

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A/MIRA de Béjaia Faculté des Sciences exactes



Département de Recherche Opérationnelle

*MEMOIRE DE FIN DE CYCLE*

en vue de l'obtention du Diplôme de Master  
En Recherche Opérationnelle

Option *Modélisation Mathématiques et Évaluation de Performances des Réseaux*

## Thème



---

**Évaluation de performances d'une chaîne de production automatisée par un réseau de capteurs sans fil. Cas de l'entreprise CO.GB *Labelle*.**

---

Présenté par :

- M<sup>elle</sup> ISSAD Kahina

- M<sup>elle</sup> AFIA Ouarda

Devant le jury composé de :

Présidente	M <sup>me</sup> K. BOUCHAMA	MAA	U. A/Mira, Béjéja
Rapporteur	M <sup>r</sup> D. AISSANI	Professeur	U. A/Mira, Béjéja
Co-rapporteur	M <sup>r</sup> M. ATMANI	MCB	U. A/Mira, Béjéja
Examinatrice	M <sup>me</sup> L. BACHIRI	MCB	U. A/Mira, Béjéja
Examineur	M <sup>r</sup> M. BOUNOUNI	MCB	U. A/Mira, Béjéja
Invité	M <sup>r</sup> S. ALLAOUA	Chef de CDH	CO.GB <i>Labelle</i> Bejaia

Béjaia, 2016.

---

# Table des matières

---

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>4</b>
<b>1 Présentation de l'organisme d'accueil</b>	<b>6</b>
1.1 Introduction . . . . .	6
1.2 Historique et évolution de la CO.GB <i>Labelle</i> dans le temps . . . . .	6
1.3 Zone géographique de la CO.GB <i>Labelle</i> . . . . .	8
1.4 Objet Social . . . . .	9
1.5 Missions et activités . . . . .	9
1.5.1 Mission de l'entreprise . . . . .	9
1.5.2 Activités de l'entreprise . . . . .	10
1.6 Potentiel de production de l'entreprise . . . . .	10
1.7 Équipements de productions . . . . .	11
1.8 Organigramme général de l'entreprise . . . . .	11
1.9 Présentation générale de l'unité de conditionnement d'huile . . . . .	12
1.9.1 Lignes de production . . . . .	13
1.9.2 Description des différentes machines utilisées dans la production . . . . .	14
1.10 La Recherche Opérationnelle à CO.GB <i>Labelle</i> . . . . .	15
1.11 Problématique . . . . .	16
1.12 Contexte de travail . . . . .	16

1.13	Conclusion . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)</b>	<b>18</b>
2.1	Introduction . . . . .	18
2.2	Définition d'un capteur . . . . .	19
2.3	Architecture physique d'un capteur . . . . .	19
2.4	Définition d'un réseau de capteurs sans fil . . . . .	21
2.5	Architecture de communication d'un RCSF . . . . .	21
2.6	Composantes d'un réseau de capteurs sans fil . . . . .	22
2.7	Contraintes des réseaux de capteur sans fil . . . . .	22
2.8	Application des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	23
2.9	Mécanismes de communication dans les RCSFs . . . . .	25
2.9.1	Réseaux ZigBee . . . . .	26
2.9.2	Fonctionnalités ZigBee . . . . .	27
2.9.3	Standard IEEE 802.15.4 . . . . .	27
2.9.3.1	Composantes du standard IEEE 802.15.4 . . . . .	28
2.9.3.2	Topologies du standard IEEE 802.15.4 . . . . .	28
2.9.4	Couche MAC (Medium Access Control) . . . . .	29
2.9.4.1	Notion de la supertrame . . . . .	30
2.9.4.2	Structure de la supertrame . . . . .	30
2.10	Progrès du coté des entreprises . . . . .	31
2.11	Conclusion . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Outils de modélisation et d'évaluation de performances des réseaux informatiques</b>	<b>33</b>
3.1	Introduction . . . . .	33
3.2	Théorie des graphes . . . . .	34
3.2.1	Conceptes de base . . . . .	34
3.2.1.1	Graphes non orientés . . . . .	34
3.2.1.2	Graphes orientés . . . . .	35
3.2.1.3	Graphe partiel . . . . .	35
3.2.1.4	Sous graphe . . . . .	36
3.2.2	Quelques types de graphes . . . . .	36

3.2.2.1	Graphe simple . . . . .	36
3.2.2.2	Graphe complet . . . . .	36
3.2.2.3	Graphe connexe . . . . .	36
3.2.2.4	Graphe biparti . . . . .	37
3.2.2.5	Arbre . . . . .	37
3.2.3	Matrice d'adjacences : . . . . .	38
3.2.4	Graphe de conflits induit . . . . .	39
3.2.5	Coloriage des graphes . . . . .	40
3.2.5.1	Algorithmes de coloriage standards . . . . .	41
3.3	Réseaux de Petri . . . . .	41
3.3.1	Notion de base (Condition-Place et évènement-Transition) . . . . .	42
3.3.2	Définitions . . . . .	42
3.3.3	Classe de Réseaux de Petri . . . . .	43
3.3.3.1	Réseaux de Petri généralisés . . . . .	44
3.3.3.2	Réseaux de Petri temporel . . . . .	44
3.3.3.3	Réseaux de Petri temporisés . . . . .	44
3.4	Chaines de Markov . . . . .	45
3.4.1	Chaines de Markov à temps discret . . . . .	45
3.4.2	Chaines de Markov à temps continu . . . . .	46
3.5	Files d'attentes . . . . .	46
3.5.1	Caractéristiques d'un modèle de files d'attente . . . . .	48
3.6	Conclusion . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Modélisation et évaluation de la chaîne de production par un réseau de capteur sans fil</b> . . . . .	<b>50</b>
4.1	Introduction . . . . .	50
4.2	Problème de contrôle . . . . .	51
4.3	Modélisation de la chaîne de production . . . . .	51
4.3.1	Objectif de la modélisation . . . . .	51
4.3.2	Description de la chaîne de production . . . . .	51
4.3.3	Emplacement des capteurs dans les lignes de conditionnement . . . . .	52
4.3.4	Choix de l'outil de modélisation . . . . .	53

4.4	Description du réseau et le graphe de conflits induit . . . . .	53
4.4.1	Construction du graphe $G$ à base des RCSFs . . . . .	53
4.4.2	Modélisation avec les graphes de conflits . . . . .	55
4.4.2.1	Description des cas de conflit utilisé dans le problème étudié	55
4.4.2.2	Algorithme de recherche de conflit utilisé pour le problème étudié . . . . .	56
4.4.3	Représentation graphique du graphe de conflit $GC$ . . . . .	56
4.4.4	Représentation matricielle du graphe de conflit . . . . .	58
4.5	Algorithmes d'ordonnancement d'accès sans conflits . . . . .	59
4.5.1	Description de l'algorithme d'ordonnancement IPSP . . . . .	61
4.5.2	Application de notre algorithme d'ordonnancement . . . . .	61
4.5.3	Allocation des slots selon l'algorithme IPSP (InterPAN Scheduling Protocole) . . . . .	63
4.6	Algorithme de coloration standard . . . . .	64
4.6.1	Application de l'algorithme de coloration standard de Welsh et Powell	64
4.6.2	Allocation de slots selon l'algorithme standard . . . . .	67
4.7	Comparaison des résultats . . . . .	67
4.8	Evaluation des performances d'IPSP . . . . .	68
4.9	Résultats de simulation . . . . .	68
4.10	Conclusion . . . . .	71
 <b>Conclusion et perspectives</b>		 <b>72</b>
 <b>Bibliographie</b>		 <b>75</b>

---

# Liste des figures

---

1.1	Organigramme de l'évolution de la CO.GB <i>Labelle</i> dans le temps . . . . .	8
1.2	Localisation de CO.GB <i>Labelle</i> prise par Google Earth . . . . .	9
1.3	Organigramme de la CO.GB <i>Labelle</i> . . . . .	12
2.1	Exemple d'un capteur. . . . .	19
2.2	Architecture d'un capteur . . . . .	20
2.3	Architecture de communication d'un RCSF . . . . .	21
2.4	Différents domaines d'application des RCSFs. . . . .	25
2.5	Zigbee/IEEE 802.15.4 et le système OSI . . . . .	26
2.6	Topologie en étoile. . . . .	29
2.7	Topologie point à point. . . . .	29
2.8	Structure de la supertrame. . . . .	31
3.1	Graphe non orienté . . . . .	34
3.2	Graphe orienté . . . . .	35
3.3	Graphe partiel de G . . . . .	35
3.4	Sous graphe de G . . . . .	36
3.5	Arbre . . . . .	37
3.6	Forêt . . . . .	38
3.7	Cinq cas de conflit dans les réseaux sans fil . . . . .	40
3.8	Composantes d'un réseau de Petri . . . . .	42
3.9	Schéma d'une file d'attente . . . . .	47
4.1	Schéma de la chaîne de production . . . . .	52
4.2	Schéma générale de la chaîne de production après l'installation des capteurs	53

---

4.3	Graphe G . . . . .	54
4.4	Les trois cas de conflit utilisés . . . . .	55
4.5	Graphe de conflit GC . . . . .	57
4.6	Matrice d'adjacence M . . . . .	58
4.7	Graphe de conflit coloré avec l'algorithme d'ordonnancement . . . . .	62
4.8	Graphe G ordonnancé avec l'algorithme d'ordonnancement IPSP . . . . .	63
4.9	Trame d'ordannancement de IPSP . . . . .	64
4.10	Résultat de l'application de l'algorithme standard . . . . .	64
4.11	Graphe de conflit coloré avec l'algorithme standard . . . . .	66
4.12	Graphe G coloré avec l'algorithme standard . . . . .	67
4.13	Trame avec l'algorithme standard . . . . .	67
4.14	Comparaison du nombre de slot entre IPSP, Welsh et TDMA . . . . .	69
4.15	Comparaison de temps d'enregistrement des pannes par IPSP, Welsh et TDMA . . . . .	70
4.16	Schéma générale de la chaîne de production après l'installation des capteurs	78

---

# Liste des tableaux

---

1.1	Différentes lignes de production. . . . .	13
4.1	Description des variables . . . . .	56
4.2	Description des variables . . . . .	59

ADC	: Analysing to Digital Converter
AF	: Application Framework
APS	: Application Support
CCGB	: Complexe Corps Gras Bejaia
CDMA	: Code Division Multiple Access
COGB	: COrps Gras Bejaia
CSMA-CA	: Carrier Sense Multiple Acces with Collision Avoidance
CSMA-CD	: Carrier Sense Multiple Acces with Collision Detection
DG	:Directeur Général
ENASUCRE	: Entreprise Nationale du Sucre
ENCG	: Entreprise Nationale des Corps Gras
ENJUC	: Entreprise Nationale des Jus et des Conserves
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
FFD	: Full Function Device
GPS	: Global Positioning System
GTS	: Guaranteed Time Slot
IEEE	: Institut of Electrical and Electronics Engineers
IPSP	: InterPAN Scheduling Protocol
LR-WPAN	: Low-Rate Wireless Personal Area Networks
MAC	: Medium Access Control
NLDE	: Network Layer Data Entity
NLME	: Network Layer Management Entity
OSI	: Open System Interconnection
PAN	: Personel Area Network
PEHD	: PolyEthylène Haute Densité
PET	: PolyEthylène Téréphtalate
PLMO	: Problème Linéaire Multi Objectif
RDP	: Réseau De Petri
RF	: Remaining Frame
RFD	: Reduced Fonction Device

RCSF	: Réseaux de Capteurs Sans Fil
SIAN	: Société Industrielle de l'Afrique du Nord
SNCG	: Société Nationale des Corps Gras
SOGEDIA	: Société de Gestion et de développement des Industries Alimentaires
SPA	: Société Par Action
TDMA	: Time Division Multiple Access
TS	: Time Slot
UP	: Unité de Production
WPAN	: Wireless Personal Area Network
WLAN	: Wireless Local Area Network
WSN	: Wireless Sensor Network
ZDO	: Zig-Bee Device Objects

# Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant qui nous a donné santé, force, et le savoir afin d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements vont en particulier au Pr D. AISSANI, notre promoteur, pour avoir accordé un grand intérêt à notre travail, qu'il trouve ici notre considération. Ainsi que M<sup>r</sup> M. ATMANI, notre co-promoteur pour son encouragement et sa disponibilité et son suivi attentif pour la réalisation de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier tout le personnel de l'unité de production d'huile de l'entreprise CO.GB labelle, pour leur disponibilité tout au long de notre stage, en particulier M<sup>r</sup> A. SAADI chef de conditionnement des huiles notre encadreur et le directeur générale M<sup>r</sup> N. YAHIAOUI.

Nous remercions le président du jury pour l'honneur qu'il nous fait d'accepter de présider le jury. Nous remercions également les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

Un grand merci pour nos familles, nos chères amis qui ont toujours été présents et fidèles. Enfin, nous remercions tous ceux et toutes celles qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*À ma très chère mère ;*

*À mes frères, mes soeurs, mes neveux et mes nièces ;*

*À tous les membres de ma famille ;*

*À mes cher amis(es) sans exclusive ;*

*À la mémoire de mon très cher père ;*

*À ma binôme Ouarda.*

Kahina

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*À la mémoire de ma grand-mère et grand père ;*

*À ma très chère mère et cher père ;*

*À mes frères et sœurs : Imene, Ahcen, Lidia, Hadi et Naima ;*

*À tout mes oncles et tantes, ainsi que leurs familles ;*

*À Hassina, Kahina, Lina, Kenza, Farida, Safia ;*

*À toi Kahina.*

Ouarda

---

# Introduction générale

---

Dans la vie courante, l'utilisation des capteurs sans fil est de plus en plus demandée pour la supervision et la sécurité. Les industries et les entreprises donnent alors un grand intérêt aux réseaux de capteurs sans fil qui ont été dans un premier temps des réseaux filaires qui utilisent des fibres optiques et des câbles pour la transmission de l'information.

Les RCSFs, sont destinés à relever des informations dans des environnements hostiles auxquels l'homme n'a pas toujours accès. C'est pourquoi on considère qu'une fois qu'ils sont déployés, les capteurs sont autonomes. L'émergence des RCSFs montre leurs rôle important qui couvre de nombreux domaines d'application.

Modéliser et évaluer les performance des RCSFs fait appelle à des outils de modélisation mathématique (coloriage de graphes, graphes de conflits, chaînes de Markov, réseaux de Pétri, modèles des files d'attentes, etc.) pour étudier le comportement des capteurs et des RCSFs.

Dans le cadre de ce mémoire, notre travail vise principalement à installer un réseau de capteurs sans fil pour le suivi automatique de la ligne de conditionnement de l'huile au niveau de l'entreprise CO.GB *Labelle*, Bejaia, et pour cela nous allons proposer de mettre en place plusieurs PAN (Personal Area Network). Ce type d'architecture est prévu par le standard IEEE 802.15.4e dédié aux entreprises. Le problème majeur est de synchroniser

la communication parallèle entre les PANs. Nous allons modéliser ce réseau par un graphe simple, puis par un graphe de conflits. Par la suite, nous allons proposer un algorithme appelé IPSP (Inter PAN Scheduling Protocol) de coloriage de graphe en tenant compte des spécificités des réseaux de capteur. Le but à atteindre est de trouver un nombre de slots (GTS : Guaranteed Time Slot) de communication minimal et sans risque d'interférence.

Notre mémoire est composée d'une introduction générale, de quatre chapitres, d'une conclusion générale et d'une liste de références bibliographiques. Le premier chapitre, est consacré à la présentation générale de l'entreprise d'accueil, CO.GB *Labelle*, et notre problématique. Dans le deuxième chapitre nous décrivons les RCSFs, Nous passons par la suite à la présentation du mécanisme de communication en détaillant l'alliance Zigbee, le standard IEEE 802.15.4, et le protocole slotted CSMA-CA qui gère les accès au médium de communication dans les RCSFs. Le troisième chapitre, donne un bref aperçu de quelques outils mathématiques utilisés pour la modélisation et l'évaluation des performances des réseaux sans fil. Dans le dernier chapitre, nous proposerons notre modèle d'ordonnement ainsi que l'heuristique développée et appliqué sur la chaîne de production après l'avoir modéliser par la théorie des graphes. Nous clôturons le mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous exposons quelques perspectives.

# Chapitre 1

---

## Présentation de l'organisme d'accueil

---

### 1.1 Introduction

CO.GB *Labelle* est un complexe d'industrie agroalimentaire spécialisé dans le raffinage des huiles, qui a pour mission principale de développer la production et assurer la qualité de conditionnement.

La première partie de ce chapitre, nous présente l'entreprise CO.GB *Labelle*, ses missions et ses activités, ainsi que son organisation. La deuxième partie, nous donne une présentation générale de l'unité de conditionnement des huiles. Dans la troisième partie, nous citerons quelques problèmes de la recherche opérationnelle traités au niveau de cette entreprise ainsi que notre problématique.

### 1.2 Historique et évolution de la CO.GB *Labelle* dans le temps

Les travaux de construction ont débuté au début du 20ème siècle. Ces travaux ont été réalisés par la société industrielle de l'Afrique du nord (SIAN), son rôle consistait en extraction de l'huile d'olive et la fabrication de savon.

