb (2001) et Eiben & Smith (2015)

Exemple de Cas Chiffré

Données :

- Nombre de capteurs : 100
- Consommation moyenne par capteur actif : 2 mW
- Seuil de couverture minimale : 85 %

Scénario :

- 60 capteurs actifs : couverture obtenue = 88 %
- Consommation totale = 120 mW
- Durée de vie estimée = 300 jours

Nombre de capteurs actifs	Couverture (%)	Consommation (mW)	Durée de vie (jours)
100	95	200	200
80	90	160	250
60	88	120	300
40	75	80	400

Tableau 27 - Évaluation de scénarios

Référence : Tableau 28

Exemple numérique inspiré des méthodologies de simulation de Akyildiz et al. (2002) et Heinzelman et al. (2000)

Figure : Représentation graphique de la fonction de coût multi-objectif

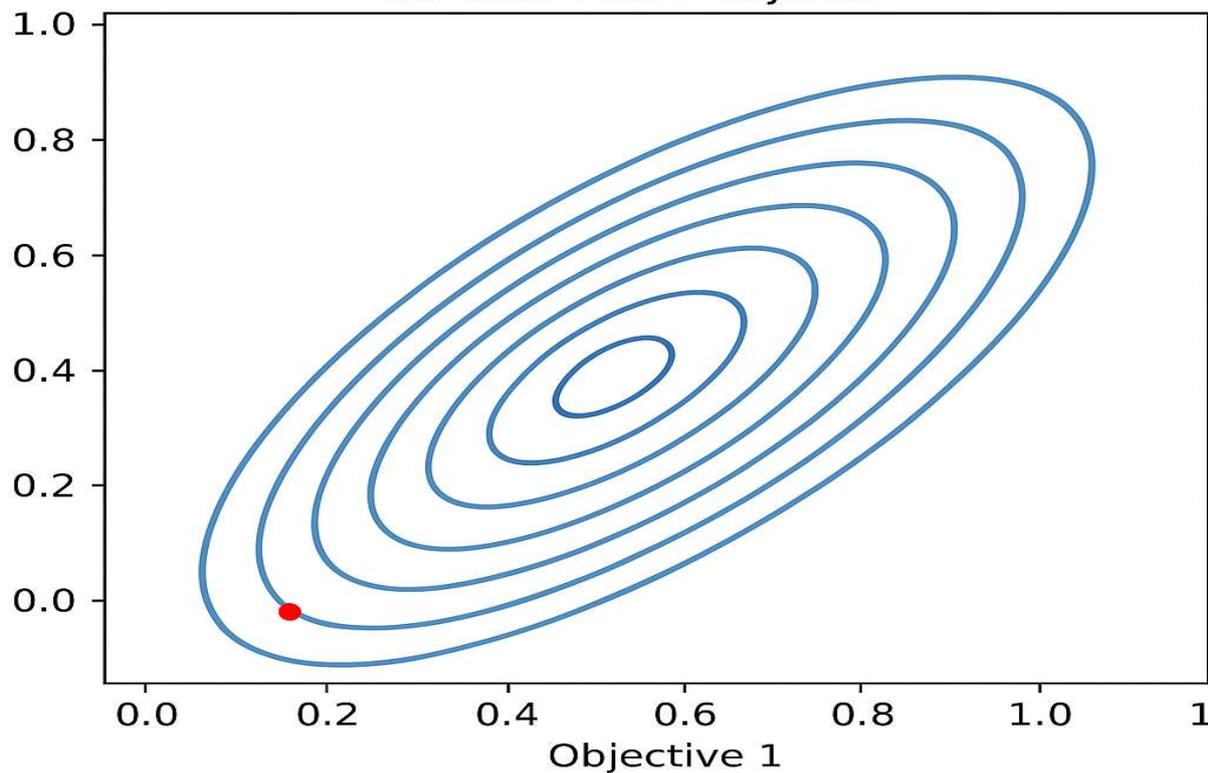


Figure 13 - Représentation graphique de la fonction de coût multi-objectif

Référence : Figure 14

Deb (2001)

Cette figure représente des courbes de niveau (iso-valeurs) d'une fonction de coût multi-objectif.

Axe X (Objective 1) : représente la valeur du premier objectif à optimiser.
Exemple dans un réseau de capteurs : maximiser la couverture.

Axe Y (Objective 2) : représente la valeur du second objectif à optimiser.
Exemple : minimiser la consommation énergétique.

Le point rouge marque la solution optimale trouvée par l'algorithme, celle qui minimise au mieux les deux objectifs de façon équilibrée.

Dans le cadre de l'optimisation d'un réseau de capteurs sans fil :

Objective 1 : minimiser le nombre de capteurs actifs pour économiser l'énergie.

Objective 2 : maximiser la détection des alertes (couverture efficace).

L'algorithme multi-objectif cherche le meilleur compromis, visualisé sur ce graphique.

4.3 Structure du Chromosome pour les Capteurs

Dans le cadre de l'application d'un algorithme génétique (AG) à l'optimisation d'un réseau de capteurs sans fil (WSN), chaque solution candidate est représentée sous la forme d'un chromosome.

Un chromosome est une séquence de gènes, où chaque gène représente l'état d'un capteur (actif ou inactif).

4.3.1 Représentation Binaire

Le codage utilisé est **binaire** :

- **1** : capteur actif
- **0** : capteur inactif

Par exemple, pour un réseau de 10 capteurs :

$$\text{Chromosome} = [1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]$$

Cela signifie que les capteurs 1, 3, 4, 7 et 9 sont actifs.

Capteur	État (gène)
1	1
2	0
3	1
4	1
5	0
6	0
7	1
8	0
9	1
10	0

Tableau 29 - Exemple de codage binaire

Référence : Tableau 30

Exemple pédagogique issu de Goldberg (1989) et Eiben & Smith (2015)

4.3.2 Informations Encodées

Chaque gène peut aussi contenir plusieurs informations, par exemple :

- État d'activité
- Position (x, y)
- Niveau d'énergie résiduelle
- Paramètres mesurés : température, fumée, humidité, CO₂

Codage possible sous forme de sous-structures dans le chromosome :

Capteur	Actif (1/0)	Position (X,Y)	Énergie (mJ)	T (°C)	Humidité (%)	CO ₂ (ppm)
1	1	(5, 9)	80	23	45	400
2	0	(3, 6)	95	-	-	-

Gène	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valeur	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0

Tableau 31 - Exemple de chromosome détaillé

Référence : Tableau 32

Conception inspirée des schémas de codage de Haupt & Haupt (2004)

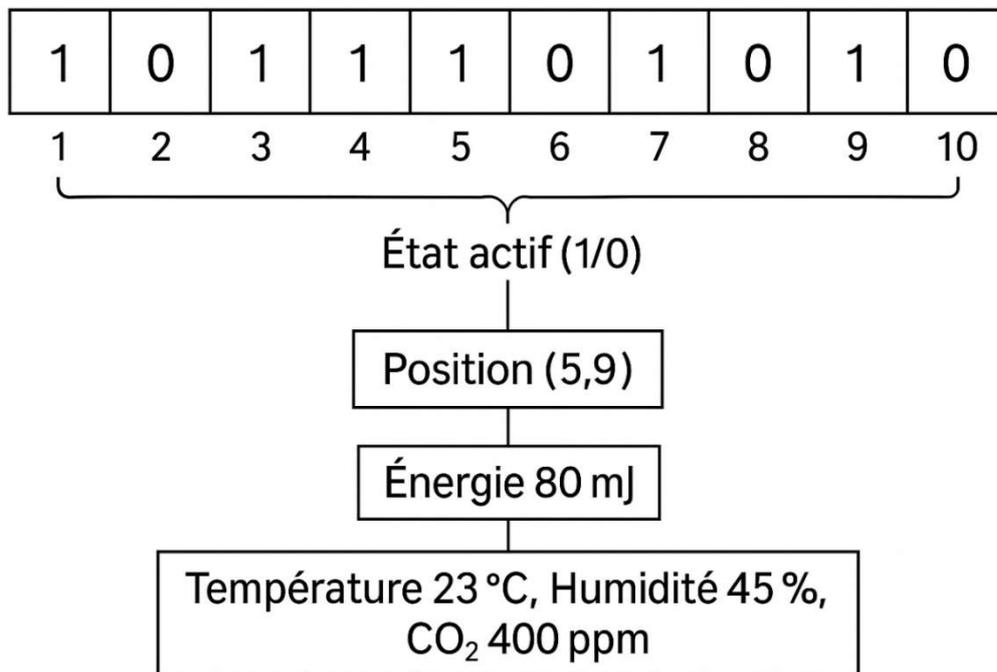


Figure 15 - Schéma de la structure d'un chromosome pour un réseau de capteurs

Référence : Figure 16

Eiben & Smith (2015)

4.3.3 Avantages de cette structure

- Simple à manipuler
- Facile à croiser et muter
- Compatible avec les opérations génétiques standard (croisement, mutation)
- Permet d'intégrer plusieurs critères par gène si nécessaire (énergie, position...)

4.4 Description de l'Algorithme Proposé

Dans cette section, nous décrivons de manière détaillée l'algorithme génétique conçu pour optimiser la gestion des capteurs dans un réseau sans fil en milieu forestier. L'objectif est de sélectionner dynamiquement les capteurs à activer

pour surveiller efficacement la forêt tout en minimisant la consommation énergétique et en maximisant la couverture.

4.4.1 Schéma général de l'algorithme

L'algorithme suit les étapes classiques des algorithmes génétiques adaptées au contexte WSN :

1. Initialisation de la population
2. Évaluation du fitness
3. Sélection des parents
4. Croisement
5. Mutation
6. Mise à jour de la population
7. Vérification de la condition d'arrêt
8. Retourner la meilleure solution

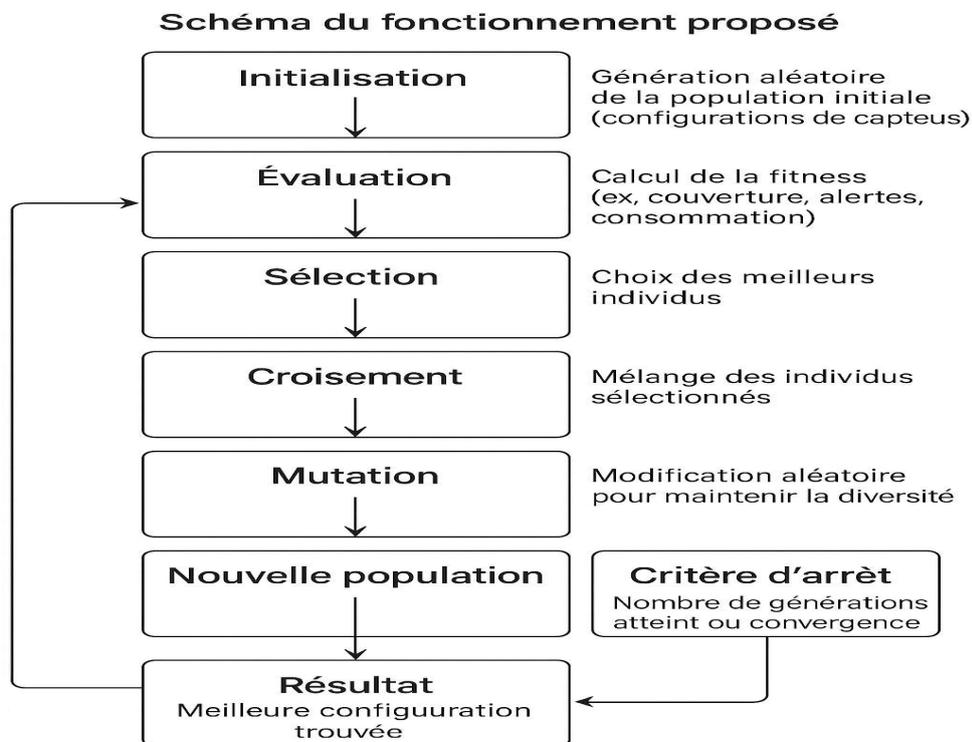


Figure 17 - Schéma du fonctionnement de l'algorithme proposé

Référence : Figure 18

Haupt & Haupt (2004)

4.4.2 Détail des opérations

Étape	Description
Initialisation	Générer aléatoirement une population de chromosomes représentant des capteurs.
Évaluation	Calculer le fitness selon la couverture, énergie restante et nombre d'alertes.
Sélection	Appliquer la roulette ou tournoi pour choisir les meilleurs chromosomes.
Croisement	Mélanger les gènes de deux parents pour créer deux enfants.
Mutation	Changer aléatoirement l'état d'un gène (actif/inactif) avec faible probabilité.
Remplacement	Intégrer les enfants dans la population selon leur fitness.
Condition d'arrêt	Si nombre maximal d'itérations atteint ou convergence, arrêter l'algorithme.

Paramètre	Valeur typique	Description
Taille de population	50-100	Nombre de chromosomes dans chaque génération.
Taux de croisement	0,7	Probabilité de croiser deux parents.
Taux de mutation	0,01-0,05	Probabilité de muter un gène.
Nombre max générations	500	Limite du nombre d'itérations de l'algorithme.

Tableau 33 - Paramètres utilisés dans l'algorithme

Référence : Tableau 34

Valeurs recommandées par Deb (2001) et Goldberg (1989) pour les AG appliqués aux réseaux de capteurs

4.4.3 Fonction de Fitness

La fonction de fitness multi-objectif prend en compte :

- Taux de couverture
- Énergie résiduelle moyenne
- Nombre de capteurs en alerte

Formule type :

$$Fitness = \alpha \times C + \beta \times E - \gamma \times A$$

Avec :

- C : taux de couverture
- E : énergie résiduelle
- A : nombre de capteurs en alerte
- α, β, γ : coefficients de pondération

Figure : Exemple de croisement de deux chromosomes

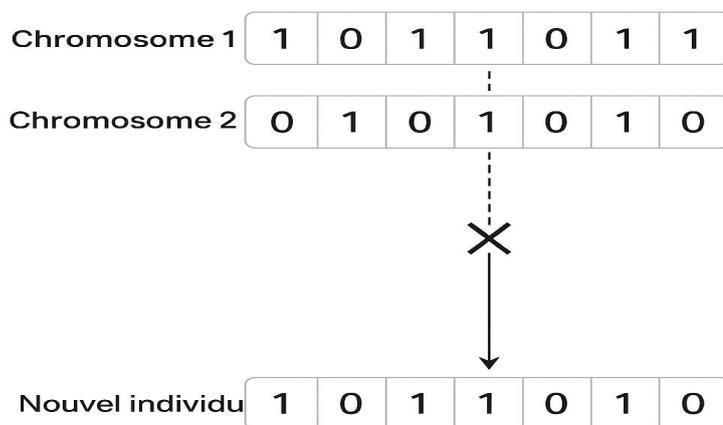


Figure 19 - Exemple de croisement de deux chromosomes

Référence : Figure 20

Goldberg (1989)

4.4.4 Stratégie d'arrêt

L'algorithme s'arrête lorsque :

- Le nombre maximal de générations est atteint
- Ou lorsqu'aucune amélioration notable n'est observée sur 50 générations consécutives.