En 1940, la société a commencé à produire ses premiers savons de première qualité et le raffinage d'huile de colza et de tournesol, mais sa production a dû être arrêtée à cause de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, mais vite elle reprend son activité après la fin de guerre mondial.

En 1953, l'entreprise s'est mise à la fabrication du savon de ménage " mon savon ". Quelques années plus tard, cette entreprise a fait l'objet d'une nationalisation et ce en 1968 et rattachée à la SNCG (société nationale des corps gras).

L'année 1973 a vu la naissance de la SOGEDIA (société de gestion et de développement des industries alimentaires). Puis elle a été transformée en 1982 ce qui a donné naissance à trois entreprises à savoir :

- **ENCG** (entreprise nationale des corps gras) ;
- **ENJUC** (entreprise nationale des jus et des conserves) ;
- **ENASUCRE** (entreprise nationale du sucre) .

En 1998, l'entreprise mère ENCG est devenue le groupe ENCG composé de cinq filiales réparties sur le territoire national comme suit : Bejaia, Alger, Maghnia, Oran et Annaba.

La CO.GB Bejaia est entrée officiellement en partenariat avec l'entreprise *Labelle* cette dernière est une SPA avec un capital de 1.000.000DA le 14 Mai 2006 avec une répartition du capital comme suit : 70% pour *Labelle* et 30% pour le groupe ENCG.

Le capital social est partagé entre les actionnaires comme suit :

- **SARL AGRO ALIMENTAIRE LABELLE** : 700 000 000 DA représentant 70 000 actions d'une valeur nominale de 10.000DA chacune.
- **GROUPE ENCG** : 300.000.000 représentant 30.000 action d'une valeur nominale de 10.000DA chacune.
- **LE RESTE** est répartie en quatre actions de 10.000DA chacune d'elle est détenue par un actionnaire.

Organigramme de l'évolution de la CO.GB *Labelle* (voir la figure 1.1)

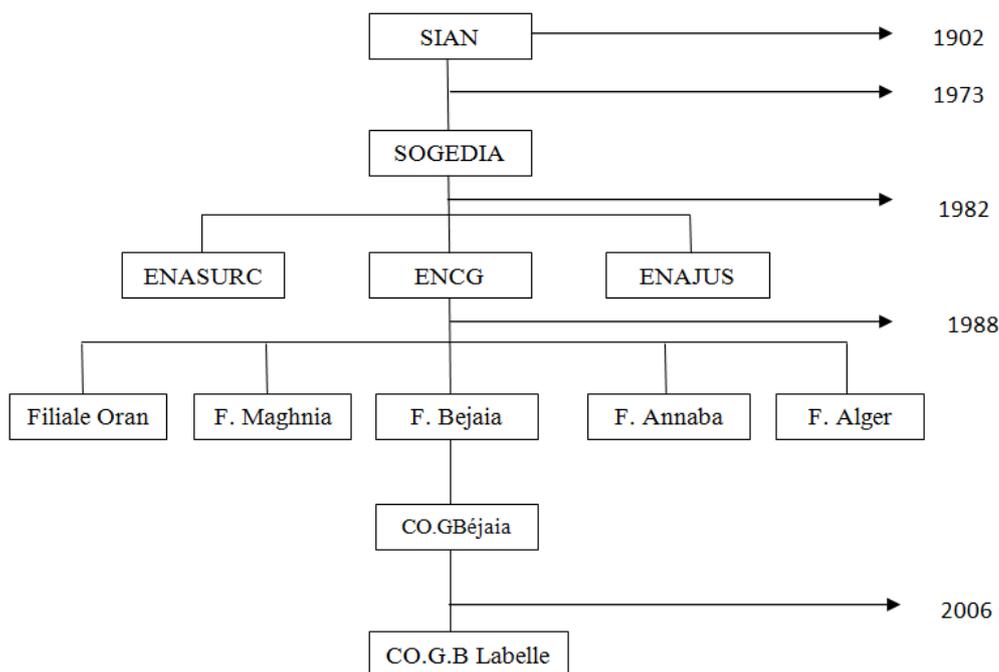


FIG. 1.1 – Organigramme de l'évolution de la CO.GB *Labelle* dans le temps

### 1.3 Zone géographique de la CO.GB *Labelle*

La société CO.GB *Labelle* se situe au niveau de la willaya de Bejaia, cette dernière est implanté près des quatre chemins de Bejaia, elle se trouve a proximité du port et la gare ferroviaire (voir la figure 1.2)et de même tout près de la route national N°26 qui mène vers différentes destinations et seulement à quelque minutes de l'aéroport de Bejaia ce qui constitue son emplacement stratégique.



FIG. 1.2 – Localisation de CO.GB *Labelle* prise par Google Earth

## 1.4 Objet Social

- Raffinage, conditionnement, commercialisation et ventes d'huile végétale ;
- Fabrication de savon de ménage, de toilette et de la glycine, commercialisation et ventes ;
- Fabrication de margarines, shortenings, commercialisation et ventes ;
- Fabrication de produits dérivés d'huile, commercialisation et ventes.

## 1.5 Missions et activités

### 1.5.1 Mission de l'entreprise

Les principales missions de la CO.GB *Labelle* sont :

- Elaborer et réaliser des plans annuels de production et de vente ;
- Assurer les ventes des produits sur le marché national ou l'exploitation dans le cadre des surplus de production ;
- Procéder à des études de projet pour répondre aux besoins de la demande national ;
- Organiser et développer des structures de maintenance permettant d'optimiser les

- performances de l'appareil de production ;
- Assister les unités de production pour assurer une politique uniforme en matières : production, distribution, maîtrise des couts.
  - Mettre en place ou développement un système de gestion en vue de satisfaire les besoins nationaux et maintenir en permanence des stockes stratégique tant en matières produites ;
  - Mettre en place les vois et les moyens en vue d'une assimilation progressive de la technologie et de son activité ;
  - La satisfaction des besoins des consommateurs en matière d'huile alimentaire, de savon, de margarine et d'autres dérivées des corps gras ;
  - Leur métier est la transformation des matières d'origines animales et végétale en vue de la fabrication de produit de grand consommation et de produits destinés à l'industrie.

### 1.5.2 Activités de l'entreprise

- Fabrication de l'huile végétale ;
- Fabrication de margarine de table, de feuilletage et pâtisserie ;
- Fabrication de produits végétale aromatisés ;
- Fabrication de savon de ménage et de toilette ;
- Fabrication de graisse végétale à usage industriel, de glycérine, d'acides gras dessillés et du savon industriel.

## 1.6 Potentiel de production de l'entreprise

- Raffinage d'huile : 530Tonnes /j ;
- Production savon de ménage : 150 Tonnes/ j ;
- Production savon de toilette 10 Tonnes/ j ;
- Production Glycérine : 50 Tonnes / j ;
- Production Acides Gras Distillés : 20 Tonnes / j ;
- Production Margarines : 80 Tonnes/ j .

## 1.7 Équipements de productions

La société CO.GB *Labelle* dispose des équipements suivants :

- Raffinage d'huile alimentaire ;
- Margarinerie ;
- Chaufferie ;
- Unité de conditionnement des huiles et savons ;
- Savonnerie de ménage et de toilette ;
- Distillerie des acides gras ;
- Station épuration des eaux usées ;
- Glycerinerie.

## 1.8 Organigramme général de l'entreprise

Tous les départements et services dépend d'une seule personne qu'est le directeur général (DG) qui gère l'entreprise et prend les décisions stratégiques. Ce lien est représenté par l'organigramme dans la figure 1.3 suivante :

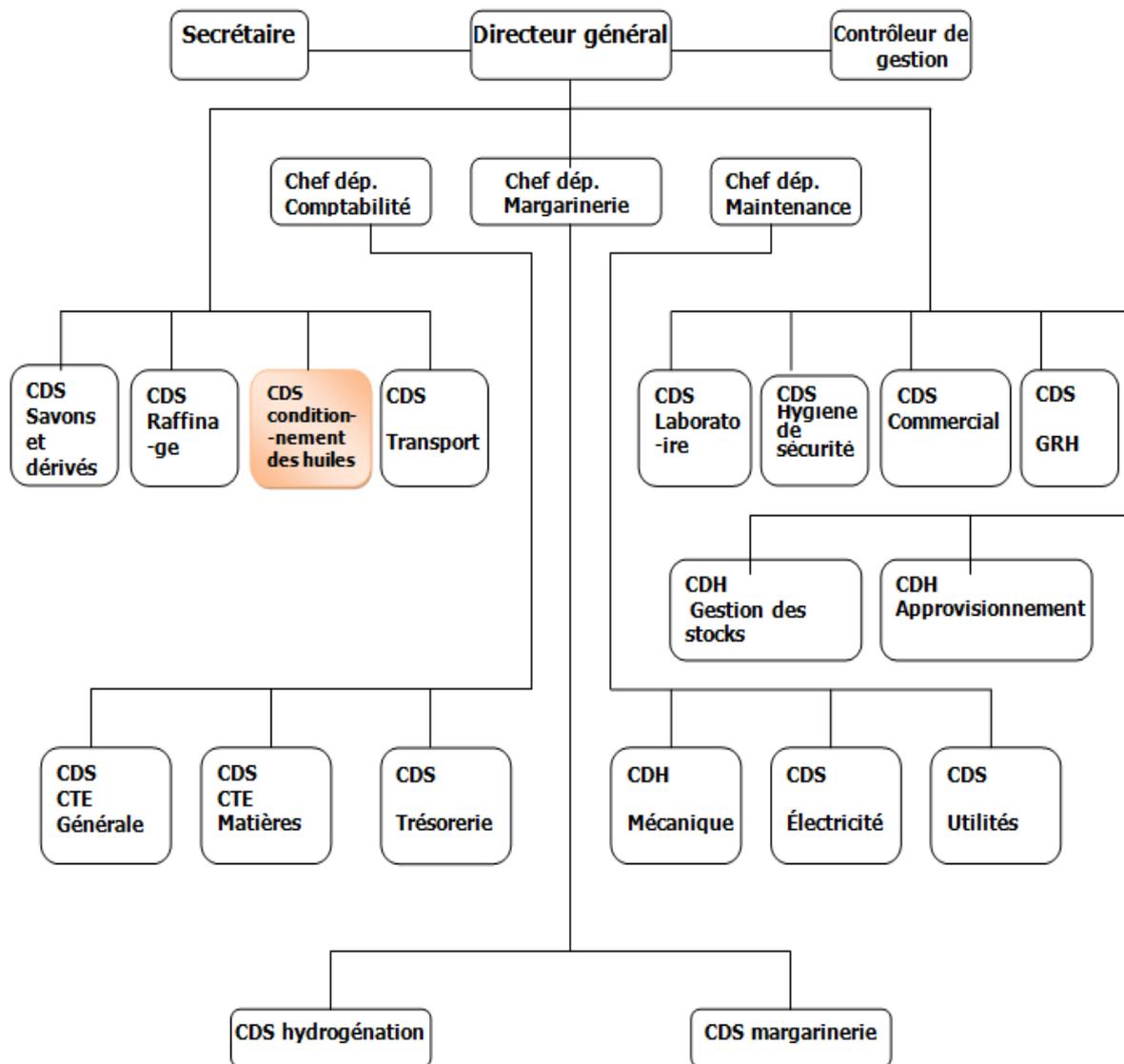


FIG. 1.3 – Organigramme de la CO.GB Labelle

## 1.9 Présentation générale de l'unité de conditionnement d'huile

La description de l'unité de conditionnement d'huile a pour but de comprendre le parcours de la bouteille de la préforme jusqu'à la banderoleuse en passant par la remplisseuse pour définir la relation existante entre les lignes et la gestion des bacs.

### 1.9.1 Lignes de production

L'unité de conditionnement d'huile de CO.GB *Labelle* est constituée actuellement de cinq lignes de production ; deux lignes pour la production des bouteilles PEHD dont une pour 5 litres et l'autre pour 2 litres, et trois lignes pour les bouteilles PET, dont la première ligne pour la production des bouteilles de 5 litres et la deuxième pour des bouteilles de 2 litres et la troisième pour 1 litre.

La matière utilisée pour la fabrication des bouteilles (5L, 2L, 1L) PET, est la préforme PET. importée qui a une structure de tube.

La matière utilisée pour La fabrication de (5L,2L) PEHD consiste à mélanger le PEHD, les déchets broyés (résidus de bouteilles) et le colorant dans un mélangeur /broyeur selon la proportion suivantes : 70% de PEHD + 30% du broyé + 1% de colorant, le mélange est chauffé à une température de 170°C pour donner le plastique fondu sous forme d'une gaine.

Les différentes lignes sont regroupées dans le tableau 1.1

	<i>1LPET</i>	<i>2LPET</i>	<i>5LPET</i>	<i>2LPEHD</i>	<i>5LPEHD</i>
<i>Souffleuse</i>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>				
<i>Remplisseuse</i>	<input type="checkbox"/>				
<i>Etiqueteuse</i>	<input type="checkbox"/>				
<i>Dateur</i>	<input type="checkbox"/>				
<i>Fardeuse</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	/	/
<i>Encartonneuse</i>	<input type="checkbox"/>	/	/	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Palettiseur</i>	<input type="checkbox"/>				
<i>Banderoleuse</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	/	/

TAB. 1.1 – Différentes lignes de production.

## 1.9.2 Description des différentes machines utilisées dans la production

- **Souffleuses** : les souffleuses sont des machines destinées à la fabrication des bouteilles à partir des préformes pour les bouteilles PET et de la gaine en plastique pour celles de PEHD.

Les souffleuses sont constituées de quatre parties principales :

- Partie d'alimentation des préformes/gaine en plastique.
  - Partie du four linéaire pour le préchauffage .
  - Partie pour le soufflage .
  - Partie de sortie des bouteilles.
- **Convoyeur à air rafale** : les convoyeurs air rafales sont des dispositifs destinés au transport des petites bouteilles en PET vides (un ou deux litres) de la souffleuse jusqu'à la soutireuse garantissant un air propre (remplisseuse); le transport est assuré par un soufflage d'air produit par les colonnes de ventilation équipées par des filtres.
  - **Remplisseuse** : les remplisseuses sont les unités chargées du remplissage des bouteilles du produit fini (l'huile) dont la vitesse de remplissage peut varier. La remplisseuse est constituée essentiellement de la cuve qui est remplie d'huile à partir des bacs journaliers par les pompes de souritage.
  - **Bouchonneuse** : la bouchonneuse se trouve encastrée dans la remplisseuse pour permettre aux bouteilles juste à la fin de leur remplissage, d'éviter le débordement. Les bouchons sont fabriqués et préparés par une autre unité, donc ils sont prêts à être utilisés directement par la bouchonneuse.
  - **Étiqueteuse** : les étiqueteuses sont destinées à coller des étiquettes enveloppantes sur des récipients cylindriques portant des informations sur le produit et le fabricant.
  - **Dateurs** : ils servent à mentionner la date et l'heure de fabrication d'un produit. En utilisant l'impression à jet d'encre ou la gravure directe sur la bouteille à l'aide d'un laser.
  - **Déviateur de bouteille** : ce sont des mécanismes destinés à répartir les bouteilles sur différents couloirs d'une manière homogène pour qu'elles soient regroupées dans

des paquets enveloppés par la suite.

- **Fardeleuse** : la fardeleuse est la machine qui reçoit les bouteilles et les enveloppe dans un film en silicone. La machine est de type barre de soudeur avec superposeur de film sur fond de paquet.
- **Encartonneuse** : met les bouteilles d'huiles en carton pour l'exportation.
- **Palettiseur** : ces machines sont conçues pour superposer sur une palette plusieurs étages de fardeaux.
- **Banderoleuses** : ces machines servent à envelopper la charge constituée de la palette et de plusieurs étages de fardeaux dans le but d'assurer la bonne tenue des bouteilles pour tout déplacement. La banderoleuse entoure la charge d'un film en silicone.

## 1.10 La Recherche Opérationnelle à CO.GB *Labelle*

Dans le cadre des relations, la Recherche Opérationnelle - entreprises, divers problèmes ont été formulés. Dans cette partie, nous présentons quelque cas étudiés au niveau du complexe CO.GB *Labelle* et traités par les étudiants du département de Recherche Opérationnelle de l'université de Bejaia ces dernières années.

### 1. Résolution par la méthode directe du support d'un problème linéaire multiobjectifs : Application à l'Unité CO.GB-UP08.

Les problèmes posés par les entreprises sont souvent complexes de part la diversité des objectifs et leurs nature conflictuelle. La modélisation de ce type de problème ne peut se faire à l'aide d'une seule fonction objectif. La théorie de l'optimisation multicritère est née de cette préoccupation. Le modèle mathématique mis en évidence est un problème linéaire multi objectif (PLMO), dont plusieurs méthodes numériques de résolution sont développées par différents chercheurs de domaine. [19]

### 2. Planification de la production au CCGB(Complexe des Corps Gras de Bejaia)

Un modèle mathématique permettant de proposer une stratégie optimale de production a été abordé. Cette stratégie aura pour objectif, la minimisation des coûts de

production, de stockage, et des coûts occasionnés lorsque les demandes ne sont pas entièrement satisfaites (coût de rupture des stocks), tout en respectant les capacités de production et de stockage de l'entreprise CCGB, et en assurant la satisfaction des demandes prévues. [16]

## 1.11 Problématique

Vue l'absence d'une salle de contrôle de la chaîne de production des huiles au niveau de l'entreprise CO.GB *Labelle* Bejaia, et le manque de la gestion automatique des différentes tâches, qui ont provoqué des divers problèmes à savoir la difficulté de détecter l'apparition des pannes et la surveillance des machines, et pour but d'améliorer les performances des unités de conditionnement d'huile, nous avons opté à leur proposer la création d'un poste de contrôle automatisé. Il s'agit de l'installation d'un réseau de capteur sans fil, afin de détecter en temps réel l'apparition des pannes au niveau des machines et de la chaîne de production.

## 1.12 Contexte de travail

Après avoir effectué un stage au niveau de l'entreprise CO.GB *Labelle*, notre étude consiste à :

- Connaitre et comprendre le fonctionnement de la chaîne de production CO.GB *Labelle*;
- Découvrir la nécessité d'utiliser un réseau sans fil au niveau de cette chaîne;
- Évaluer les performances de la chaîne de production actuelle à base des réseaux de capteurs sans fil.

Et aussi on propose la mise en place de plusieurs PAN(Personal Area Network) et on propose un algorithme d'ordonnancement (communication) qui va se baser sur le standard IEEE 802.15.4 e.

## 1.13 Conclusion

L'entreprise CO.GB *Labelle* est une entreprise agroalimentaire qui garde toujours l'intérêt d'évaluer son niveau de production afin d'atteindre des objectifs soulignés. Durant notre stage effectué au niveau de CO.GB *Labelle*, nous avons constaté une utilisation très manuelle pour le contrôle et le suivi de fonctionnement de la chaîne de production des huiles qui entraîne des perturbations sur la stabilité et le bon fonctionnement de toute la chaîne. Notre travail vise principalement à l'automatisation de la tâche de contrôle par un RCSF et l'installation d'une salle de contrôle afin de faire face à des problèmes rencontrés.

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'organisme d'accueil et le contexte général de notre étude. Dans le chapitre suivant, nous allons aborder les réseaux de capteur sans fil, nous discuterons ensuite les différentes méthodes d'accès et de communication (transmission et réception) dans ces réseaux.

## Chapitre 2

---

# Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

---

### 2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sont de plus en plus utilisés dans l'environnement et l'industrie grâce notamment aux derniers développements réalisés dans le domaine des technologies sans-fils ( Wireless ). Depuis quelques années, le besoin d'observer, d'analyser et de contrôler des phénomènes physiques sur des zones étendues est essentiel pour de nombreuses applications environnementales et scientifiques, c'est pour cela les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) occupent une place très importante dans le domaine des technologies, l'environnement et surtout dans l'industrie. La gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs en utilisant des protocoles de communication performants sont aujourd'hui les principaux enjeux pour les industriels.

Les réseaux de capteurs sans fil constituent un secteur en pleine expansion aux frontières de la recherche dans le domaine des systèmes informatiques, des réseaux de communication et du traitement du signal. Actuellement, nous témoignons de l'impact majeur que les réseaux de capteurs ont introduit sur la vie courante.

Dans ce présent chapitre, nous présentons tout d'abord les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), leurs domaine d'applications ainsi que leurs architecture et conceptions. Nous décrivons par la suite le standard 802.15.4 qu'est utilisé pour la communication dans ce type des réseaux.

## 2.2 Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif électronique ayant pour tâche de transformer une mesure physique observée en une mesure généralement électrique qui sera à son tour traduite en une donnée binaire exploitable et compréhensible par un système d'information. Parmi les différents types de mesures enregistrées par les capteurs, on peut citer entre autres : la température, l'humidité, l'accélération, les mouvements, la pression, la présence d'un gaz, la vision (capture d'image), le son, etc [9].

Un exemple d'un capteur est donné dans la figure suivante (voir 2.1)

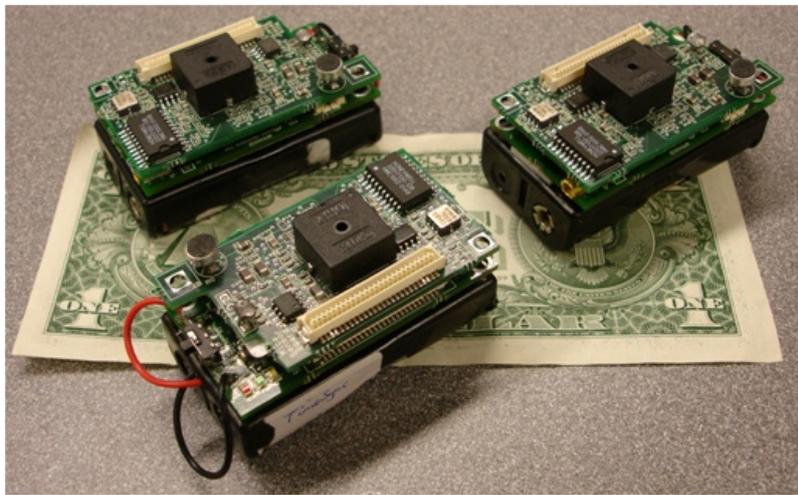


FIG. 2.1 – Exemple d'un capteur.

## 2.3 Architecture physique d'un capteur

Un nœud capteur est composé fondamentalement de quatre unités [9] ou modules élémentaires correspondant chacun à une tâche particulière de capture, de traitement, ou de communication, il comprend également une unité d'énergie comme cela est illustré dans la figure 2.2 [15].

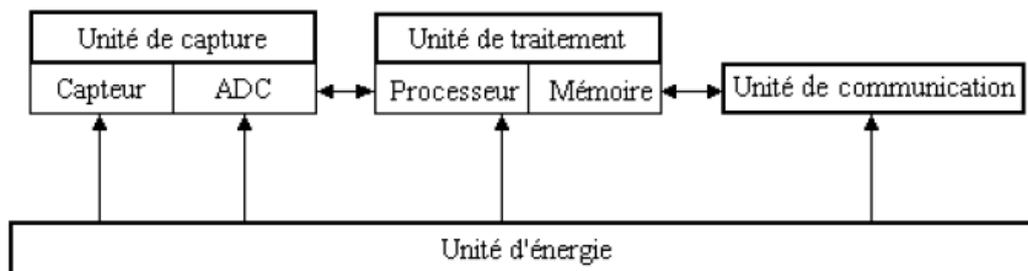


FIG. 2.2 – Architecture d'un capteur

1. **L'unité de capture (Sensing Unit)** : l'unité de capture est composée de deux sous unités :

- Un dispositif de capture physique qui prélève des mesures numériques sur les paramètres environnementaux ;
- Un convertisseur Analogique/Numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters) qui va convertir l'information relevée et la transmettre à l'unité de traitement [18].

2. **Unité de traitement (Processing Unit)** : elle est composée principalement d'un processeur et de mémoire (mémoire vive et mémoire non volatile), qui assure le fonctionnement du système d'exploitation, gère les interactions entre les différentes unités, et surtout traite les données récoltées [20].

3. **Unité de Communication (Transceiver Unit)** : elle est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio. Elle met en œuvre des protocoles de communication dépendant de la technologie utilisée (par exemple 802.11, 802.15.1, 802.15.4, etc. pour les technologies sans fil) [9].

4. **Unités d'énergie (Power Unit)** : un capteur est muni d'une ressource énergétique (une batterie) pour alimenter tous les composants du capteur.

Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau [1].

Des modules additionnels peuvent être intégrés dans un capteur tels que le sous-système de localisation (GPS : Global Positioning System) ou celui de mobilité [21].

## 2.4 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) ou WSN (Wireless Sensor Network) est un réseau composé d'un grand nombre de nœuds capteurs, avec une communication sans fil entre ces nœuds. Ces nœuds capteurs sont dispersés dans l'environnement (à surveiller) situé loin de l'utilisateur et sont reliés à une ou plusieurs passerelles (sink) qui permettent l'interconnexion avec d'autres réseaux (Internet, satellite, etc) et la récupération des données.

## 2.5 Architecture de communication d'un RCSF

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture (voir la figure 2.3). Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter des données et de les router vers une ou plusieurs stations de base (sink nodes). Ce dernier est un point de collecte de données capturées. Il peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'Internet. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau [18].

Cette architecture est illustrée par la figure 2.3 suivante.

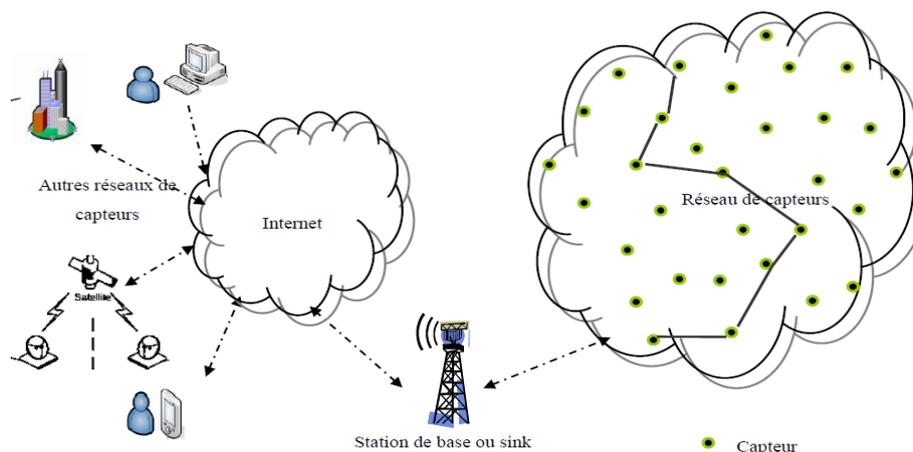


FIG. 2.3 – Architecture de communication d'un RCSF

## 2.6 Composantes d'un réseau de capteurs sans fil

Dans un réseau de capteurs, on fait la distinction suivante [31] :

- ✕ **Capteur (sensor)** : le composant physique qui implémente la détection du phénomène à observer ainsi que la transmission de ces mesures.
- ✕ **Actionneur (actuator)** : c'est un dispositif capable de manipuler l'environnement plutôt que l'observer. Généralement, il engendre un phénomène physique à partir de l'énergie reçue.
- ✕ **Station de base ou puits (sink)** : la station de base qui communique avec l'utilisateur par l'intermédiaire d'Internet ou par une communication par satellite [2].

## 2.7 Contraintes des réseaux de capteur sans fil

La conception des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres. On peut citer les facteurs suivants :

- **Durée de vie du réseau** : c'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise (La défaillance de nœud qui transmet en dernier vers la station de base provoque la défaillance de tout le réseau). Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.
- **Scalabilité** : dans le cas d'un nœud corrompu ou endommagé (pour une raison énergétique ou autre), le réseau doit être capable de prendre en considération cette modification. La notion de scalabilité est alors utilisée pour dire que l'architecture et les protocoles de communications du réseau doivent s'adapter et prendre en compte l'entrée ou la perte de nœuds dans le réseau [8].
- **Ressources limitées** : en plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse [18].
- **Tolérance aux pannes** : les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de série bon marché, il peut donc y avoir des

capteurs défectueux) ou plus fréquemment à un manque d'énergie. Les interactions externes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption [15].

- **Coût de production** : les réseaux de capteurs peuvent contenir un nombre important de nœuds. Il est donc nécessaire d'avoir un coût unitaire par nœud le plus faible possible sous peine d'obtenir un coût global du réseau trop élevé [8].
- **Agrégation de donnée** : dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données [2].
- **Faible consommation** : une durée de vie la plus longue possible traduit l'exigence la plus importante de la plupart des applications. Par conséquent, pour atteindre cette autonomie, il est crucial de minimiser la consommation moyenne des capteurs. Une des alternatives explorées aujourd'hui par les chercheurs consiste à extraire l'énergie de l'environnement (lumière intérieure ou extérieure, vibrations mécaniques, bruit acoustique). Ces techniques peuvent grandement améliorer la durée de vie, mais comme la production d'énergie est très faible, une consommation d'énergie réduite des capteurs reste de la plus haute importance [8].

## 2.8 Application des réseaux de capteurs sans fil

Les applications des (RCSFs) sont nombreuses. En voici une liste non exhaustive :

- **Applications militaires** : comme pour beaucoup d'autres domaines, ce sont historiquement, les militaires qui se sont intéressés les premiers aux RCSFs (voir la figure 2.4). Le besoin fort de contrôle et la surveillance a transformé la technologie de

RCSF en objectif majeur, car nous le retrouvons :

- ▶ Dans la détection et collecte d'informations sur la position de l'ennemi, surveillance des zones hostiles (contaminées),
  - ▶ Dans la surveillance des bâtiments ou des périmètres ;
  - ▶ Dans les missions d'espionnages ;
  - ▶ Dans la détection des dangers comme les radiations, les agents chimiques, etc.
  - ▶ Dans le contrôle et l'assistance pour des attaques terrestres ou aériennes ;
  - ▶ Dans le suivi des troupes et des véhicules militaires [28].
- **Surveillance de l'environnement (monitoring)** : on peut citer quelques exemples tels que la surveillance des feux de forêts, la surveillance du degré de maturité des récoltes (raisin), la mesure de la qualité de l'eau ou de l'air etc.
  - **Applications médicales** : dans le domaine de la médecine, (voir la figure 2.4) les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sur le patient (surveillance de la glycémie, détection de cancers, ...). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du cœur, température, ... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. On retrouve la collecte de données physiologiques pour la détection de maladie chez un patient. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) chez les personnes dépendantes (handicapés ou âgées) [25].
  - **Détection dans les réseaux d'industrie et le commerce** : Dans la fabrication industrielle, des capteurs sont utilisés pour les processus de suivi et de contrôle. Par exemple, dans une usine de traitement chimique à plusieurs étapes, il peut y avoir des capteurs placés en différents points dans le processus afin de surveiller la température, la concentration chimique, la pression, etc. ( voir la figure 2.4 ). Les informations de cette surveillance en temps réel peuvent être utilisées pour diversifier les processus de contrôle, tels que l'ajustement des quantités d'un ingrédient particulier ou encore pour modifier les paramètres de chaleur.

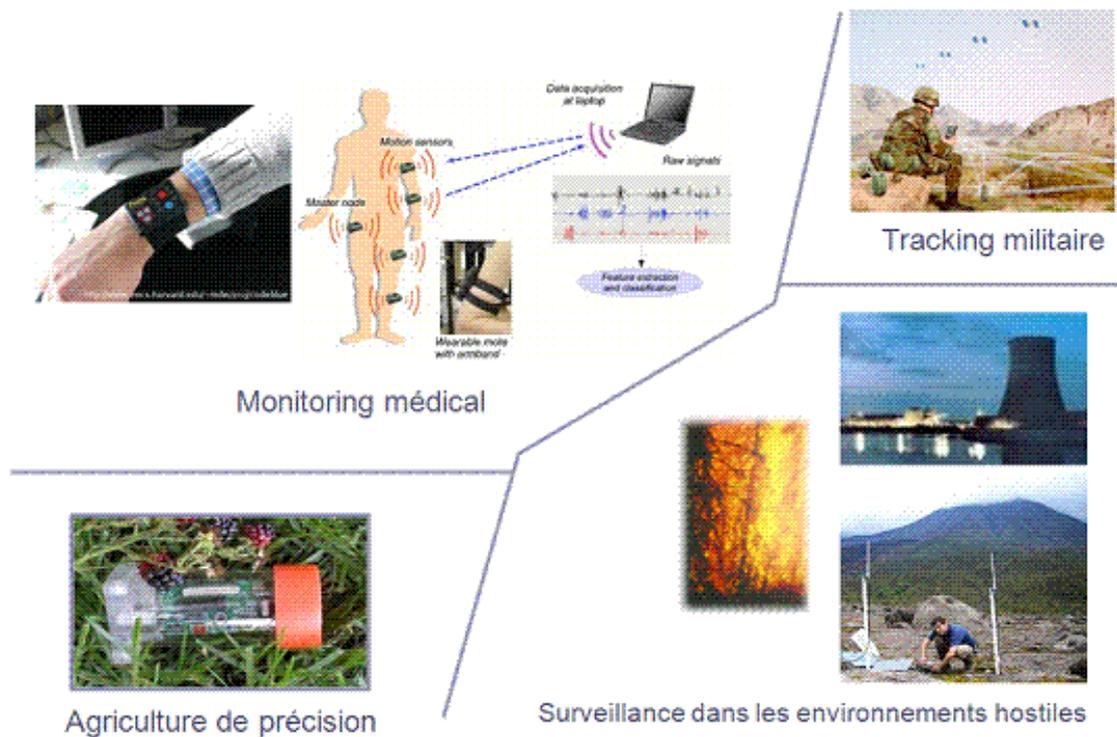


FIG. 2.4 – Différents domaines d'application des RCSFs.