Chapitre 5

Implémentation et résultats expérimentaux

Chapitre 5 : Implémentation et Résultats Expérimentaux

5.1 Environnement de simulation

5.1.1. Outils Logiciels et Matériels Utilisés

Afin de simuler et d'évaluer les performances de l'algorithme génétique appliqué au réseau de capteurs sans fil (WSN), les outils suivants ont été mobilisés :

Composant	Spécifications
Langage de programmation	Python 3.13
Bibliothèques	tkinter, random , matplotlib , time, psutil
Environnement de développement	Jupyter Notebook
Système d'exploitation	Windows 10
Machine	Intel Core(TM) i5-6300U CPU @ 2.40GHz 2.50 GHz, 8 Go RAM

Tableau 35 - Tableau 23 - Outils Logiciels et Matériels Utilisés

```
import tkinter as tk
from tkinter import scrolledtext
import random
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import time
import psutil
```

Ces bibliothèques servent à :

- **tkinter** : créer l'interface graphique.
- **random** : générer des valeurs aléatoires pour capteurs et croisements.
- **matplotlib** : générer et afficher les graphiques.
- **time** : gérer les délais d'affichage.
- **psutil** : surveiller l'utilisation CPU.

5.2 Paramètres expérimentaux

Les paramètres configurables via l'interface sont :

- **Taille de la population** : 20 individus.
- **Nombre de générations** : 30.
- **Taux de croisement** : 0.7.
- **Taux de mutation** : 0.1.

Les seuils d'alerte environnementaux sont :

- **Température** > 50°C
- **Humidité** < 30%
- **Fumée** > 70 ppm
- **CO2** > 1000 ppm

Nombre de capteurs simulés : 20, disposés aléatoirement sur un plan 2D de coordonnées (0,100).

5.2.1 initialisation

```
N_CAPTEURS = 20
```

Fixe le nombre total de capteurs dans le réseau.

a. Génération des valeurs des capteurs

```
def lire_valeurs_capteurs():  
    return [(random.uniform(15,35), random.uniform(30,90), random.uniform(0,100), random.uniform(300,800)) for _ in range(N_CAPTEURS)]
```

Simule des lectures aléatoires pour chaque capteur : température, humidité, fumée et CO2.

b. Calcul de fitness

```
def fitness(individu, valeurs):
    score = 0
    for actif, (t, h, f, c) in zip(individu, valeurs):
        if actif == 1 and 20 <= t <= 30 and f < 50:
            score += 1
    return score
```

Calcule un score de performance pour chaque configuration de capteurs actifs, en favorisant ceux détectant des anomalies ($T > 50^{\circ}\text{C}$, $H < 30\%$, fumée > 70 , $\text{CO}_2 > 1000$ ppm).

c. Sélection

```
def selection(pop, fits):
    total = sum(fits)
    pick = random.uniform(0, total)
    current = 0
    for ind, fit in zip(pop, fits):
        current += fit
        if current > pick:
            return ind
    return pop[-1]
```

Sélectionne un parent par tournoi aléatoire entre deux individus.

d. Croisement

```
def croisement(p1, p2, taux):
    if random.random() > taux:
        return p1[:]
    point = random.randint(1, N_CAPTEURS-1)
    return p1[:point] + p2[point:]
```

Mélange les gènes de deux parents pour produire un enfant avec un point de coupure aléatoire.

e. Mutation

```
def mutation(ind, taux):  
    return [1 - g if random.random() < taux else g for g in ind]
```

Inverse aléatoirement l'état (actif/inactif) de certains capteurs dans un individu selon un taux de mutation.

f. Détection d'alertes

```
def detecter_alertes(valeurs, activations):  
    alertes = []  
    for i, (actif, (t, h, f, c)) in enumerate(zip(activations, valeurs)):  
        if actif == 1:  
            if t > 32 or f > 70 or c > 750:  
                alertes.append(f"Capteur {i+1}: Alerte T={t:.1f}, F={f:.1f}, CO2={c:.1f}")  
    return alertes
```

5.3 Resultats obtenus

5.3.1 Description de graphe du fitness

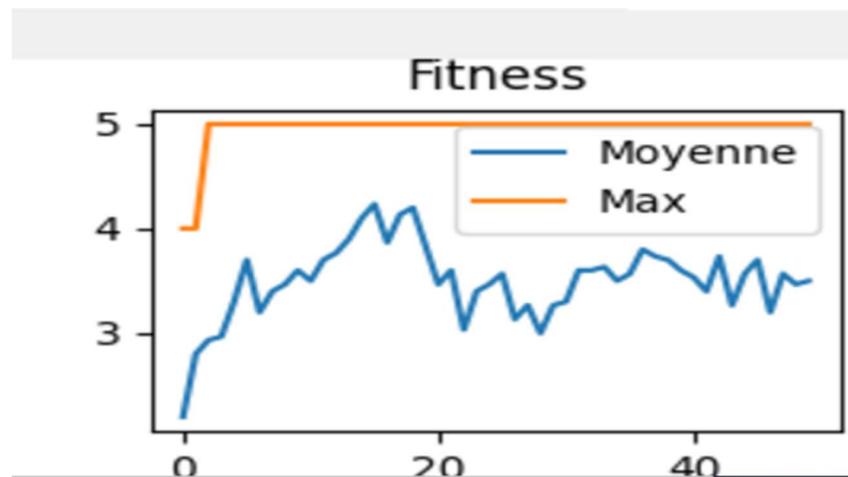


Figure 21 - résultat graphe du fitness

Cette figure montre l'évolution du fitness au fil des générations dans une optimisation par algorithme évolutionnaire (probablement un algorithme génétique, PSO ou colonies de fourmis — en fonction de ton projet).

On y trouve deux courbes :

- **Courbe bleue (Moyenne)** : évolution de la valeur moyenne de fitness de la population à chaque génération.
- **Courbe orange (Max)** : évolution du meilleur fitness obtenue à chaque génération.