## 2.9 Mécanismes de communication dans les RCSFs

Comme l'indique leur nom, les réseaux de capteurs sans fil n'utilisent aucun câble physique pour communiquer entre eux ou avec la station de base : toutes les transmissions sont effectuées par voie hertzienne. Chaque capteur est équipé d'un module radio utilisé alternativement pour émettre et pour recevoir. La plupart du temps ces modules sont capables de changer de fréquence de communication, ainsi que de moduler la puissance d'émission utilisée pour les transmissions.

Les RCSFs utilisent comme tout les autres types de réseaux, une architecture de communication en couches, ce sont les cinq premières couches du modèle OSI , la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseau, la couche transport et la couche application (voir la figure 2.5). Chaque couche a son propre rôle et ses propres protocoles pour atteindre son objectif.

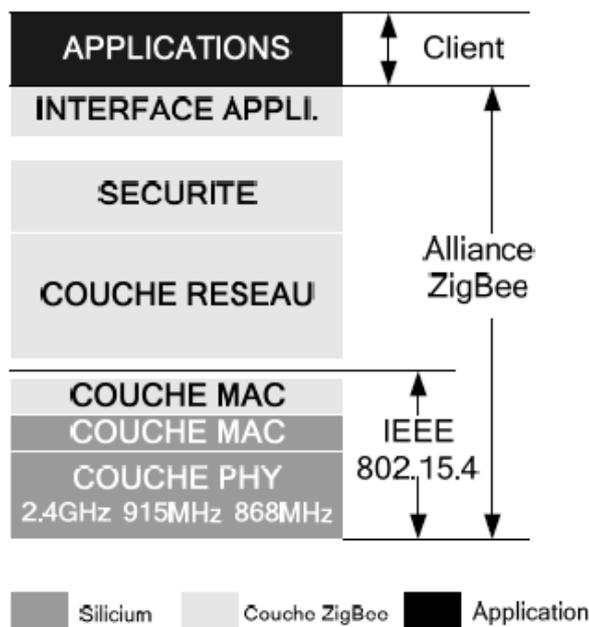


FIG. 2.5 – Zigbee/IEEE 802.15.4 et le système OSI

### 2.9.1 Réseaux ZigBee

ZigBee est un LP-WPAN (Low Power - Wireless Personal AreaNetwork), c'est un réseau sans fil à bas débit et à courte portée qui utilise les ondes hertziennes pour transporter des messages entre deux ou plusieurs entités réseaux [34]. Il est caractérisé par une portée comprise entre quelques mètres et quelques centaines de mètres et un débit faible (maximum 250 Kbits/s) [32]. ZigBee a d'abord été nommé HomeRF-Lite avant de porter successivement FireFly et RF-EasyLink. C'est une spécification publiée en 2003 par l'Alliance ZigBee et complétée en 2006 par la norme IEEE 802.15.4-2006 (version B) [21].

L'Alliance ZigBee est un écosystème mondial d'entreprises (plus de 200 membres) dédié au développement de solutions résidentielles, commerciales et industrielles à faible consommation d'énergie, en réseau sans fil et sur la base d'une norme mondiale ouverte [34].

Les réseaux ZigBee ont pour objectif de consommer extrêmement peu d'énergie, de telle sorte qu'une petite batterie puisse tenir presque toute la durée de vie de l'interface, mais

avec une vitesse extrêmement faible [24].

Le protocole ZigBee s'appuie sur le standard IEEE 802.15.4 pour les couches physique et liaison, qui sont les couches 1 et 2 du modèle OSI ainsi que sur le développement des couches réseau et applicative par la ZigBee Alliance.

## 2.9.2 Fonctionnalités ZigBee

- **Couche application de ZigBee** : est constituée de trois sous couches : le support d'application APS (Application Support), les objets d'éléments ZigBee ZDO (ZigBee Device Objects) et le framework d'application AF (Application Framework).

**APS** : cette couche offre un service de données, à la fois, pour les applications et les périphériques ZigBee. Elle gère les adresses de groupe et convertit les adresses IEEE 64 bits en adresses réseau 16 bits [2].

**ZDO** : il est également responsable de la découverte de nouveaux dispositifs et les services qu'ils fournissent dans le réseau.

**AF** : ZigBee utilise des profils d'application en vue de satisfaire les applications spécifiques pour l'utilisateur final.

- **Couche réseau de ZigBee** : en général, cette couche fournit deux types de services (données et gestion). Les deux services sont gérés principalement par deux entités : l'entité de données de la couche réseau NLDE (Network Layer Data Entity) qui est responsable de la transmission des données et l'entité de gestion de la couche réseau NLME (Network Layer Management Entity) qui s'occupe de la gestion du réseau.

## 2.9.3 Standard IEEE 802.15.4

La proposition à l'organisme IEEE a été faite en 2001 et, après plusieurs révisions, la version finale du standard IEEE 802.15.4 a été adoptée en mai 2003. Le standard IEEE 802.15.4 est un protocole qui s'agit de la couche physique et de la couche MAC pour les réseaux de capteurs sans fil.

- **Couche physique** : la couche physique est responsable du choix de la fréquence, de

la génération de la fréquence porteuse, de la détection du signal, de la modulation et du chiffage des données.

- **Couche liaison de données** : dans les réseaux sans fil, la couche de liaison manipule toutes les issues de communication entre les nœuds voisins. L'accès au médium commun (la fréquence) doit être contrôlé. Ceci est appelé le contrôle d'accès au Medium (MAC : Medium Access Control). La tâche principale de cette couche est d'interdire l'accès simultané au canal dans la même marge de fréquence radio. Si un récepteur reçoit deux signaux simultanément, c'est malheureusement une collision qui détruit toute l'information reçue par le récepteur.

### 2.9.3.1 Composantes du standard IEEE 802.15.4

Le standard IEEE 802.15.4 a défini deux types de dispositifs :

1. Des dispositifs à fonctions complètes (FFD : Full Function Device) : le FFD contient tous les services MAC, ce qui lui permet de fonctionner soit en tant que coordinateur, soit comme un périphérique simple du réseau PAN.
2. Dispositifs à fonctions réduites (RFD : Reduced Fonction Device) : contient seulement une partie des services MAC, ce qui lui permet juste de jouer le rôle d'un périphérique simple du réseau. Donc, un capteur RFD ne peut pas devenir un coordinateur d'un PAN.

### 2.9.3.2 Topologies du standard IEEE 802.15.4

- **Topologie en étoile (star)** : dans la topologie en étoile, les entités RFD (Reduced-Fucntion Device) entités à fonctionnalités réduites, sont connectées à un nœud FFD (Full-Fucntion Device) entités complètes central appelé coordinateur ; dans cette topologie, tous les messages sont relayés par le coordinateur, comme dans un Piconet Bluetooth avec le maître ou dans un réseau Wifi en mode infrastructure avec le point d'accès, cette topologie est représentée dans la figure 2.6 suivante [32].
- **Topologie point à point(peer-to-peer)** : dans cette topologie, un FFD peut communiquer directement avec tout autre FFD à la condition qu'ils soient à

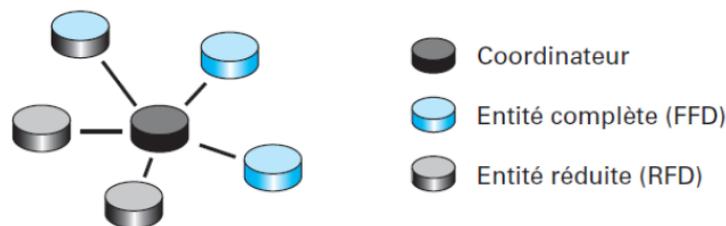


FIG. 2.6 – Topologie en étoile.

portée radio l'un de l'autre. On retrouve donc un coordinateur unique comme dans la topologie en étoile. Son rôle est de tenir à jour une liste des participants au réseau et de distribuer des adresses courtes. Des applications de type contrôle de production industrielle peut bénéficier de ce type de topologie. La représentation de cette topologie est donnée par la figure 2.7 suivante [32].

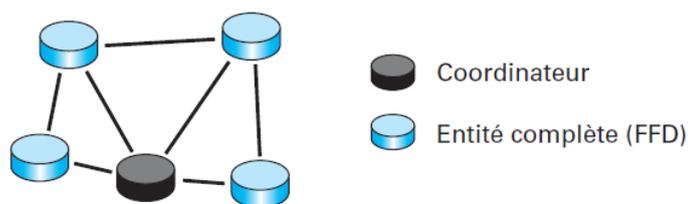


FIG. 2.7 – Topologie point à point.

### 2.9.4 Couche MAC (Medium Access Control)

La sous couche MAC du standard IEEE 802.15.4 a défini ses deux propres protocoles d'accès au médium de communication : CSMA-CA sloté et CSMA-CA non sloté (slotted CSMA-CA respectivement unslotted CSMA-CA), ses propres trames de communications et de gestion ainsi qu'un intervalle de communication appelé supertrame. Les protocoles slotted CSMA-CA et unslotted CSMA-CA diffèrent du protocole CSMA-CA utilisé dans le standard IEEE 802.11 [2].

Le principe de base des protocoles MAC utilisés dans le standard IEEE 802.15.4 est de s'assurer que le canal de communication est libre avant de commencer la transmission des données. Ce mécanisme a pour but principal la réduction du temps actif de la transmission afin de réduire la consommation d'énergie, et éviter au maximum le risque de collision.

Généralement on trouve deux familles de protocole MAC :

1. Accès distribué : (**CSMA/CA**, et (**ALOHA**).
2. Accès centralisé : il existe trois méthodes centralisées :
  - Frequency Division Multiple Access (**FDMA**) ;
  - Code Division Multiple Access (**CDMA**) ;
  - Time Division Multiple Access (**TDMA**).

Dans les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA, le temps est divisé en trames (périodiques) et chaque trame se compose d'un certain nombre de slots de temps. A chaque nœud est attribué un ou plusieurs slots par trame, selon un certain algorithme d'ordonnement. Il utilise ces slots pour l'émission/réception de paquets de/vers d'autres nœuds [15].

#### 2.9.4.1 Notion de la supertrame

Le standard IEEE 802.15.4 peut fonctionner en deux modes pour tenter l'accès au canal de communication : en mode beacon, en utilisant le protocole slotted CSMA-CA, et en mode sans beacon en utilisant le protocole CSMA-CA simple (unslotted CSMA-CA). En utilisant le mode beacon, les communications sont organisées dans un intervalle de temps appelée supertrame. Les nœuds du réseau, durant la période de la supertrame, peuvent utiliser 4 types de trames telles qu'elles sont définies par le standard IEEE 802.15.4, et qui sont citées ci-dessous [2] :

- Trame de données (data) ;
- Trame balise (beacon)
- Trame d'acquiescement (ack) ;
- Trame de service (MAC command).

#### 2.9.4.2 Structure de la supertrame

En mode beacon, le standard IEEE 802.15.4 offre l'option d'organiser les communications sous forme d'une structure de supertrame définie par le coordinateur du PAN. La supertrame est délimitée par deux trames beacons envoyées par le coordinateur, elle est

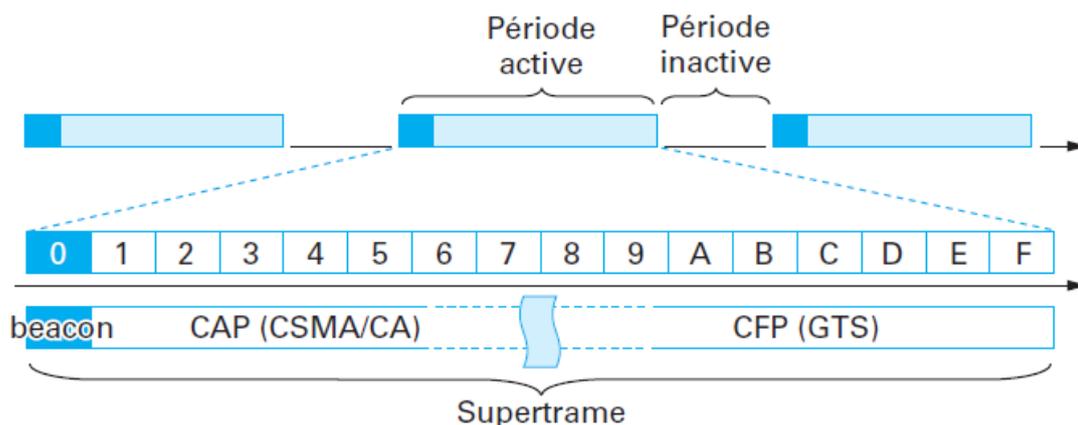


FIG. 2.8 – Structure de la supertrame.

divisée en 16 slots de temps de mêmes tailles (voir la figure 2.8).

**Protocole CSMA-CA slotté :** la principale caractéristique de slotted CSMA-CA est qu'il fonctionne en mode synchrone. Cela veut dire que tous les capteurs qui l'utilisent et qui appartiennent au même PAN alignent leur début de la supertrame.

**Protocole CSMA-CA non slotté :** le protocole CSMA-CA non slotté se ressemble au protocole CSMA-CA slotté, mais avec une légère différence. le protocole CSMA-CA non slotté est utilisé dans le mode non beacon. Donc les trames beacon ne sont pas envoyées par le PAN. Les périodes du backoff ne sont pas synchronisées. La fenêtre de contention (CW) n'est pas utilisée. Donc, il existe un seul test CCA, si le canal est libre, le capteur accède au canal [2].

## 2.10 Progrès du côté des entreprises

L'intérêt pour les réseaux de capteurs se renforce chez les acteurs industriels. Voici quelques exemples d'applications [12] [29] :

- La startup Française HiKoB propose depuis 2011 des plateformes logicielles et matérielles composées de capteurs autonomes qui occupent et renseignent sur les caractéristiques d'une zone géographique données. Ces réseaux, gérés intégralement par une plate-forme « Cloud », sont par exemple utilisés à Lyon pour renforcer les prévisions de Météo France vis-à-vis des risques de verglas et du salage des routes.
- NI (National Instruments) a annoncé en fin d'année 2012 l'intégration d'un réseau de capteurs dans son système NI CompactRIO, destiné à la maintenance préventive

des machines industrielles.

- Les sociétés Microsemi et Virtual Extension se sont associées pour établir un jeu de 2 circuits électroniques destinés aux réseaux de capteurs sans fils maillés offrant de hautes performances, des communications solides et une faible consommation d'énergie [26].
- Des capteurs dans nos smartphones : l'agence européenne de l'environnement a créé ses propres applications mobiles pour smartphones en offrant la possibilité à l'utilisateur lambda de s'informer sur son environnement mais également renseigner toute information suspecte, grâce à des capteurs spécifiques intégrés. A l'Ecole de Recherche en Sciences Informatiques de l'université nationale australienne, des chercheurs réfléchissent également à des applications mobiles pour transformer les smartphones en capteurs intelligents, en passant par la plateforme logicielle Global Sensor Network.

## 2.11 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie etc. Les réseaux de capteurs offrent des solutions économiquement attrayantes pour la surveillance à distance des environnements. Ils sont déployés en grande densité pour évaluer et agir d'une manière fidèle et en temps réel.

Au cours de ce chapitre, nous avons défini les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, nous avons donné leur architecture de communication et leur différents domaines d'applications, puis nous avons présenté le protocole Zigbee et le standard 802.15.4 utilisés pour la communication dans les RCSFs.

## Chapitre 3

---

# Outils de modélisation et d'évaluation de performances des réseaux informatiques

---

### 3.1 Introduction

Les systèmes de production font partie des systèmes dynamiques. Parmi les modèles utilisés pour l'étude de ces systèmes, il y a les modèles de files d'attente pour l'évaluation analytique de performances, les réseaux de Petri pour l'analyse des propriétés, évaluation de performances, simulation, et les modèles (et programmes) de simulation.

De façon générale, un modèle est composé de variables, d'objets (centres de services, clients, ressources). Ils sont caractérisés par des attributs fixes (i.e., dont la valeur ne change pas au cours du temps, exemple : Type de pièce), ou variables (i.e., dont la valeur change au cours du temps, exemple : Occupation d'une machine), et des relations entre ces objets (services effectués au cours du temps).

Durant ce chapitre, nous présenterons quelques outils de modélisation analytiques des réseaux informatiques en introduisant des définitions et notions de base pour la théorie des graphes, les réseaux de petri, les chaines de Markov ainsi que pour des modèles de file d'attente.

## 3.2 Théorie des graphes

La théorie des graphes est un très vaste domaine, en évolution constante tant du point de vue des recherches fondamentales que de celui des applications.

La théorie des graphes offre d'autre part un intérêt pédagogique certain. En effet, les définitions sont simples et de véritables problèmes de recherche peuvent être posés sous forme de " jeux mathématiques ".

### 3.2.1 Concepts de base

Un **graphe** fini  $G = (V,E)$  est défini par l'ensemble fini  $V = \{v_1; v_2; \dots; v_n\}$  dont les éléments sont appelés **sommets**, et par l'ensemble fini  $E = \{e_1; e_2; \dots; e_m\}$  dont les éléments sont appelés **arêtes**.

#### 3.2.1.1 Graphes non orientés

On dit que  $G$  est un graphe non orienté (ou bien indirect), si la précision de sens de lien  $(i, j)$  et la distinction entre extrémité initiale et extrémité terminale ne jouent aucun rôle. On appelle tout élément  $(i, j) \in E$  une arête, qui est représentée graphiquement par un segment sans flèche liant les deux nœuds  $i$  et  $j$ . La Figure 3.1 montre un graphe non orienté. On appelle **ordre** d'un graphe le nombre de sommets  $n$  de ce graphe.

Le degré d'un graphe est le degré maximum de tous ses sommets.

**Exemple 3.1** soit le graphe  $G$  de la figure 3.1 suivante :  $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  ;  $E = \{(1,3); (1,4); (2,3); (3,4); (4,5); (5,6)\}$

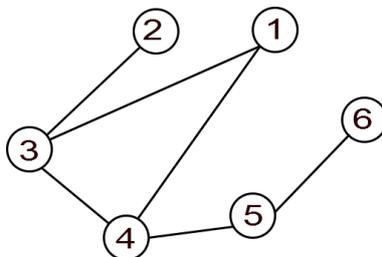


FIG. 3.1 – Graphe non orienté

### 3.2.1.2 Graphes orientés

On dit que  $G$  est un graphe orienté (ou bien direct) s'il y a une distinction entre les liens  $(i, j)$  et  $(j, i)$ , c'est-à-dire  $(i, j) \neq (j, i)$ . Dans ce cas le lien est appelé un **arc**. On représente  $e = (i, j)$  graphiquement par une flèche qui part de  $i$  pour rejoindre  $j$  qui sera la pointe de cette flèche. Dans ce cas,  $j$  sera appelé un successeur de  $i$  (ou  $i$  est un prédécesseur de  $j$ ) et chaque sommet peut avoir plusieurs successeurs et plusieurs prédécesseurs.

La Figure 3.2 montre un graphe orienté.

**Exemple 3.2** soit le graphe  $G$  suivant :  $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ;  $E = \{(1,4); (3,2); (3,1); (4,3); (4,5); (5,6)\}$

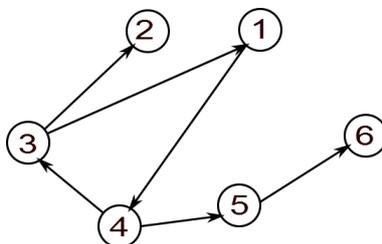


FIG. 3.2 – Graphe orienté

### 3.2.1.3 Graphe partiel

Soit  $G = (V, E)$  un graphe. Le graphe  $G' = (V, E')$  est un **graphe partiel** de  $G$ , si  $E'$  est inclus dans  $E$ . Autrement dit, on obtient  $G'$  en enlevant une ou plusieurs arêtes au graphe  $G$  (voir la figure 3.3).

**Exemple 3.3** soit le graphe partiel de  $G$  suivant :

$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ;  $E = \{(1,3); (1,4); (2,3); (5,6)\}$

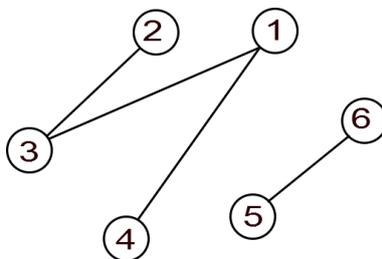


FIG. 3.3 – Graphe partiel de  $G$

### 3.2.1.4 Sous graphe

Pour un sous-ensemble de sommets  $A$  inclus dans  $V$ , le sous graphe de  $G$  induit par  $A$  est le graphe  $G = (A, E(A))$  dont l'ensemble des sommets est  $A$  et l'ensemble des arêtes  $E(A)$  est formé de toutes les arêtes de  $G$  ayant leurs deux extrémités dans  $A$ . Autrement dit, on obtient  $G'$  en enlevant un ou plusieurs sommets au graphe  $G$ , ainsi que toutes les arêtes incidentes à ces sommets. La figure 3.4 montre un sous graphe.

**Exemple 3.4** soit le sous graphe de  $G$  suivant :

$$V = \{1, 2, 3, 5, 6\}$$

$$E = \{ (1,3); (2,3); (5,6) \}$$

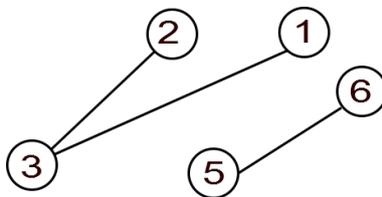


FIG. 3.4 – Sous graphe de  $G$

## 3.2.2 Quelques types de graphes

### 3.2.2.1 Graphe simple

Un graphe est **simple** si au plus une arête relie deux sommets et s'il n'y a pas de **boucle** sur un sommet.

### 3.2.2.2 Graphe complet

Un graphe est **complet** si chaque sommet du graphe est relié directement à tous les autres sommets.

### 3.2.2.3 Graphe connexe

Un graphe est **connexe** s'il est possible, à partir de n'importe quel sommet, de rejoindre tous les autres en suivant les arêtes.

### 3.2.2.4 Graphe biparti

Un graphe est **biparti** si ses sommets peuvent être divisés en deux ensembles  $X$  et  $Y$ , de sorte que toutes les arêtes du graphe relient un sommet dans  $X$  à un sommet dans  $Y$  [11].

### 3.2.2.5 Arbre

On appelle arbre tout graphe connexe sans cycle. Un graphe sans cycle mais non connexe est appelé une forêt (voir la figure 3.6). Une feuille ou sommet pendant est un sommet de degré 1.

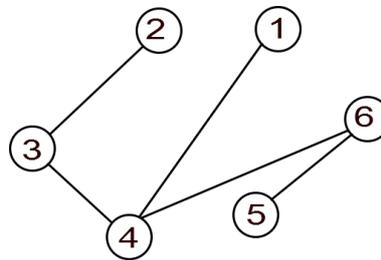


FIG. 3.5 – Arbre

La figure 3.5 représente un arbre dont les sommets 1, 2 et 5 sont les feuilles.

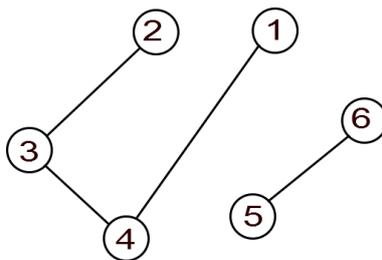


FIG. 3.6 – Forêt

Les sommets 1, 2, 5 et 6 sont les feuilles.

### • Caractérisations d'un arbre

Pour un graphe  $G$  d'ordre  $n$ , il y a équivalence entre les propriétés :

1.  $G$  est un arbre,
2.  $G$  est sans cycle et connexe,
3.  $G$  est sans cycle et comporte  $n - 1$  arêtes,
4.  $G$  est connexe et comporte  $n - 1$  arêtes,
5. Chaque paire  $u, v$  de sommets distincts est reliée par une seule chaîne simple (et le graphe est sans boucle).

### 3.2.3 Matrice d'adjacences :

on peut représenter un graphe simple par une matrice d'adjacences. Une matrice  $(n \times m)$  est un tableau de  $n$  lignes et  $m$  colonnes.  $(i, j)$  désigne l'intersection de la ligne  $i$  et de la colonne  $j$ . Dans une matrice d'adjacences, les lignes et les colonnes représentent les sommets du graphe. Un '1' à la position  $(i, j)$  signifie que le sommet  $i$  est adjacent au sommet  $j$ . La matrice d'adjacence de  $G$  est égale à la matrice  $M = (m_{ij})$  de dimension  $n \times n$  telle que :

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in E, & (\text{c'est-à-dire } (i, j) \text{ est une arête}); \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Cette matrice a plusieurs caractéristiques :

1. Elle est carrée : il y a autant de lignes que de colonnes.
2. Il n'y a que des zéros sur la diagonale allant du coin supérieur gauche au coin inférieur droit. Un " 1 " sur la diagonale indiquerait une boucle.
3. Elle est symétrique :  $m_{ij} = m_{ji}$ . On peut dire que la diagonale est un axe de symétrie.
4. Une fois que l'on fixe l'ordre des sommets, il existe une matrice d'adjacences unique pour chaque graphe.

### 3.2.4 Graphe de conflits induit

Soit un réseau de capteurs de  $N$  nœuds structurés en arbre logique. Le sommet de l'arbre représente le nœud sink (station de base). Chaque nœud communique avec son parent (liens continus) afin que ce dernier achemine les données vers la station de base. Cependant, pour une représentation fidèle d'un réseau réel, on a rajouté les liens d'interférences 1 (liens discontinus) entre les nœuds. Ce cas indique les nœuds qui sont dans la même portée radio, dont les communications simultanées rentrent en collisions ou en interférences. Nous modélisons le réseau par un graphe  $G(V,E)$ , où  $V = S_0, S_1, \dots, S_{N-1}$  représentent les  $N$  sommets de l'arbre et  $E$  représente les liens sans fil, que nous considérons dans notre cas comme des liens symétriques. Une fois le réseau est configuré en arbre logique pendant la période de contrôle de topologie, le nœud sink va procéder à la construction du graphe des conflits en tenant en compte les liens de communication et les liens d'interférence entre les nœuds du réseau. Entre autres, il existe des règles à suivre pour déterminer si deux nœuds sont en conflit ou non [2].

Dans les réseaux sans fil, il existe plusieurs cas de conflits (collisions et interférences). Dans [10] se présente les cinq (05) cas de conflits qu'on peut rencontrer dans les réseaux sans fil. La figure ci dessous illustre ces cas de conflits (voir la figure 3.7).

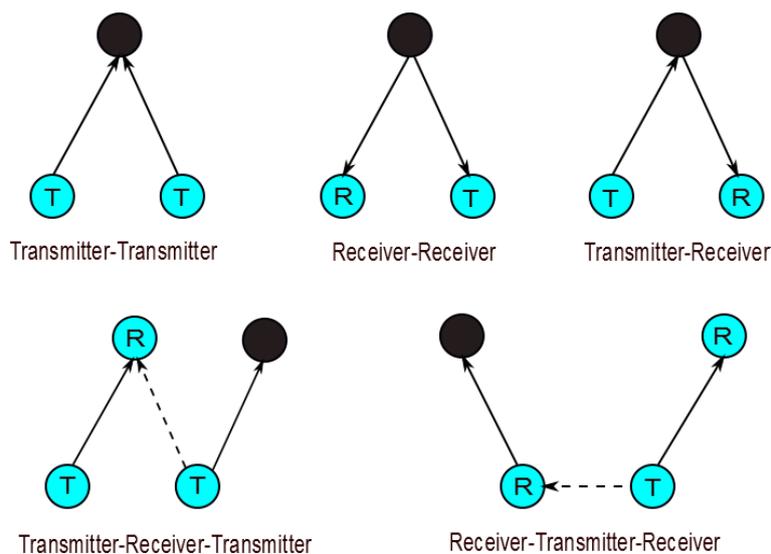


FIG. 3.7 – Cinq cas de conflit dans les réseaux sans fil

### 3.2.5 Coloriage des graphes

**Définition 3.2.1** *colorer un graphe c'est colorer les sommets de telle façon que deux sommets distincts et **adjacents** aient toujours des couleurs différentes. Un graphe  $G$  est  **$k$ -coloriable** s'il existe un ensemble  $C$  de  $k$  couleurs tel que chaque sommet puisse être colorié avec une couleur  $c \in C$  sans que deux sommets adjacents ne partagent pas la même couleur.*

**Définition 3.2.2** *le **nombre chromatique**  $\chi(G)$  d'un graphe  $G$  est le plus petit nombre de couleurs nécessaires pour colorier le graphe  $G$ . [30]*

*Un graphe est  $k$ -coloriable ssi  $\chi(G) < k$ .*

Si  $G = (V, E)$  est un graphe simple non orienté,  $n = |V|$ ,  $m = |E|$ ,

$\alpha(G)$  : taille d'un **stable**<sup>1</sup> maximum de  $G$ ,

$\omega(G)$  : la taille d'une **clique** maximale dans le graph  $G$ ,

$k$  la  $k$ -coloration obtenue par l'algorithme de coloration 'Powell',

$d_{max}$  : le degré maximum dans le graphe  $G$  ;

$d_{min}$  : le degré minimum dans le graphe  $G$  ;

alors le nombre chromatique du graphe  $G$  est compris entre  $\gamma^-(G)$  et  $\gamma^+(G)$

où :  $\gamma^+(G) = \min \{n + 1 - \alpha(G), k, d_{max} + 1\}$  (1)

<sup>1</sup>Stable : voir le glossaire

$$\text{et } \gamma^-(G) = \max \left\{ \frac{n}{n-d_{\min}}, \omega(G), \frac{n^2}{n^2-2m}, \frac{n}{\alpha(G)} \right\} \quad (2)$$

### 3.2.5.1 Algorithmes de coloriage standards

Parmi les algorithmes de coloration standards existés il y'a l'algorithme Welsh et Powell, algorithme de glouton, algorithme DSATUR, etc. Vu que tous les algorithmes de coloriages standards ont le même but de minimiser le nombre de couleurs utilisés dans un graphe afin de pouvoir réutiliser la même couleur dans des nœuds différents, nous avons choisi de décrire l'algorithme de Welsh et Powell appliqué sur n'importe quel graphe. **Étapes de l'algorithme de Welsh-Powell**

1. Ranger les sommets par ordre décroissant de leurs degrés ;
2. Choisir une couleur ;
3. Affecter cette couleur au premier sommet de la liste non encore coloré ;
4. Suivre la liste en attribuant cette même couleur à tout sommet qui n'est pas encore coloré, et qui n'est pas adjacent à un sommet coloré avec cette couleur.

Continuer jusqu'à ce que la liste soit finie.

Si tous les sommets ne sont pas colorés, choisir une couleur qui n'est pas encore utilisée et recommencer les étapes 3 et 4, continuer tant que chaque sommet n'est pas coloré [17].

## 3.3 Réseaux de Petri

Les Réseaux de Petri (RdP) permettent de modéliser des systèmes séquentiels. Ils ont été inventés par Carl Adam Petri, un mathématicien Allemand contemporain. Il a défini un outil mathématique très général permettant de décrire les relations existant entre des conditions et des évènements et de modéliser le comportement de systèmes dynamiques à évènements discrets. Ces RdP datent de 1960-1962. C'est un outil très général, modélisant aussi bien les protocoles de communication informatiques que des systèmes de production [23].

### 3.3.1 Notion de base (Condition-Place et évènement-Transition)

**a• Condition** : une condition est la description de l'état d'une ressource du système modélisé :

- Une machine est au repos,
- Une machine est en réparation,
- Une commande est en attente.

Une condition est soit vraie, soit fausse. Un état du système peut être décrit comme un ensemble de conditions.

**b• Évènement** : un évènement est une action qui se déroule au sein du système et dont la réalisation dépend de l'état du système :

- Début de traitement sur une machine,
- Panne sur une machine,
- Début de traitement d'une commande.

Dans le formalisme des Réseaux de Petri, la condition est modélisée par place l'évènement est modélisé par une transition. Les composantes d'un réseau de Petri sont représentées par la figure 3.8 :

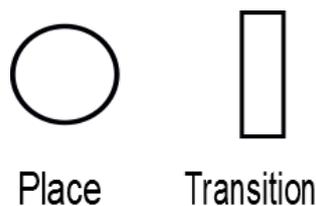


FIG. 3.8 – Composantes d'un réseau de Petri

### 3.3.2 Définitions

**Définition 3.3.1** *Un réseau de Petri est un graphe orienté biparti non marqué défini par un quadruplet  $R = (P, T, Entrée, Sortie)$ , où :*

*$P$  est un ensemble fini de places  $P = p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ ,*

*$T$  est un ensemble fini de transitions  $T = t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ,*

**Entrée** (ou *Pré*) :  $P \times T \longrightarrow N$ , appelée application d'incidence avant.

**Sortie** (ou *Post*) :  $P \times T \longrightarrow N$ , appelée application d'incidence arrière.

**Définition 3.3.2** un RdP non marqué est un graphe biparti constitué de places, de transitions (correspondant aux sommets du graphe) et d'arcs qui relient les transitions aux places et les places aux transitions. Il est représenté par un quadruplet  $Q = \langle P, T, I, O \rangle$  tel que :

$P$  : est un ensemble fini et non vide de places.

$T$  : est un ensemble fini et non vide de transitions.

$P \cap T = \phi$  : les ensembles  $P$  et  $T$  sont disjoints.

**Définition 3.3.3** Un RdP marqué est un doublet  $R = \langle R', M_0 \rangle$  dans lequel  $R'$  est un RdP non marqué et  $M_0$  un marquage initial.

Dans un RdP marqué, chaque place contient un nombre entier (positif ou nul) de marques ou jetons. Le nombre de marques contenu dans une place  $P_i$  est noté  $M(p_i)$ . Le marquage du réseau  $M$  est défini par le vecteur de ces marquages. Le marquage à un certain instant définit l'état du RdP, ou plus précisément l'état du système décrit par le RdP.

**Définition 3.3.4** un conflit structurel correspond à un ensemble de transitions qui ont au moins une place d'entrée en commun.

**Définition 3.3.5** un conflit effectif correspond à l'existence d'un conflit structurel et d'un marquage  $M$  tel que le nombre de marques dans la place du conflit est inférieur au nombre  $d$  que nécessaire à la mise à feu de toutes transitions de sortie de cette place qui sont validées par  $M$ .