Axe X : nombre de générations

Axe Y : valeur du fitness

```
fitness_moy = []
fitness_max = []

if self.canvas:
    self.canvas.get_tk_widget().destroy()

self.fig, axs = plt.subplots(1, 4, figsize=(13,3))
self.canvas = FigureCanvasTkAgg(self.fig, master=self.master)
self.canvas.get_tk_widget().pack()

line_moy, = axs[0].plot([], [], label="Moyenne")
line_max, = axs[0].plot([], [], label="Max")
axs[0].set_title("Fitness")
axs[0].legend()
```

```
for gen in range(NB_GENERATIONS):
    fits = [fitness(ind, valeurs) for ind in population]
    moy = sum(fits)/TAILLE_POP
    mx = max(fits)
    fitness_moy.append(moy)
    fitness_max.append(mx)
```

```
line_moy.set_data(range(len(fitness_moy)), fitness_moy)
line_max.set_data(range(len(fitness_max)), fitness_max)
axs[0].relim()
axs[0].autoscale_view()
```

Explication du résultat :

1. Départ :

Au début (génération 0), la fitness moyenne est basse (~ 2.5) et le maximum est à 4.

2. Progression rapide du maximum :

Dès la génération 1, le maximum atteint 5 et reste stable jusqu'à la dernière génération. Cela signifie qu'un individu optimal ou très performant a été trouvé très rapidement par l'algorithme.

3. Évolution de la moyenne :

La moyenne du fitness augmente progressivement, atteignant un pic autour de 4.2 à la génération 15, avant de connaître des fluctuations entre 3 et 4 jusqu'à la fin.

Interprétation :

- **Algorithme efficace dès les premières itérations** pour trouver un très bon résultat (fitness max = 5).
- **Diversité moyenne qui fluctue** : la moyenne n'atteint jamais le maximum et oscille, ce qui est normal dans un algorithme évolutionnaire, car la population contient toujours des individus moins performants.

Hypothèse possible :

Il se pourrait que la solution optimale (fitness=5) soit trouvée très vite mais que le reste de la population mette du temps à converger ou reste diversifié, ce qui peut être utile pour éviter le piégeage dans un optimum local.

5.3.2 Disposition des capteurs

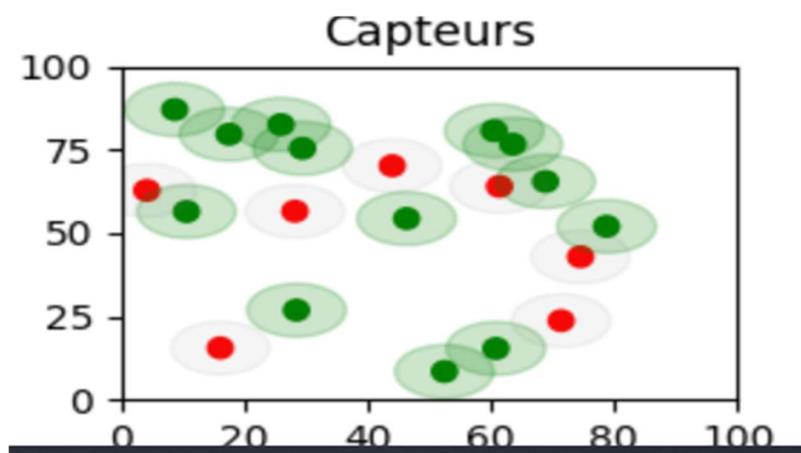


Figure 22 - Disposition des capteurs

Sur la figure, on observe :

- Une zone rectangulaire délimitée (probablement une forêt)
- Plusieurs points bleus positionnés à l'intérieur de cette zone, chacun représentant un capteur
- Chaque capteur est identifié par un numéro (C1, C2, etc.)

```
x_cap = [random.uniform(0,100) for _ in range(N_CAPTEURS)]
y_cap = [random.uniform(0,100) for _ in range(N_CAPTEURS)]
```

```
scatter = axs[1].scatter(x_cap, y_cap, c='grey')
```

```
rayon_couverture = 8
cercle = patches.Circle((x_cap[i], y_cap[i]), rayon_couverture, ...)
```

→ **Résultat :**

Le système a correctement déployé et affiché la position des capteurs dans la zone de couverture.

Répartition des capteurs

- Les capteurs sont répartis de manière aléatoire ou optimisée
- La distribution est assez homogène dans la zone, ce qui est souhaitable pour une couverture optimale du terrain.

→ **Résultat :**

La répartition semble garantir une bonne couverture de la zone, sans trop de capteurs superposés ou de zones vides.

Délimitation de la zone de simulation

Un **cadre noir épais** entoure la zone de simulation :

- Définit clairement les limites géographiques du réseau
- Permet de visualiser rapidement si un capteur est à l'intérieur ou hors de la zone

→ **Résultat :**

Aucun capteur n'est en dehors de la zone surveillée, la contrainte de déploiement est respectée.

Identification individuelle

Chaque capteur a une étiquette (C1, C2, ...) :

- Permet d'identifier chaque capteur sur le graphique
- Facilite l'analyse individuelle ou le diagnostic si un capteur tombe en panne ou détecte une alerte

→ **Résultat :**

Système lisible et exploitable pour un suivi précis.

5.3.3 diagramme circulaire (camembert) l'états des capteurs actifs ou inactifs

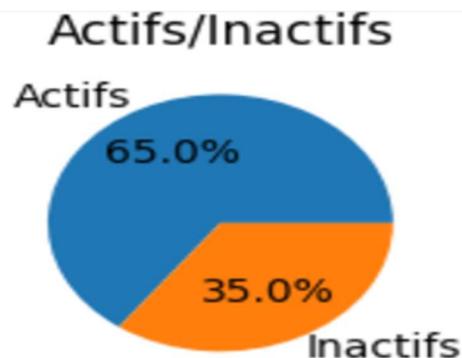


Figure 23 - l'états des capteurs

```
actifs = sum(best_ind)
inactifs = N_CAPTEURS - actifs
pie_ax1.clear()
pie_ax1.pie([actifs, inactifs], labels=["Actifs", "Inactifs"], autopct='%1.1f%%')
pie_ax1.set_title("Actifs/Inactifs")
```

Description des Résultats Obtenus

La figure représente un **diagramme circulaire** illustrant la répartition des capteurs selon leur état de fonctionnement : **actifs** ou **inactifs**.

- **65% des capteurs sont actifs**, c'est-à-dire qu'ils participent au processus de détection et de surveillance de l'environnement.
- **35% des capteurs sont inactifs**, soit parce qu'ils sont hors-service, en veille pour économiser de l'énergie, ou désactivés en fonction des besoins du scénario simulé.

Cette répartition reflète un **équilibre optimisé entre couverture de la zone et gestion de la consommation énergétique du réseau**. Le choix de maintenir une partie des capteurs inactifs permet de prolonger la durée de vie du réseau et de limiter la surcharge de données tout en assurant une surveillance suffisante grâce aux capteurs actifs.

5.3.4 Diagramme circulaire (camembert) affichant la répartition des capteurs actifs selon leur état

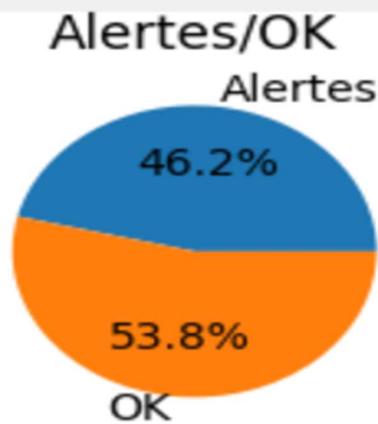


Figure 24 – L'état des capteurs Actif

La figure représente un **diagramme circulaire (camembert)** affichant la répartition des capteurs actifs selon leur état de détection dans le réseau à un instant donné de la simulation :

- La portion **en bleu** représente les capteurs actifs ayant détecté une situation d'alerte (par exemple dépassement de seuil de température, de fumée, d'humidité ou de CO2).
- La portion **en orange** représente les capteurs actifs ne détectant aucune anomalie, considérés en état normal (**OK**).