### 3.3.3 Classe de Réseaux de Petri

Divers extensions ont été portées aux RdP classiques, ce qui a donné naissance à plusieurs formalismes de RdP. Ces formalismes introduisent entre autre l'aspect temporel, l'aspect stochastiques, etc. Ce qui a enrichi les structures des RdPs.

### 3.3.3.1 Réseaux de Petri généralisés

Un RdP généralisé est un RdP dans lequel les poids associés aux arcs sont des nombres strictement positifs. Ces poids peuvent être différents de 0 ou 1. Tout les arcs, dont les poids n'est pas explicitement spécifié, ont un poids de 1. Soit un arc reliant une place  $p_i$ , à une transition  $t_j$  ayant un poids égal à  $p$ , alors la transition  $t_j$  ne sera validée que si la place  $p_j$  contient au moins  $p$  jetons. Lors du franchissement de cette transition,  $p$  jetons seront retirés de la place  $p_i$ .

### 3.3.3.2 Réseaux de Petri temporel

On distingue deux types [6] :

- **Réseaux de Petri P-temporels** : les RdP P-temporels, dont les fondements théoriques ont été élaborés par Khansa , sont utilisés pour modéliser et analyser les systèmes à contraintes de temps. Il a été montré qu'ils représentent un formalisme puissant et reconnu pour la modélisation de l'obligation de respect des temps de séjour (synchronisation sous obligation).
- **Réseaux de Petri T-temporels** : les RdP t-temporels sont destinés principalement à l'étude des systèmes de télécommunication dont les évolutions dépendent des contraintes de type temps de réponse (time-out).

Dans ce modèle, un intervalle  $[a, b]$  de temps est associé à chaque transition du réseau. L'intervalle associé à la transition  $t$  est relatif au moment où la transition devient validée. Supposons que  $t$  est validée à l'instant  $c$ , alors elle peut être franchie seulement entre  $a+c$  et  $b+c$ , sauf si elle devient non-validée à cause du franchissement d'une autre transition avec laquelle elle était en conflit.

### 3.3.3.3 Réseaux de Petri temporisés

Un RdP temporisé permet de décrire un système dont le fonctionnement dépend du temps. Les RdPs temporisés sont utiles pour l'évaluation des performances d'un système. Soit les temporisations sont associées aux places (RdP P-temporisé) soit aux transitions (RdP T-temporisé).

Les RdPs temporisés constituent une sous-classe des RdPs temporels. Ils ont été introduits plus tôt que les RdPs temporels, aussi la littérature scientifique qui les concerne est très abondante. Pour cette raison, un grand nombre de propriétés des RdPs temporels ont été présentées comme une généralisation de propriétés préalablement établies pour les RdPs temporisés [6].

## 3.4 Chaines de Markov

Une chaîne de Markov (CM) est un cas particulier de processus stochastique. Il en existe deux types : les CM à temps discret et les CM à temps continu. Dans ce dernier cas, on les appelle aussi processus de Markov.

les chaînes de Markov facilitent l'analyse des performances des systèmes dynamiques dans de nombreux domaines d'application grâce à un ensemble de théorèmes qui permettent de mettre en œuvre des calculs matriciels pour l'obtention des indices de performance attendus.

### 3.4.1 Chaines de Markov à temps discret

Un processus stochastique est dit markovien (d'ordre 1) si l'évolution future du processus ne dépend que de sa valeur actuelle et non de ses valeurs passées. Plus précisément, si  $X(t)$  est à valeurs discrètes, il est markovien et est alors appelé chaîne de Markov si et seulement si pour toute suite d'instants  $t_1 < t_2 < \dots < t_i < t_{i+1}$  et toute suite de valeurs  $X_1, X_2, \dots, X_i, X_{i+1}$ .

$$P(X_{t_{k+1}} = X_{k+1} \mid X_{t_1} = X_1, X(t_2) = X_2, \dots, X(t_k) = X_k) = P(X_{t_{k+1}} = X_{k+1} \mid X_{t_k} = X_k) \quad (3).$$

#### Matrice et graphe des transitions

La matrice de transition d'une CM à temps discret est la matrice  $P$  composée des  $p_{ij}$ , probabilités de transition. Cette matrice est carrée, de dimension le nombre d'états possibles. Tous les termes sont positifs ou nuls et inférieurs ou égaux à 1 (puisque'elle ne

contient que des probabilités). La somme des termes de chaque ligne est 1 (puisque'il y a toujours 1 état de destination).

Le graphe des transitions est formé de points représentant les états du processus et d'arcs correspondant aux transitions possibles, cas pour lesquelles les probabilités  $p_{ij}$  sont non nulles.

### 3.4.2 Chaines de Markov à temps continu

Un processus stochastique en temps continu  $\{X(t); t \geq 0\}$  a la propriété de Markov si

$$P(X(s+t) = j \mid X(s) = i \text{ et } X(r) = l) = P(X(s+t) = j \mid X(s) = i) \forall i, j, l \in \{0, \dots, M\}; \forall r \geq 0, s > r, t > 0 \quad (4).$$

Le processus stochastique est alors une chaîne de Markov en temps continu,

Les probabilités de transition sont stationnaires puisqu'elles sont indépendantes de  $s$  :

$$P(X(s+t) = j \mid X(s) = i) = P(X(t) = j \mid X(0) = i) \forall s > 0 \quad (5).$$

Par symétrie avec le cas discret

$$P_{ij}(t) = P(X(t) = j \mid X(0) = i)$$

où  $P_{ij}(t)$  dénote la fonction de probabilité de transition en temps continu.

## 3.5 Files d'attente

La théorie des files d'attente est utile pour évaluer la performance de systèmes informatiques, dans lesquels les ressources sont partagées par plusieurs tâches, ou de réseaux de communication, qu'ils soient à commutation par paquets ou par circuits.

La théorie des files d'attente s'attache à modéliser et à analyser de nombreuses situations en apparence très diverses, mais qui relèvent néanmoins toutes du schéma descriptif général suivant. Des clients arrivent à intervalles aléatoires dans un système comportant un ou plusieurs serveurs auxquels ils vont adresser une requête. La durée du service auprès de chaque serveur est elle-même aléatoire. Après avoir été servis (ce qui suppose un arrêt chez un ou plusieurs serveurs selon le cas), les clients quittent le système [27].



FIG. 3.9 – Schéma d'une file d'attente

La figure 3.9 présente le schéma classique d'un modèle d'attente.

Nous appelons état d'un système à l'instant  $t$  le nombre  $n(t)$  de clients présents dans le système à cet instant (un client est " présent dans le système " si il est en file d'attente ou en cours de service). Les quantités fondamentales auxquelles s'intéresse l'analyste dans le cadre des modèles de files d'attente sont les probabilités d'état, que nous définissons de la façon suivante :

$$\begin{aligned} P_n(t) &= \text{probabilité de l'état } n \text{ à l'instant } t. \\ &= \text{probabilité que } n \text{ clients soient présents dans le système à l'instant } t. \\ &= \Pr[n(t) = n]. \end{aligned}$$

pour  $n = 0, 1, 2, \dots$  et  $t \geq 0$ ,

Sous certaines conditions, les probabilités à long terme ou probabilités stationnaires

$$P_n = \lim_{t \rightarrow \infty} P_n(t) \quad \text{quand } t \rightarrow \infty \quad (6)$$

existent pour  $n = 0, 1, 2, \dots$

### 3.5.1 Caractéristiques d'un modèle de files d'attente

- **File d'attente** : elle peut être finie ou infinie. Dans ce dernier cas, elle peut modéliser un stock à capacité illimitée. Quand un client essaye d'entrer dans une station dont la file d'attente limitée est pleine, on considère que le client est perdu.
- **Processus d'arrivée** : décrit le temps entre deux arrivées successives de clients. Ce temps peut être déterministe (il faut donner sa valeur) ou bien aléatoire (il faut alors préciser la loi : loi de Poisson, d'Erlang ou autre et les paramètres qui permettent de la définir).
- **Processus de service** : décrit le temps que met un serveur pour traiter un client.
- **Le ou les serveurs** : on parle d'un mono serveur lorsqu'il y a un serveur qui traite les clients les uns après les autres. C'est le cas des guichets par exemple. On parle de multiserveur quand plusieurs clients sont servis en même temps, parce qu'il y a plusieurs serveurs. C'est le cas d'un rayon fromage dans les supermarchés par exemple. La notion de serveur infini est plus abstraite. Il correspond au cas où tous les clients qui arrivent peuvent être servis immédiatement. Cela suppose que la file d'attente derrière un tel serveur n'est pas utile. Certains convoyeurs peuvent également être considérés comme tels.

- **Discipline de service** : ordre dans lequel les clients dans la file seront retirés pour être servis. La discipline par défaut est PAPS (Premier Arrivé, Premier Servi) ou FIFO (First In, First Out). Si une autre discipline est utilisée (comme DAPS ou LIFO ou bien aléatoirement ou autre), il faut la préciser [33].

La forme du modèle est :

Arrivées / Services / Serveurs / Capacité / Population / Discipline

## 3.6 Conclusion

Parmi les outils de modélisation les plus puissants et les plus performants des systèmes dynamiques réels et informatiques, nous citons la théorie des graphes, les RdPs, les chaînes de Markov, et les files d'attente.

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités, leurs définitions et leurs différentes règles d'évolutions. Le prochain chapitre sera la partie application de notre travail, ou nous allons faire appel aux notions de théorie des graphes.

## Chapitre 4

---

# Modélisation et évaluation de la chaîne de production par un réseau de capteur sans fil

---

### 4.1 Introduction

La mise en place d'un réseau de capteur sans fil s'avère une solution efficace pour visualiser et surveiller en temps réel les différents procès dans divers endroits et de transmettre plus rapidement l'information de panne au service de maintenance pour que les responsables puissent la réparer avant l'arrêt de toute la chaîne.

Il existe plusieurs protocoles MAC à base de TDMA pour les RCSF, tel que les protocoles qui utilisent TDMA de base et ceux qui utilisent TDMA avec la réutilisation spatiale des slots de temps. Le but principal de ces protocoles est d'optimiser le temps de communication des capteurs (transmission/réception).

Dans ce présent chapitre, nous allons étudier l'utilisation des capteurs sans fil dans le milieu industriel et nous allons évaluer les performances du réseau installé au niveau de notre chaîne de production afin de montrer l'intérêt de l'utilisation de ces capteurs. Nous commençons par une modélisation de toute la chaîne. Ensuite nous allons proposer un protocole qui se base sur la couche MAC appelé IPSP (InterPAN Scheduling Protocol)

qui prend en considération l'ignorance des liens d'interférences dans la modélisation du réseau par un graphe de conflits et qu'utilise la notion des PANs.

Dans ce qui suit, nous allons expliquer le principe de fonctionnement du protocole IPSP appliqué dans l'algorithme d'ordonnancement proposé, le principe des graphes de conflits, et les résultats de simulation obtenus en les comparant avec ceux de l'algorithme IPSP.

## 4.2 Problème de contrôle

Durant notre stage effectué au sein de l'entreprise CO.GB *Labelle* nous avons remarqué un manque d'automatisation de la tâche de contrôle des machines qui se fait manuellement, et on a constaté que chaque machine est nécessaire pour la continuité de la production telle qu'un arrêt d'une machine entraîne l'arrêt de toute la ligne de conditionnement, ce qui produit une perte du temps importante. Pour cela nous avons eu l'idée d'installer un réseau de capteur au niveau de la chaîne de production pour un suivi automatique des machines.

## 4.3 Modélisation de la chaîne de production

Dans cette partie, nous allons modéliser notre chaîne de production avec les RCSFs qui font l'objet d'outil de contrôle et de suivi dans notre modèle.

### 4.3.1 Objectif de la modélisation

L'objectif de la modélisation de la chaîne de production est de détecter l'apparition d'une panne en temps réel, ce paramètre est utilisé pour déterminer ses performances après l'installation d'un réseau de capteur au niveau de toute la chaîne.

### 4.3.2 Description de la chaîne de production

La chaîne de production comme nous l'avons déjà définie précédemment contient plusieurs machines. Ce qui suit, nous montre la modélisation de cette chaîne avec les distances

entre les différentes machines afin de pouvoir placer les capteurs sans avoir des interférences de communication entre eux. La chaîne de production est schématisée dans la figure 4.1 suivante :

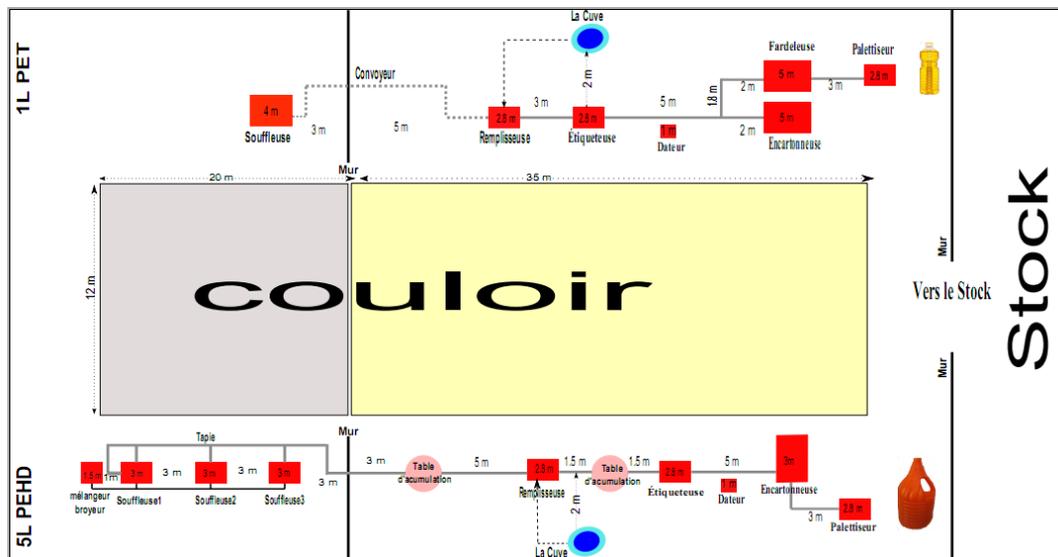


FIG. 4.1 – Schéma de la chaîne de production

### 4.3.3 Emplacement des capteurs dans les lignes de conditionnement

Nous avons installé sur chaque machine un capteur qui indique les informations de cette dernière, et des coordonnateurs qui collectent les informations transmises par les capteurs pour les transmettre à son tour à la station de base qui est la salle de contrôle.

Le schéma générale de la chaîne de production après l'installation des capteurs est présenté par la figure 4.2 suivante (voir l'Annexe pour un schéma plus clair )

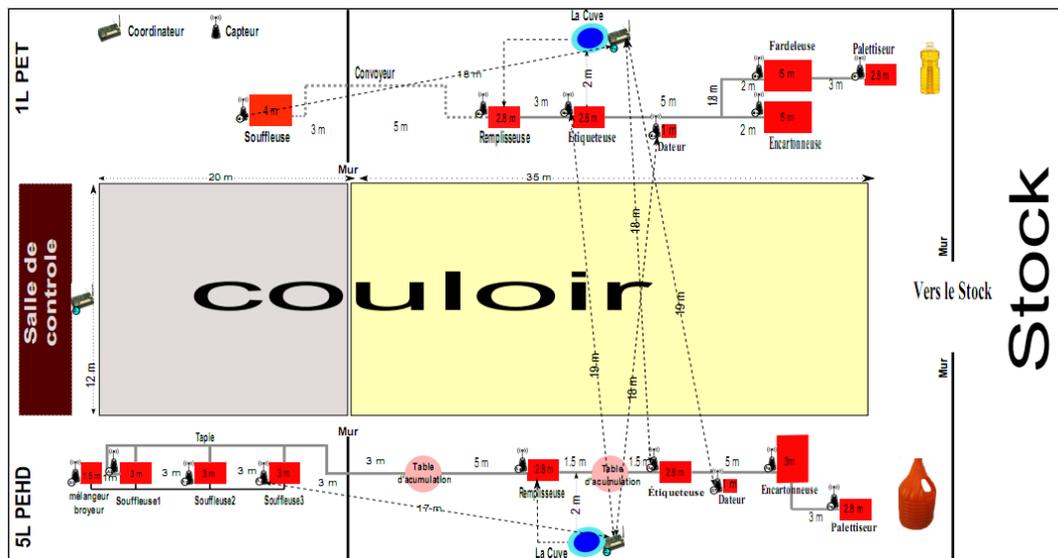


FIG. 4.2 – Schéma générale de la chaîne de production après l'installation des capteurs

#### 4.3.4 Choix de l'outil de modélisation

Le choix de la théorie des graphes comme modèle de modélisation de notre problème n'est pas fait aléatoirement. Notre choix s'est porté sur l'utilisation des formalismes de la théorie des graphes touche beaucoup de domaines conduisant à des solutions efficaces. Ils permettent de modéliser les réseaux informatiques et conduire à une représentation simple et claire. Dans notre cas, on a besoin de représenter notre réseau de capteur avec un graphe et proposer un algorithme d'ordannancement des nœuds de ce graphe.

### 4.4 Description du réseau et le graphe de conflits induit

Après l'installation des capteurs sur toute la chaîne de la production, nous avons obtenu un réseau que nous allons représenter dans ce qui suit par le graphe G.

#### 4.4.1 Construction du graphe G à base des RCSFs

Soit un réseau de capteurs de 19 nœuds structurés en arbre logique. Le sommet de l'arbre représente le nœud sink (SB : station de base). Chaque nœud communique avec son parent (liens continus) afin que ce dernier achemine les données vers la station de

base. Cependant, pour une représentation fidèle d'un réseau réel, on a rajouté les liens d'interférences (liens discontinus) entre les nœuds. Ce cas indique les nœuds qui sont dans la même portée radio (ne dépasse pas 20m dans notre cas), dont les communications simultanées rentrent en collisions ou en interférences. Nous modélisons alors ce réseau par un graphe  $G(V,E)$ , où  $V = \{C_1, C_2, C_3, A_1, \dots, A_9, B_1, \dots, B_7\}$  représentent les 19 sommets de l'arbre où  $C_1, C_2, C_3$  sont des coordinateurs qui collectent, agrègent et transmettent les données à la station de base (SB) ou à un autre coordinateur,  $E$  représente les liens sans fil. Une fois ce réseau est configuré en arbre logique, le noeud sink (SB) va procéder à la construction du graphe des conflits en tenant en compte les liens de communication et les liens d'interférence entre les nœuds du réseau. Entre autres, il existe des règles à suivre pour déterminer si deux nœuds sont en conflit ou non.

Soit le graphe  $G$  associé au réseau de capteur installé sur la chaîne de production présenté dans la figure 4.3 suivante :

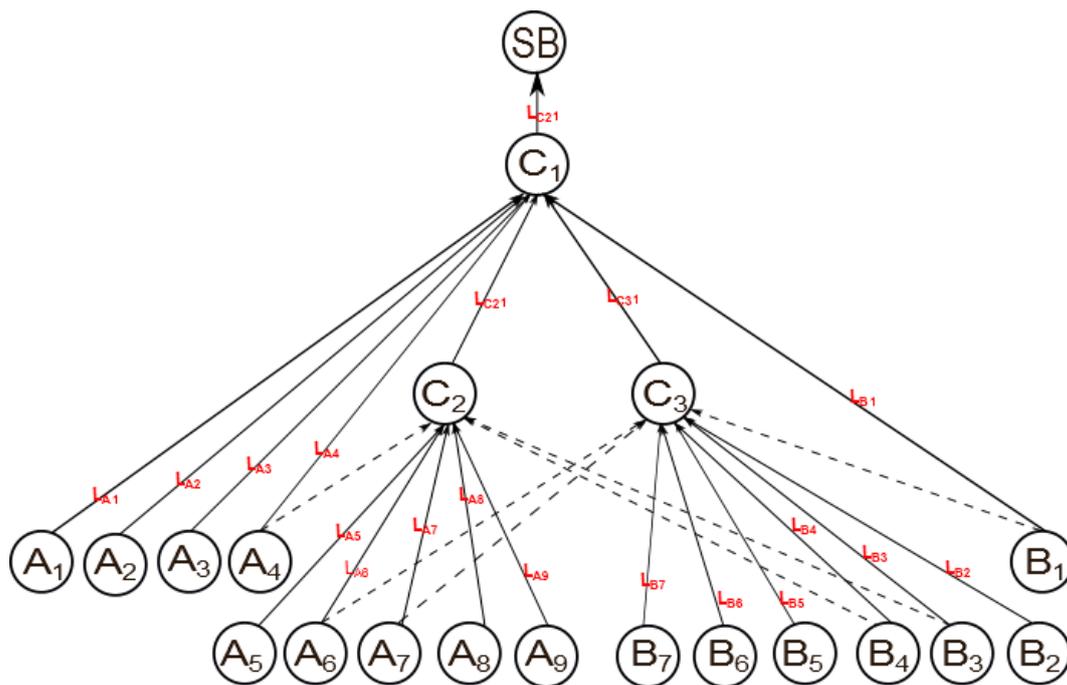


FIG. 4.3 – Graphe  $G$

### 4.4.2 Modélisation avec les graphes de conflits

Dans les réseaux sans fil, il existe plusieurs cas de conflits (collisions et interférences). Djukic et al [10] ont présenté les cinq (05) cas de conflits qu'on peut rencontrer dans les réseaux sans fil. Dans notre exemple nous avons appliquée que trois (03) cas selon notre modèle étudié. La figure 4.4 illustre les trois cas utilisés

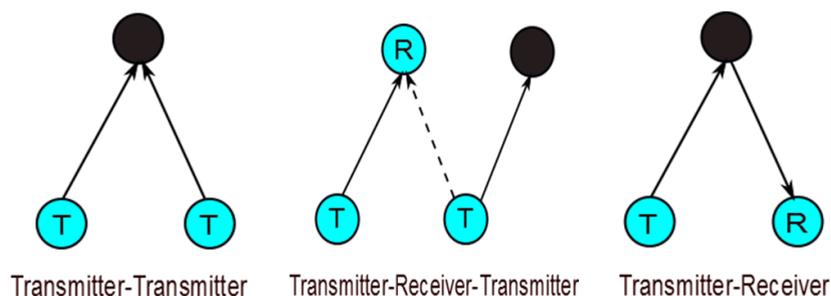


FIG. 4.4 – Les trois cas de conflit utilisés

#### 4.4.2.1 Description des cas de conflit utilisé dans le problème étudié

Pour éliminer les conflits entre les capteurs constituant notre réseau étudié, on a pris en considération tout les cas possible de conflit parmi ceux qui sont décrits précédemment. Dans notre modèle, nous avons exploité que trois cas illustrés dans la figure 4.4, voici quelques exemples explicatifs de ces cas utilisés :

- **Cas 1** : deux nœuds différents transmettent au même temps vers le même nœud

**Exemple 4.1** dans le graphe  $G$ , tous les nœuds capteurs qui transmettent vers le coordinateur  $C_2$  sont tous en conflit.

- **Cas 2** : deux nœuds qui transmettent simultanément vers le même nœud, et l'un des deux transmet aussi vers un autre nœud.

**Exemple 4.2** le coordinateur  $C_2$  est entrainé de transmettre et de recevoir au même temps des données des nœuds capteurs liés à lui.

- **Cas 3** : un nœud est en communication avec un autre nœud, et ce dernier est entrainé de transmettre aussi vers un autre nœud.

**Exemple 4.3** le nœud  $B_1$  transmet des données vers le coordinateur  $C_1$  et  $C_3$ . Ce dernier reçoit au même temps les données des autres nœuds qui se trouvent à sa portée radio.

#### 4.4.2.2 Algorithme de recherche de conflit utilisé pour le problème étudié

Variable	Description
Ord	Ord(GTS, List <sub>c</sub> ) contient la liste des capteurs qui partagent la même couleur ou GTS
Conf	variable booléenne
$L_i$	Lien de communication du capteur i
$L_j$	Lien de communication de capteur j

TAB. 4.1 – Description des variables

---

#### Algorithm 1 Fonction de recherche de conflit

---

```

Conflit (ord(GTS, Listc), j) /*Ord(GTS, Listc) contient la liste des capteurs qui partagent la même couleur ou GTS*/
1 : DEBUT
2 : conf ← faux ; /*variable initialisée à non conflit*/
3 : i ← 1 ;
4 : TANTQUE(i < length (Listc)) faire
5 : SI( $L_i \cap L_j \neq \emptyset$ ) alors
6 :     conf ← vrai ;
7 :     i ← length(Listc) ++ ;
8 : FIN SI
           Retourner(conf) ;
9 : FIN TANTQUE
10 : FIN.

```

---

#### 4.4.3 Représentation graphique du graphe de conflit GC

Le graphe de conflits est représenté par  $GC(E, E_c)$ , où les nœuds sommets du graphe des conflits  $E' = L_{C1SB}, L_{C21}, L_{C31}, L_{A1}, \dots, L_{A9}, L_{B1}, \dots, L_{B7}$  correspondent aux liens de communications dans G, et les liens  $E_c$  les conflits possibles entre les différents liens du graphe G (ou les sommets E du graphe GC). Comme résultat, le graphe des conflits construit prend en charge les trois (03) cas de conflits possibles. Par conséquent, notre protocole ordonnance l'accès au médium en évitant tous les conflits possibles. Le graphe de conflit obtenu est représenté par la figure 4.5 suivante :

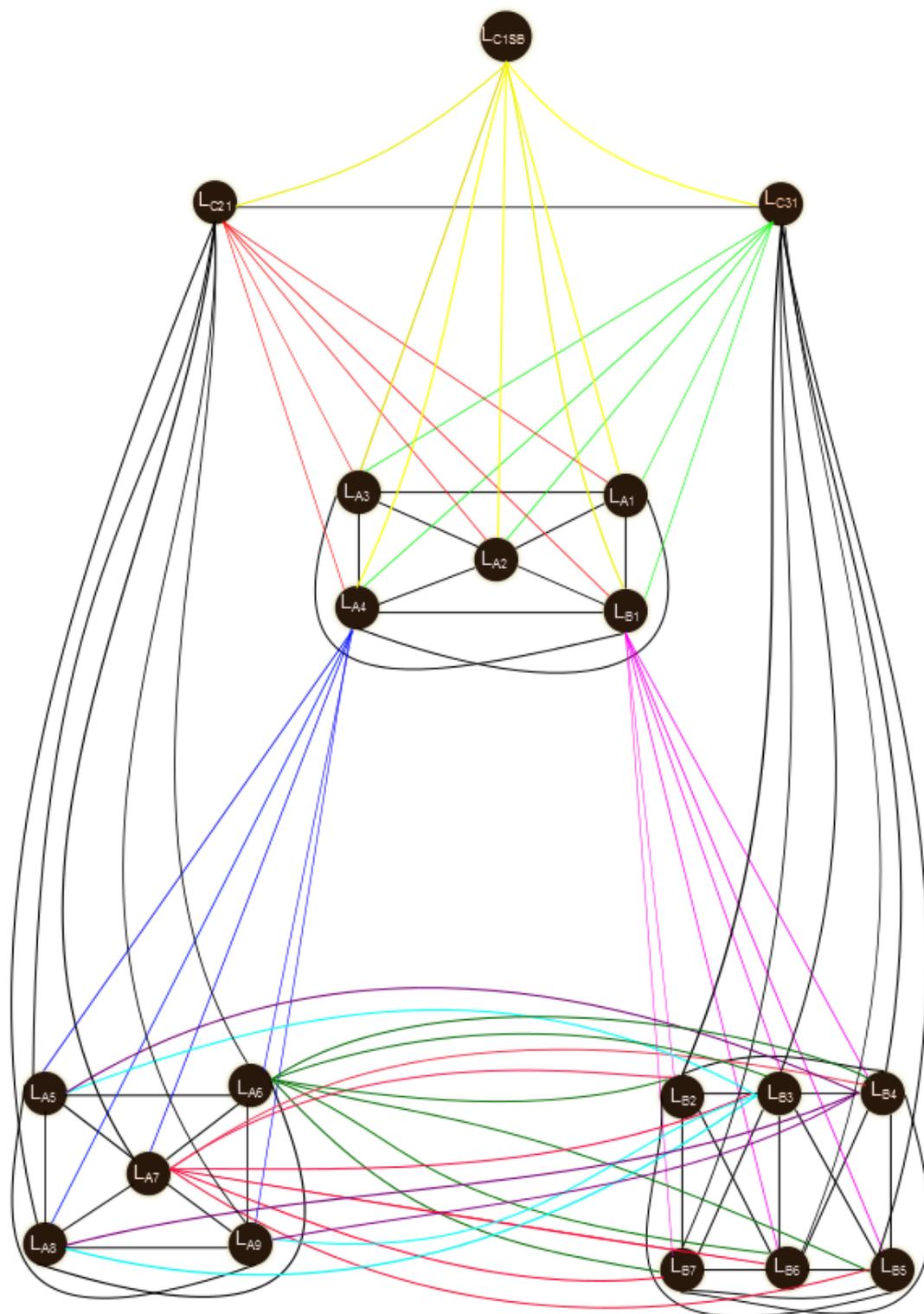


FIG. 4.5 – Graphe de conflit GC

#### 4.4.4 Représentation matricielle du graphe de conflit

Nous pouvons représenter notre graphe de conflit (GC) par une matrice d'adjacence carrée et symétrique  $M(i,j)$  dont les lignes  $i$  et les colonnes  $j$  sont les sommets du graphe (GC), et les valeurs de cette matrice sont binaires représentées comme suit :

'1' signifié que les sommets  $i$  et  $j$  sont adjacents, d'où le conflit

'0' signifié que les sommets  $i$  et  $j$  ne sont pas adjacents (pas de conflit)

La figure 4.6 représente la matrice d'adjacence  $M$ .

	L <sub>C21</sub>	L <sub>C31</sub>	L <sub>A1</sub>	L <sub>A2</sub>	L <sub>A3</sub>	L <sub>A4</sub>	L <sub>A5</sub>	L <sub>A6</sub>	L <sub>A7</sub>	L <sub>A8</sub>	L <sub>A9</sub>	L <sub>B1</sub>	L <sub>B2</sub>	L <sub>B3</sub>	L <sub>B4</sub>	L <sub>B5</sub>	L <sub>B6</sub>	L <sub>B7</sub>
L <sub>C21</sub>	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
L <sub>C31</sub>	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
L <sub>A1</sub>	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
L <sub>A2</sub>	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
L <sub>A3</sub>	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
L <sub>A4</sub>	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
L <sub>A5</sub>	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
L <sub>A6</sub>	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
L <sub>A7</sub>	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
L <sub>A8</sub>	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
L <sub>A9</sub>	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
L <sub>B1</sub>	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
L <sub>B2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
L <sub>B3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
L <sub>B4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
L <sub>B5</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
L <sub>B6</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
L <sub>B7</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0

FIG. 4.6 – Matrice d'adjacence  $M$

## 4.5 Algorithmes d'ordonnement d'accès sans conflits

L'objectif de cet algorithme est de trouver un ordonnancement déterministe qui assigne à chaque capteur un slot de temps pour transmettre ses données personnelles directement à son parent en utilisant un protocole déterministe que nous appelons Inter-PAN Schudeling (IPSP). L'idée de cet algorithme est d'ordonner les nœuds de communication du réseau de capteur sans fil en utilisant un protocole déterministe que nous appelons Inter-PAN Schudeling (IPSP).

Variable	Description
$K$	Nombre de couleurs
Ord	La liste des capteurs avec les GTS associés
PAN1	Le PAN de plus haut nombre de fils
$C_i$	Le capteur de degré minimal
$Niv_0$	Niveau le plus bas de l'arbre A
$L_i$	Lien de communication venant du capteur $i$ vers son parent.
List <sub>c</sub>	Liste de capteurs feuilles dans l'arbre A.
$G(V, E)$	Le graphe $G$ du réseau déployé.
$A(V, E')$	l'arbre de couverture A.
$GC(E, Ec)$	Le graphe de conflits $GC$ .
Ord <sub>L</sub>	Liste des couple $\langle L_i, TS_{L_i} \rangle$ à ordonner.

TAB. 4.2 – Description des variables

---

**Algorithm 2** InterPAN Scheduling Protocol (IPSP)
 

---

**Entrees :**  $G(V,E)$ ,  $GC(E,Ec)$ ;  $A(V,E')$

**Sorties :**  $K, Ord$ .

**1 :** DEBUT

**2 :**  $K \leftarrow 0$ ;

**3 :**  $Niv_0 \leftarrow$  niveau le plus bas de l'arbre  $A$ ;

**4 :**  $PAN1 \leftarrow$  Le PAN de plus haut nombre de fils;

**5 :** Choisir aléatoirement un capteur ( $C_i$ ) non ordonnancé de PAN1 et lui attribuer une couleur :

$C_i \leftarrow K++$ ; tel que  $C_i \cap Ord = \emptyset$ ;    */\* $C_i$  est le capteur de degré minimal\*/*

**6 :**  $Ord(GTS1, C_i)$ ;

**7 :** POUR( $j=1$  jusqu'à  $length(Niv_0)$ ) **faire**

**8 :**         **SI**( $Conflit(Ord(GTS_k, List_c), j)=faux$ ) **alors**

**9 :**                          $Ord(GTS_k, C_j)$ ;

**10 :**         **FIN SI**

**11 :** **FIN POUR**

**12 :** **SI**( $Niv_0 <> 0$ )**alors**

Chercher les nœuds du niveau  $Niv_1$  qui peuvent avoir la même couleur qu'un nœud de  $Niv_n$ ;

**13 :** **SINON**

Aller à 4;

**14 :** **FIN SI**

**15 :** **SI**( $Niv=sommet$  de l'arbre)**alors**

Retourner  $Ord$ ;

**16 :** **FIN SI**

**17 :** **FIN**

---

### 4.5.1 Description de l'algorithme d'ordonnancement IPSP

Notre mécanisme d'accès prend en considération la contrainte des temps de communications, et l'évitement des collisions. Pour se faire, on s'est basé sur la technique de division temporaire pour un accès multiple à un canal de communication, connu sous le sigle de TDMA. De plus, on a proposé la réutilisation spatiale des slots de temps, par les nœuds qui n'interfèrent pas entre eux, en utilisant les graphes de conflits.