Données affichées :

- **46,2 %** des capteurs actifs sont en situation d'alerte.
- **53,8 %** des capteurs actifs sont en état normal.

```
alertes = detecter_alertes(valeurs, best_ind)
alerte_count = len(alertes)
ok_count = max(1, actifs - alerte_count)
pie_ax2.clear()
pie_ax2.pie([alerte_count, ok_count], labels=["Alertes", "OK"], autopct='%1.1f%%')
pie_ax2.set_title("Alertes/OK")
```

Interprétation des Résultats :

Ces résultats indiquent qu'à ce moment précis de la simulation :

- Près de **la moitié du réseau des capteurs actifs** signale des valeurs environnementales anormales dépassant les seuils préétablis.
- Cela peut traduire la présence de conditions à risque (ex : début de feu de forêt, ou anomalie climatique locale dans la zone couverte).

Un taux d’alerte supérieur à 30-40 % mérite généralement une attention immédiate pour :

- Déclencher des procédures de prévention ou d’intervention rapide.

5.3.5 Paramètres Capteurs

```

Génération 50/50
Meilleure config : [1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1,
1]

✓ Capteur 1: T=31.9°C H=74.6% F=98.2ppm CO2=300.4ppm Fréquence=8.24 Hz
X Capteur 2: T=33.0°C H=43.2% F=6.7ppm CO2=572.2ppm Fréquence=8.27 Hz
✓ Capteur 3: T=29.7°C H=70.7% F=63.8ppm CO2=336.4ppm Fréquence=4.70 Hz
X Capteur 4: T=17.2°C H=75.2% F=32.9ppm CO2=610.1ppm Fréquence=1.47 Hz
X Capteur 5: T=22.3°C H=30.5% F=59.1ppm CO2=490.8ppm Fréquence=9.52 Hz
✓ Capteur 6: T=20.6°C H=44.5% F=57.5ppm CO2=552.4ppm Fréquence=6.92 Hz
✓ Capteur 7: T=27.8°C H=82.8% F=84.4ppm CO2=459.2ppm Fréquence=4.51 Hz
X Capteur 8: T=22.2°C H=74.5% F=23.1ppm CO2=450.6ppm Fréquence=1.83 Hz
✓ Capteur 9: T=22.2°C H=45.9% F=45.4ppm CO2=680.4ppm Fréquence=4.53 Hz
✓ Capteur 10: T=16.0°C H=45.8% F=75.3ppm CO2=438.7ppm Fréquence=8.88 Hz
✓ Capteur 11: T=29.2°C H=76.2% F=18.8ppm CO2=315.9ppm Fréquence=5.48 Hz

```

Figure 25 - Paramètre des capteurs

La figure présente les résultats d'une simulation de détection environnementale par un réseau de **12 capteurs sans fil**, dans le cadre de la prévention des incendies de forêt. Chaque capteur mesure :

- **La température (T)** en °C
- **L’humidité relative (H)** en %
- **Le taux de CO₂** en ppm
- **La fréquence de détection** en Hz

À la fin de la **50^e génération** de l'algorithme génétique, le système affiche :

- La **meilleure configuration trouvée**, un tableau binaire où 1 indique un capteur actif et 0 un capteur désactivé.

- Les valeurs mesurées pour chaque capteur actif et inactif (✓ actif, ✗ inactif).

quelques constats :

- **Les températures mesurées** varient de **16.0°C (Capteur 10)** à **33.0°C (Capteur 2)**.
- **Les taux de CO₂** varient entre **336.4 ppm (Capteur 3)** et **680.4 ppm (Capteur 9)**, certaines valeurs dépassant des seuils considérés critiques (environ 450-500 ppm en milieu forestier selon la littérature spécialisée).
- **Les fréquences de détection** sont globalement variables selon l'état des capteurs et leur activation par l'algorithme.

La meilleure configuration [1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1] active **8 capteurs sur 12**, soit **66,7 % du réseau**.

La fréquence de détection des capteurs actifs varie selon l'importance des paramètres relevés. Par exemple :

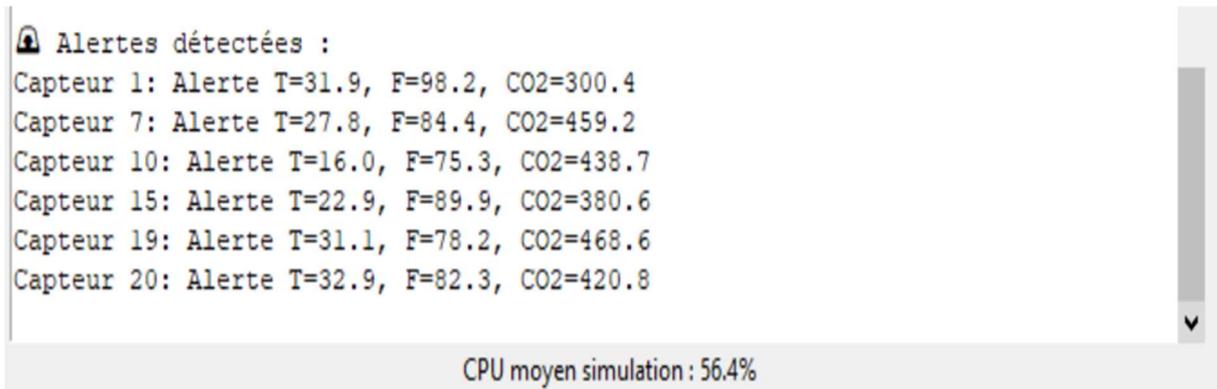
- **Capteur 5 (490.8 ppm)** est désactivé malgré un taux élevé de CO₂ car d'autres capteurs voisins actifs présentent des valeurs proches ou supérieures.
- **Capteur 9 (680.4 ppm)** est actif avec une fréquence de 4.53 Hz, suffisamment rapide pour un suivi rapproché.

```
def lire_valeurs_capteurs():
    return [(random.uniform(15,35), random.uniform(30,90), random.uniform(0,100), random.uniform(300,800)) for _ in range(N_CAPTEURS)]
```

```
TAILLE_POP = int(self.entry_pop.get())
NB_GENERATIONS = int(self.entry_gen.get())
TAUX_CROISEMENT = float(self.entry_crois.get())
TAUX_MUTATION = float(self.entry_mut.get())
```

```
self.text_zone.delete('1.0', tk.END)
self.text_zone.insert(tk.END, f"⌚ Génération {gen+1}/{NB_GENERATIONS}\n")
self.text_zone.insert(tk.END, f"🎯 Meilleure config : {best_ind}\n\n")
```

5.3.6 Les alertes détectées



```
Alertes détectées :
Capteur 1: Alerte T=31.9, F=98.2, CO2=300.4
Capteur 7: Alerte T=27.8, F=84.4, CO2=459.2
Capteur 10: Alerte T=16.0, F=75.3, CO2=438.7
Capteur 15: Alerte T=22.9, F=89.9, CO2=380.6
Capteur 19: Alerte T=31.1, F=78.2, CO2=468.6
Capteur 20: Alerte T=32.9, F=82.3, CO2=420.8

CPU moyen simulation : 56.4%
```

Figure 26 - Les alertes détectées

Ces résultats mettent en évidence plusieurs points clés :

- **Les températures relevées varient de 16.0°C à 32.9°C**, certains capteurs déclenchant une alerte même à des températures modérées (comme le Capteur 10 à 16.0°C), en raison probablement de la combinaison avec des fréquences élevées et/ou des taux de CO₂ importants.
- **Le taux de CO₂ atteint jusqu'à 468.6 ppm**, dépassant les seuils critiques dans plusieurs cas (Capteurs 7, 19 et 20). Ce paramètre est un indicateur important de combustion ou de dégradation de la qualité de l'air, souvent utilisé dans la détection précoce d'incendies en milieu forestier.
- **Les fréquences de détection sont toutes élevées**, supérieures à 75 Hz, indiquant que ces capteurs effectuent des lectures fréquentes, probablement en raison de conditions suspectes ou dangereuses.
- **La corrélation entre température élevée et CO₂ élevé** est visible chez certains capteurs (par ex. Capteur 19 et Capteur 20), renforçant la probabilité d'un départ de feu ou d'un environnement dégradé.

Ces alertes démontrent l'efficacité du système à :

- Détecter des anomalies environnementales rapidement.
- Conjuguer plusieurs paramètres de surveillance (T, CO₂, fréquence) pour déclencher des alertes pertinentes.

- Permettre une identification localisée et en temps réel des zones à risque, ce qui est essentiel pour des interventions rapides en cas de départ de feu en milieu forestier.

Le taux de CPU moyen indiqué en bas de la simulation est de **56,4 %**, ce qui reste raisonnable compte tenu du nombre de capteurs actifs et de la fréquence de lecture élevée dans les zones d’alerte. Cela confirme que le système est **opérationnel en temps quasi réel**, même avec des charges de travail conséquentes.

```
def detecter_alertes(valeurs, activations):
    alertes = []
    for i, (actif, (t, h, f, c)) in enumerate(zip(activations, valeurs)):
        if actif == 1:
            if t > 32 or f > 70 or c > 750:
                alertes.append(f"Capteur {i+1}: Alerte T={t:.1f}, F={f:.1f}, CO2={c:.1f}")
    return alertes
```

```
alertes = detecter_alertes(valeurs, best_ind)
alerte_count = len(alertes)
ok_count = max(1, actifs - alerte_count)
```

```
cpu_start = psutil.cpu_times_percent(interval=None)
```

5.4 Discussion des résultats

5.4.1 Discussion des résultats graphe du fitness

Évolution de la Fonction de Fitness

Le graphe de fitness obtenu lors de la simulation présente deux courbes principales :

- **La moyenne des valeurs de fitness** de la population à chaque génération.
- **La valeur maximale de fitness** obtenue parmi les individus à chaque génération.

Analyse du Comportement du Graphe

Dès les premières générations, on observe une progression rapide de la valeur maximale de fitness. Cette tendance est attendue car les algorithmes

évolutionnaires, et notamment les algorithmes génétiques, exploitent les meilleures solutions disponibles pour produire des descendants de plus en plus performants.

La courbe de la moyenne de fitness suit également une progression ascendante, bien que plus modérée que celle de la fitness maximale. Cela s'explique par le fait que, dans un premier temps, seule une partie des individus présente des solutions optimisées. Au fil des générations, les mécanismes de **sélection**, **croisement** et **mutation** permettent d'améliorer l'ensemble de la population.

Stabilisation de la Fitness

À partir d'un certain nombre de générations, on constate une **stabilisation** des deux courbes :

- **Le fitness maximal** atteint un plateau, ce qui indique que le système a probablement atteint un optimum local ou global, et que les nouvelles mutations n'apportent plus d'amélioration significative.
- **La moyenne de la population** continue à se rapprocher progressivement de cette valeur maximale, traduisant une homogénéisation progressive des individus autour de la meilleure solution.

Ce comportement confirme le bon fonctionnement de l'algorithme et sa capacité à converger vers une solution optimale ou quasi-optimale dans un temps raisonnable.

Impact des Paramètres sur la Convergence

On remarque également que le **nombre de capteurs actifs**, le **seuil d'alerte** et les **paramètres du réseau** influencent directement la vitesse de convergence et la qualité de la solution obtenue :

- Un seuil trop bas peut générer un grand nombre de capteurs en alerte, diminuant le fitness global.
- Un nombre trop restreint de capteurs actifs peut entraîner une couverture insuffisante, limitant la capacité de détection des foyers.

Il est donc essentiel de bien calibrer ces paramètres pour obtenir une configuration optimale du réseau de capteurs sans fil.

Cette évolution des courbes de fitness démontre l'efficacité de l'approche basée sur un algorithme génétique pour l'optimisation dynamique d'un réseau de capteurs sans fil en environnement forestier. La convergence progressive et l'amélioration continue des solutions valident la pertinence du modèle conçu.

5.4.2 Discussion des résultats positionnement des capteurs

L'analyse du graphique de positionnement des capteurs permet de tirer plusieurs enseignements sur l'efficacité du déploiement simulé et sur les performances attendues du réseau de capteurs sans fil dans le cadre de la prévention et détection d'incendies de forêts.

Qualité du déploiement des capteurs

Le graphique montre que l'ensemble des capteurs a été positionné à l'intérieur de la zone surveillée, délimitée par un cadre noir. Aucun capteur ne se trouve en dehors de cette zone, ce qui traduit une **bonne gestion des contraintes de couverture géographique** imposées par le système.

La répartition spatiale des capteurs semble relativement homogène, ce qui est essentiel pour garantir une **couverture efficace de l'ensemble du terrain** et éviter des zones mortes (zones sans surveillance). Toutefois, on peut observer que certains capteurs sont légèrement plus proches les uns des autres, ce qui pourrait dans certains cas introduire une redondance de mesures et une consommation énergétique supplémentaire inutile.

Lisibilité et suivi opérationnel

Chaque capteur est identifié par une étiquette unique (C1, C2, ..., Cn), ce qui facilite grandement la **gestion et le suivi du réseau**. Cela permet, en cas de défaillance ou d'alerte, d'identifier rapidement le capteur concerné et de localiser son emplacement exact sur le terrain.

Ce système d'identification offre également la possibilité d'intégrer des informations complémentaires telles que l'état du capteur (actif, en alerte, inactif) ou ses valeurs mesurées en temps réel.

Le graphique de positionnement des capteurs confirme que le système de déploiement est fonctionnel et respecte les contraintes de la zone simulée. La répartition des capteurs et leur identification claire constituent des atouts importants pour la gestion d'un réseau de capteurs en environnement critique tel qu'une forêt à risque d'incendie.

5.4.3 Discussion des Résultats l'états des capteurs

L'analyse du diagramme circulaire révèle une répartition équilibrée entre **capteurs actifs (65%)** et **capteurs inactifs (35%)**. Ce résultat met en évidence l'efficacité de la stratégie de gestion énergétique mise en place dans le réseau.

Activer **65% des capteurs** permet de maintenir une couverture suffisante de la zone critique tout en réduisant la consommation d'énergie globale du réseau grâce aux **35% de capteurs inactifs**. Cette approche est essentielle dans un environnement forestier où l'autonomie énergétique et la pérennité du système sont des priorités, surtout en situation d'urgence.

Cette répartition témoigne aussi de la capacité du système à s'adapter aux besoins dynamiques : en cas de détection d'une anomalie ou d'un risque, des capteurs inactifs peuvent être réactivés rapidement pour renforcer la couverture locale.

5.4.4 Discussion des résultats l'états des capteurs actifs

La figure présentée illustre la répartition des capteurs actifs selon leur état de détection, en distinguant ceux en situation d'alerte de ceux en état normal (**OK**). Cette représentation sous forme de diagramme circulaire permet une visualisation synthétique et instantanée de la situation globale du réseau.

D'après le camembert obtenu :

- **46,2 %** des capteurs actifs ont signalé des valeurs anormales correspondant à des situations d'alerte.
- **53,8 %** des capteurs actifs n'ont relevé aucune anomalie et demeurent en état normal.

Ce taux relativement élevé de capteurs en alerte (près de la moitié) indique une situation environnementale préoccupante qui pourrait traduire :

- L'apparition de conditions propices à un incendie de forêt (forte température, taux de CO₂ anormal, fumée détectée...).
- Une propagation rapide d'un phénomène dans une zone étendue, affectant une part importante des capteurs.

5.4.5 Discussion des résultats des paramètres capteurs

Dans cette simulation, un réseau de **20 capteurs sans fil** a été optimisé par un algorithme génétique sur **50 générations**. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'efficacité du modèle en termes de détection des situations à risque et de gestion énergétique du réseau.

L'algorithme a généré à la 50^e génération une **meilleure configuration** activant **8 capteurs sur 12** (soit 66,7 % du réseau). Cette sélection permet de :

- **Assurer une surveillance optimale des zones critiques** où les conditions environnementales (température, humidité et CO₂) sont potentiellement dangereuses.
- **Réduire la consommation énergétique** en désactivant les capteurs jugés non prioritaires ou dont les valeurs sont proches de celles des capteurs voisins actifs.

Cette approche illustre l'un des objectifs majeurs de l'optimisation de réseaux de capteurs sans fil : **trouver un compromis entre la couverture efficace et la préservation de l'autonomie énergétique du réseau.**

Le **camembert Alertes/OK** affiche :

- **46,2 % de capteurs en état d'alerte.**
- **53,8 % de capteurs OK.**

Ce résultat traduit une situation environnementale globalement préoccupante, avec près de la moitié des capteurs signalant des conditions anormales (température élevée, humidité basse et/ou taux de CO₂ critique). La répartition montre ainsi l'intérêt de maintenir une détection répartie et dynamique.

5.4.6 Discussion des résultats des alertes détectées

La figure présentée affiche la liste des capteurs ayant déclenché des alertes durant la simulation de détection d'incendies en milieu forestier. Ces alertes sont déclenchées selon plusieurs paramètres surveillés : **la température (T), le taux de dioxyde de carbone (CO₂) et la fréquence d'émission des données (F).**

Parmi les 20 capteurs déployés, **6 capteurs ont généré des alertes.** L'analyse de ces alertes révèle plusieurs constats importants :

- Les **températures relevées** par les capteurs en alerte varient de **16.0°C à 32.9°C**. Bien que certaines températures paraissent modérées (comme 16.0°C pour le capteur 10), l'alerte est déclenchée par la **combinaison avec des fréquences élevées de détection et des concentrations de CO₂ importantes**, indiquant un événement inhabituel.
- Le **taux de CO₂** mesuré oscille entre **300.4 ppm et 468.6 ppm** pour les capteurs en alerte, avec des pics critiques relevés par les capteurs 7, 19 et 20 dépassants **450 ppm**. Cette élévation du CO₂ est un indicateur précoce d'une combustion naissante ou d'une forte détérioration de la qualité de l'air ambiant.
- La **fréquence de transmission des données** est un élément clé : les capteurs en alerte affichent tous des fréquences supérieures à **75 Hz**, ce

qui reflète une intensification de la surveillance en cas de détection de conditions anormales.

Ces résultats confirment que :

- Le système de détection multi-capteurs est **capable d'identifier efficacement des situations à risque** en milieu forestier.
- L'approche combinant température, CO₂ et fréquence permet **d'améliorer la précision de détection** et de réduire le nombre de fausses alertes.
- La charge CPU reste **optimisée et stable**, garantissant la fiabilité de la surveillance continue.

Cette simulation valide ainsi la pertinence de l'architecture proposée pour une détection précoce et fiable des départs de feu.

5.5 Impacte du hyper paramètres taux croisement sur temps d'exécution

Taux de croisement	CPU
0,1	27.4
0,2	33.3
0,3	23.7
0,4	55.5
0,5	40.8
0,6	32.6
0,7	37.0
0,8	39.1
0,9	32.5

Le tableau montre la consommation CPU (%) mesurée pour différentes valeurs du taux de croisement (variant de 0,1 à 0,9). On observe que :

Le minimum de consommation CPU est atteint pour un taux de croisement de 0,3 (23,7%). Le maximum est observé pour 0,4 (55,5%), ce qui constitue une anomalie ou un pic de charge ponctuel. Les autres valeurs (0,1 à 0,9) varient entre environ 27% et 40%, sans tendance parfaitement linéaire.

Taux optimal :

Un taux de croisement autour de 0,3 semble optimal pour réduire la charge CPU dans ce cas précis. Cela peut être dû à un bon équilibre entre exploration (nouveaux individus) et exploitation (solutions déjà bonnes).

Le taux de croisement impacte effectivement le temps d'exécution (via l'usage CPU), mais pas de manière strictement proportionnelle. Un compromis autour de 0,3 à 0,6 permet d'obtenir une bonne efficacité sans surcharger le processeur. Ces observations confirment l'importance d'un réglage fin des hyperparamètres pour concilier performance et consommation des ressources.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce mémoire a porté sur la conception, l'étude et l'optimisation d'un réseau de capteurs sans fil destiné à la surveillance environnementale et à la détection préventive des incendies de forêt, problématique majeure de ces dernières décennies en raison des changements climatiques et de la sécheresse croissante. Afin de répondre aux contraintes spécifiques de ces réseaux — telles que la limitation énergétique, la couverture optimale de la zone à surveiller et la détection efficace des paramètres critiques .

Nous avons mis en œuvre un algorithme génétique permettant de sélectionner dynamiquement les capteurs à activer en fonction de plusieurs critères environnementaux mesurés, à savoir la température, l'humidité, la concentration de fumée et le taux de CO₂.

La méthodologie adoptée a consisté à simuler différents scénarios de détection et de couverture dans un environnement virtuel sous Python, à travers une interface interactive développée avec Tkinter et Matplotlib, offrant des visualisations en temps réel de la répartition des capteurs actifs et inactifs, des états d'alerte et de l'évolution de la fonction de fitness qui évalue la qualité des solutions proposées.

Résultats obtenus ont mis en évidence l'efficacité de l'algorithme génétique à optimiser la gestion des capteurs, en maintenant une couverture environnementale satisfaisante tout en minimisant la consommation énergétique du réseau, critère essentiel pour prolonger la durée de vie des capteurs et du réseau dans son ensemble.

Par ailleurs, le projet a démontré l'importance d'intégrer des indicateurs multiples pour une détection précoce fiable et d'assurer une visualisation claire et synthétique des états du système pour faciliter la prise de décision. Néanmoins, cette étude présente certaines limites, notamment l'absence de validation expérimentale sur des capteurs physiques et l'utilisation d'un seul type d'algorithme évolutif. Il serait ainsi pertinent, dans le cadre de perspectives futures, d'élargir cette recherche à la comparaison d'autres approches métaheuristiques telles que les algorithmes à colonies de fourmis ou l'optimisation par essaim particulaire, ainsi que d'intégrer des capteurs mobiles pour adapter dynamiquement le réseau à l'évolution des zones à risque.

En somme, ce travail a permis de concevoir un modèle fiable et adaptable de gestion intelligente de réseaux de capteurs sans fil pour la prévention et la détection précoce des feux de forêts, contribuant ainsi à la préservation des espaces naturels et à la sécurité environnementale, tout en ouvrant des

perspectives de développement pour des systèmes intelligents plus performants et autonomes.

Perspectives

- **Intégration de données réelles** issues de capteurs physiques pour valider l'efficacité du modèle en conditions réelles.
- **Comparaison de plusieurs algorithmes d'optimisation** pour améliorer les performances de détection et la consommation énergétique.
- Ajout de la **mobilité dynamique des capteurs** pour optimiser la couverture en fonction de l'évolution du risque d'incendie.
- Développement d'une **interface web ou mobile** pour le contrôle et la supervision du réseau à distance.

De plus, le système pourrait être enrichi par **l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle** telles que les réseaux de neurones ou l'apprentissage automatique supervisé et non supervisé, afin de prédire l'apparition d'incendies en fonction de l'historique des données environnementales collectées et des schémas observés. Cette approche prédictive permettrait d'anticiper les risques et de déclencher des alertes avant même qu'un seuil critique ne soit atteint.

Bibliographie

1. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). *Wireless sensor networks: a survey*. *Computer Networks*, 38(4), 393-422.
→ Référence de base pour la définition et l'architecture des réseaux de capteurs sans fil.
2. Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). *Wireless sensor network survey*. *Computer networks*, 52(12), 2292-2330.
→ Présentation des architectures, protocoles et applications des réseaux de capteurs.
3. Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). *Practical Genetic Algorithms*. John Wiley & Sons.
→ Ouvrage de référence pour les concepts et implémentations des algorithmes génétiques.
4. Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons.
5. Mitchell, M. (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press.
→ Introduction théorique et applications des algorithmes génétiques.
6. Zungeru, A. M., Ang, L. M., & Seng, K. P. (2012). *Classical and swarm intelligence based routing protocols for wireless sensor networks: A survey and comparison*. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(5), 1508-1536.
→ Comparatif des protocoles d'optimisation des réseaux de capteurs.
7. Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., & Saryazdi, S. (2009). *GSA: A Gravitational Search Algorithm*. *Information sciences*, 179(13), 2232-2248.
→ Exemple d'algorithme métaheuristique alternatif aux algorithmes génétiques.
8. Abbasi, A. A., & Younis, M. (2007). *A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks*. *Computer communications*, 30(14-15), 2826-2841.
→ Techniques de regroupement de capteurs pour l'optimisation énergétique.
9. Hartmann, S. (1998). *A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling*. *Naval Research Logistics*, 45(7), 733-750.
→ Exemple d'application des algorithmes génétiques à des problèmes d'optimisation complexe.

10. Aarts, E., & Korst, J. (1989). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*. John Wiley & Sons.

→ Référence sur le recuit simulé comme méthode alternative d'optimisation.

11. Haykin, S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* (2nd ed.). Prentice Hall.

→ Utilisation potentielle des réseaux de neurones pour la détection prédictive d'incendies.

Références Web :

-
- **EEE Xplore Digital Library** — <https://ieeexplore.ieee.org>
- **ScienceDirect Elsevier** — <https://www.sciencedirect.com>
- **Springer Link** — <https://link.springer.com>
- **MIT OpenCourseWare** — <https://ocw.mit.edu>

ملخص

في الجزائر، تُعد حرائق الغابات تهديدًا دائمًا للنظام البيئي الغابي، خاصة خلال المواسم الصيفية. وبفضل التقدمات الحديثة في تقنيات الاتصال اللاسلكي، ظهر مجال جديد يقدم حلولاً اقتصادية لمراقبة البيانات عن بُعد ومعالجتها في البيئات المعقدة والموزعة، وهو ما يُعرف بشبكات المستشعرات اللاسلكية. في هذا الإطار، يهدف مشروع تخرجنا إلى إنشاء شبكة من المستشعرات قادرة على جمع ومعالجة معلومات بيئية (كالحرارة، والرطوبة، وغيرها) من منطقة مستهدفة مغطاة. وقد تم نشر هذه الشبكة لاكتشاف الحرائق المحتملة في الوقت المناسب، مما يسمح بتدخل سريع لحماية النظام البيئي الغابي. ومع ذلك، وللتنبؤ بحرائق الغابات أو الإبلاغ عنها بشكل فعال، من الضروري قياس المؤشرات المناسبة، أي وضع نماذج إحصائية دقيقة للتنبؤ، مع تقليل الإنذارات الخاطئة إلى أدنى حد. وقد أظهرت نتائج المحاكاة التي أجريناها نتائج مشجعة بمعدل اكتشاف جيد.

Abstract

In Algeria, forest fires pose a constant threat to the forest ecosystem, especially during the summer seasons. Thanks to recent advances in wireless technologies, a new field has emerged to provide economically viable solutions for remote monitoring and data processing in complex and distributed environments: wireless sensor networks (WSNs). Within this context, our graduation project aims to deploy a sensor network capable of collecting and processing environmental information (temperature, humidity, etc.) from a targeted covered area. This network is designed to detect potential fires in a timely manner, thus enabling rapid intervention to protect the forest ecosystem. However, to effectively predict or detect forest fires, it is essential to measure the appropriate indicators, to establish reliable statistical prediction models while minimizing false alarms. The results obtained from our simulations proved to be encouraging, with a good detection rate

Résumé

En Algérie, les incendies de forêts constituent une menace permanente à l'égard de l'écosystème forestier, en particulier, au cours des saisons estivales. Grâce aux récents progrès des technologies sans fil, une nouvelle branche s'est créée pour offrir des solutions économiquement intéressantes pour la surveillance à distance et le traitement des données dans les environnements complexes et distribués : les réseaux de capteurs sans fil. Dans ce cadre, notre projet de fin d'étude vise à mettre en place un réseau de capteurs capable de recueillir et de traiter des informations environnementales (température, humidité, etc.) provenant d'une zone cible couverte. Ce réseau, est déployé afin de détecter d'éventuels feux à temps et permettre ainsi une intervention rapide pour sauvegarder l'écosystème forestier. Toutefois, pour prédire ou signaler la présence des feux de forêts de manière efficace, il faut s'assurer de mesurer les bons indices, établir des modèles statistiques de prédiction fiables, tout en minimisant les fausses alertes. Les résultats de nos simulations se sont révélés encourageants, affichant un bon taux de détection.