La station de base exécute le protocole IPSP pour ordonnancer le premier accès au canal de communication selon trois PAN : le PAN1 regroupe les nœuds fils ( $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1$ ), qui sont liés au coordinateur  $C_1$ , et le PAN2 regroupe ceux qui sont liés au coordinateur  $C_2$  ( $A_5, A_6, A_7, A_8, A_9$ ) et les nœuds ( $B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7$ ) liés au coordinateur  $C_3$  sont représentés par le PAN3.

Dans IPSP, la transmission des nœuds de niveau bas (nœuds raccordés à un coordinateur) doit se faire avant la transmission des parents (coordinateurs). Invoquer le principe de coloriage en commençant par les nœuds de degrés minimal afin de maximiser la réutilisation des couleurs (slots de temps).

### 4.5.2 Application de notre algorithme d'ordonnancement

Pour bien expliquer le fonctionnement de notre algorithme, nous avons le réseau initial (graphe  $G$ ) structurés en arbre logique illustré dans la figure 4.3 ainsi que le graphe des conflits  $GC$  correspondant au graphe  $G$ . Le  $GC$  est construit à base des cas de conflits cités dans la figure 4.4.

Le premier lien (capteur) le plus loin dans l'arbre, et qui a un degré inférieur va transmettre en premier le slot GTS1 et on cherche un autre lien dans le graphe de conflit (voir la figure 4.5) qui n'est pas adjacent avec lui et qui se trouve toujours au niveau bas du graphe  $G$  en gardant l'ordre croissant de degré des sommets pour lui affecter le même GTS1. On répète la même itération jusqu'à l'obtention d'un graphe de conflit coloré qui est présenté par la figure 4.7 et un graphe  $G$  ordonnancé avec des GTS en termes de communication qui est illustré dans la figure 4.8.

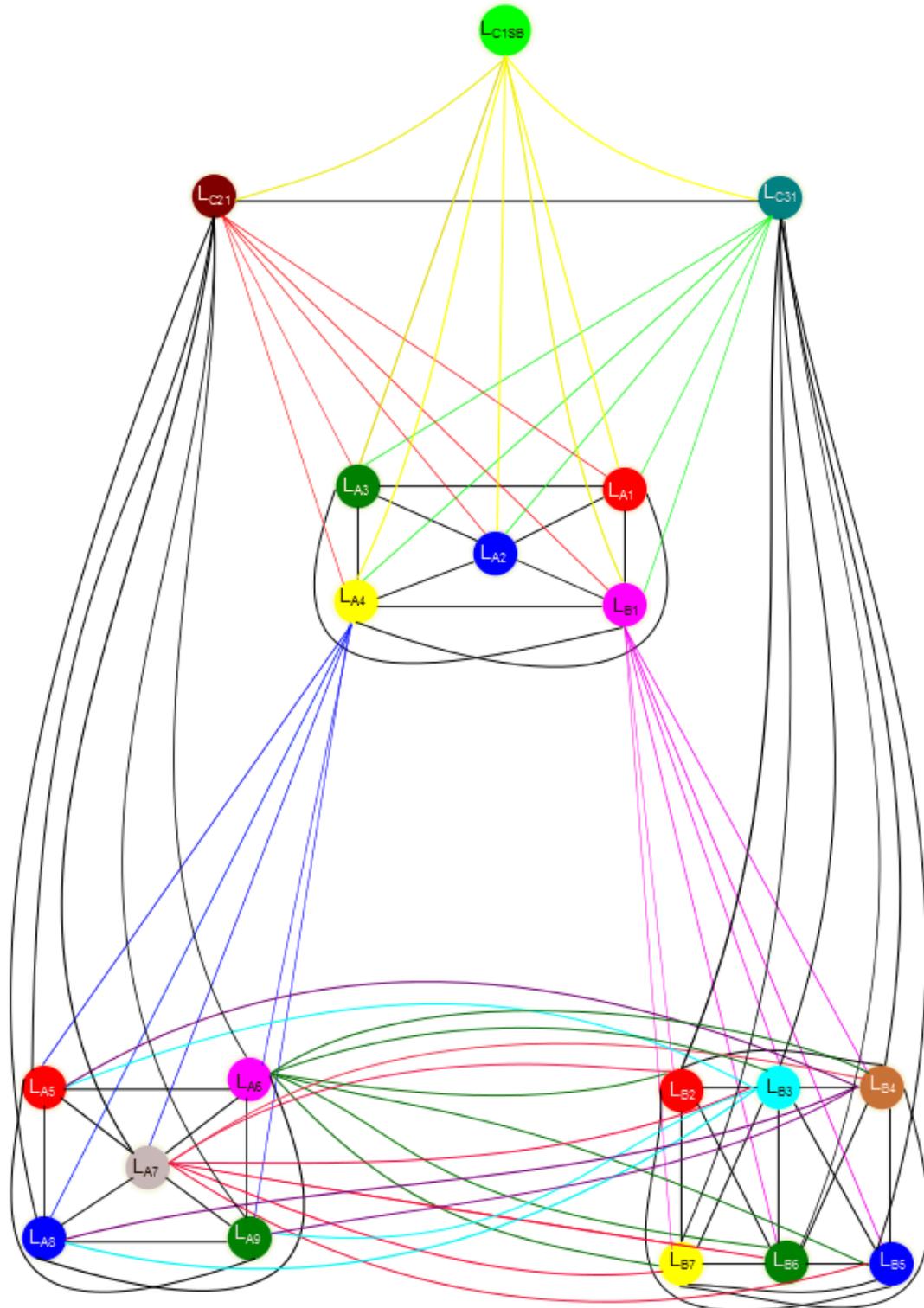


FIG. 4.7 – Graphe de conflit coloré avec l’algorithme d’ordonnancement

Après l’exécution de notre algorithme d’ordonnancement, la station de base (SB) transmet au coordinateur le planning d’ordonnancement et chaque coordinateur, transmet à

son tour le planning à ses fils jusqu'aux nœuds les plus éloignés du réseau. De cette manière, chaque nœud se réveille juste le moment de sa transmission des données.

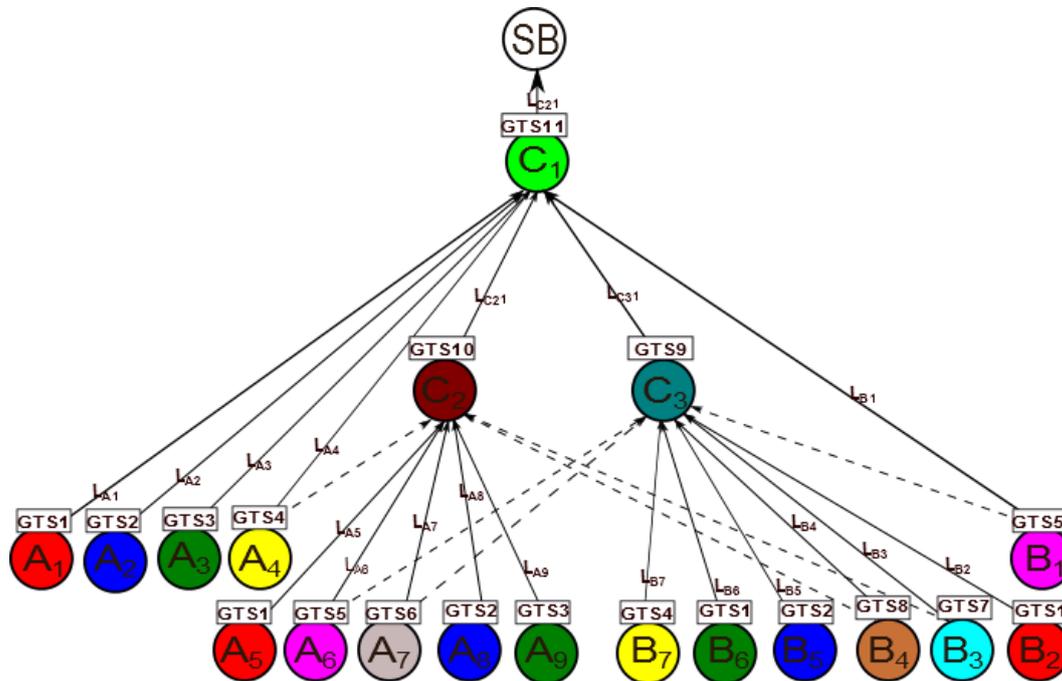


FIG. 4.8 – Graphe G ordonné avec l’algorithme d’ordonnement IPSP

### 4.5.3 Allocation des slots selon l’algorithme IPSP (InterPAN Scheduling Protocole)

Un superslot (Supertrame) dans un algorithme d’ordonnement est une collection de slots de temps consécutifs tels que chaque nœud contient au moins une information au début du superslot pour la transmettre à la station de base SB. Puisque deux nœuds ont la même couleur, alors ils peuvent transmettre en même temps. Le nombre de slots dans un superslot est au plus égale au nombre de couleurs utilisées pour colorer le réseau. D’après notre algorithme d’ordonnement, nous avons une trame qui contient trois (03) superslots, dont le premier superslot est réduit en huit (08) slots de temps tel que chaque slot peut être utilisé au maximum par trois nœuds.

Le schéma dans la figure 4.9 suivante présente la trame avec les superslots obtenu à partir de l’algorithme d’ordonnement.

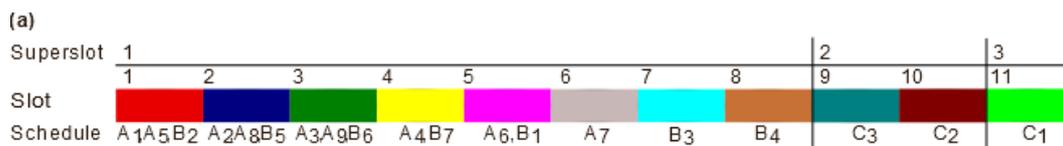


FIG. 4.9 – Trame d’ordannancement de IPSP

## 4.6 Algorithme de coloration standard

Vue le principe d’utilisation de l’algorithme Welsh et Powell décrit précédemment dans chapitre 3, et l’efficacité des résultats qu’il nous donne, nous avons opté pour l’utiliser dans notre modèle.

### 4.6.1 Application de l’algorithme de coloration standard de Welsh et Powell

Une fois tous les nœuds sont ordonnancés pour transmettre leurs données personnelles, chacun dans son slot de temps, la station de base exécute l’algorithme standard afin de permettre une transmission multi-sauts.

**Remarque :** La somme des degrés de tous les sommets d’un graphe est égale à deux fois le nombre d’arêtes du graphe.

sommet	L <sub>C15B</sub>	L <sub>C21</sub>	L <sub>C31</sub>	L <sub>A1</sub>	L <sub>A2</sub>	L <sub>A3</sub>	L <sub>A4</sub>	L <sub>A5</sub>	L <sub>A6</sub>	L <sub>A7</sub>	L <sub>A8</sub>	L <sub>A9</sub>	L <sub>B1</sub>	L <sub>B2</sub>	L <sub>B3</sub>	L <sub>B4</sub>	L <sub>B5</sub>	L <sub>B6</sub>	L <sub>B7</sub>	Total
Degré	7	12	13	7	7	7	12	8	12	12	8	8	13	9	12	12	9	9	9	186
Ordre	L <sub>C31</sub>	L <sub>B1</sub>	L <sub>C21</sub>	L <sub>A4</sub>	L <sub>A6</sub>	L <sub>A7</sub>	L <sub>B3</sub>	L <sub>B4</sub>	L <sub>B2</sub>	L <sub>B5</sub>	L <sub>B6</sub>	L <sub>B7</sub>	L <sub>A5</sub>	L <sub>A8</sub>	L <sub>A9</sub>	L <sub>C15B</sub>	L <sub>A1</sub>	L <sub>A2</sub>	L <sub>A3</sub>	
couleur	C1	C2	C3	C4	C2	C5	C4	C6	C3	C7	C8	C9	C1	C7	C8	C5	C6	C7	C8	

FIG. 4.10 – Résultat de l’application de l’algorithme standard

Calcul de nombre chromatique pour l’algorithme standard

$$d_{min} = 7; d_{max} = 13; n=19; m=93;$$

$$\alpha(G) = 3$$

$$\omega(G) = 8$$

$$\gamma^+(G) = \min \{n + 1 - \alpha(G), k, d_{max} + 1\} = 9$$

$$\gamma^-(G) = \max \left\{ \frac{n}{n-d_{min}}, \quad \omega(G), \quad \frac{n^2}{n^2-2m}, \quad \frac{n}{\alpha(G)} \right\} = 9$$

avec

$$\gamma^- \leq \gamma \leq \gamma^+$$

Nous remarquons que le nombre chromatique  $\gamma(G) = 9$  est égale au nombre de couleurs  $k = 9$  trouvé dans le graphe de conflit coloré par l'algorithme standard.

Après l'application de l'algorithme standard qui est défini dans le chapitre précédent sur le graphe de conflit GC, nous avons obtenu le graphe de conflit coloré GC donné par la figure 4.11 suivante :

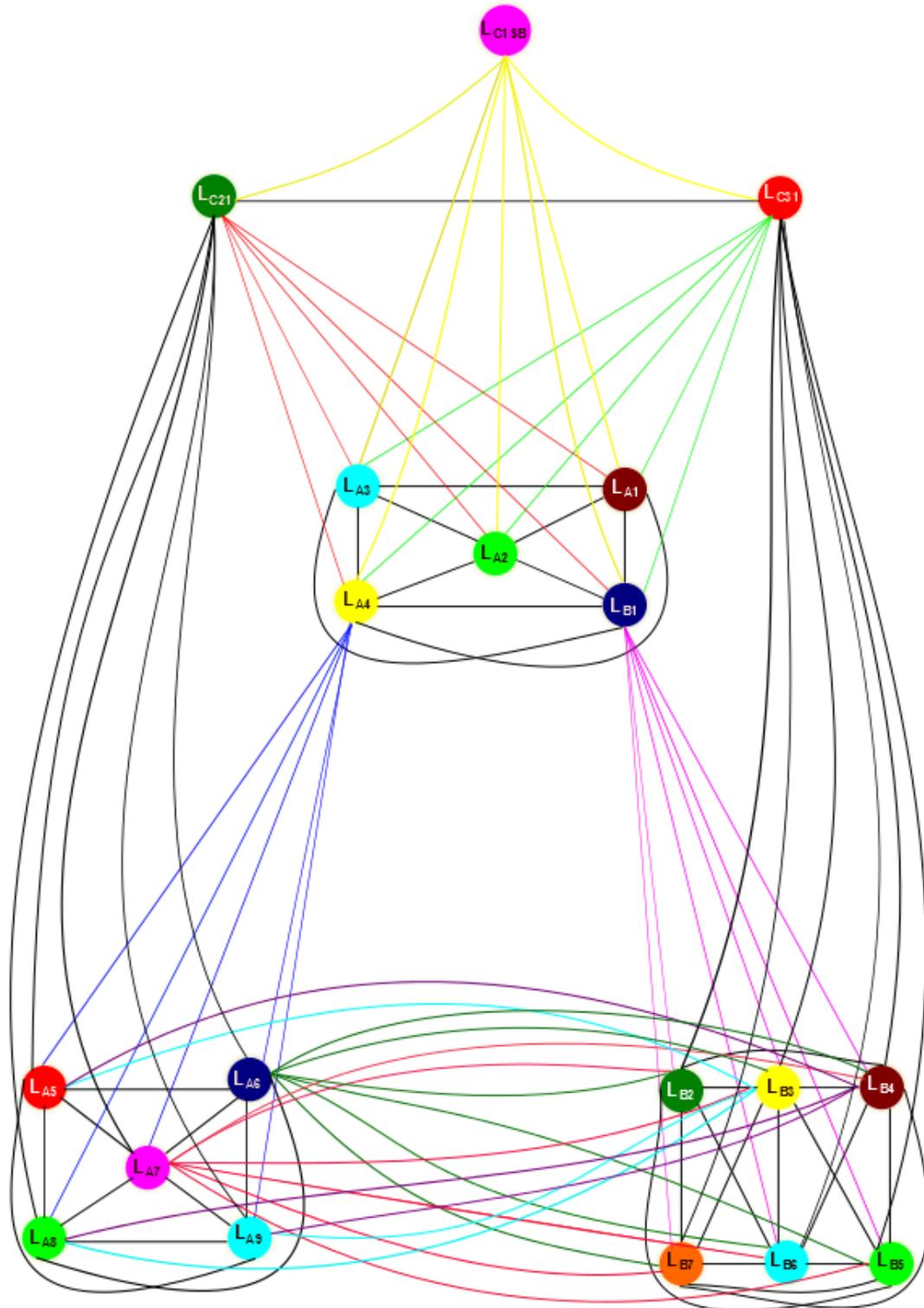


FIG. 4.11 – Graphe de conflit coloré avec l’algorithme standard

En appliquant aussi l’algorithme standard de Welsh sur le graphe  $G$ , nous avons obtenu le graphe  $G$  coloré qu’est représenté par la figure 4.12 suivante

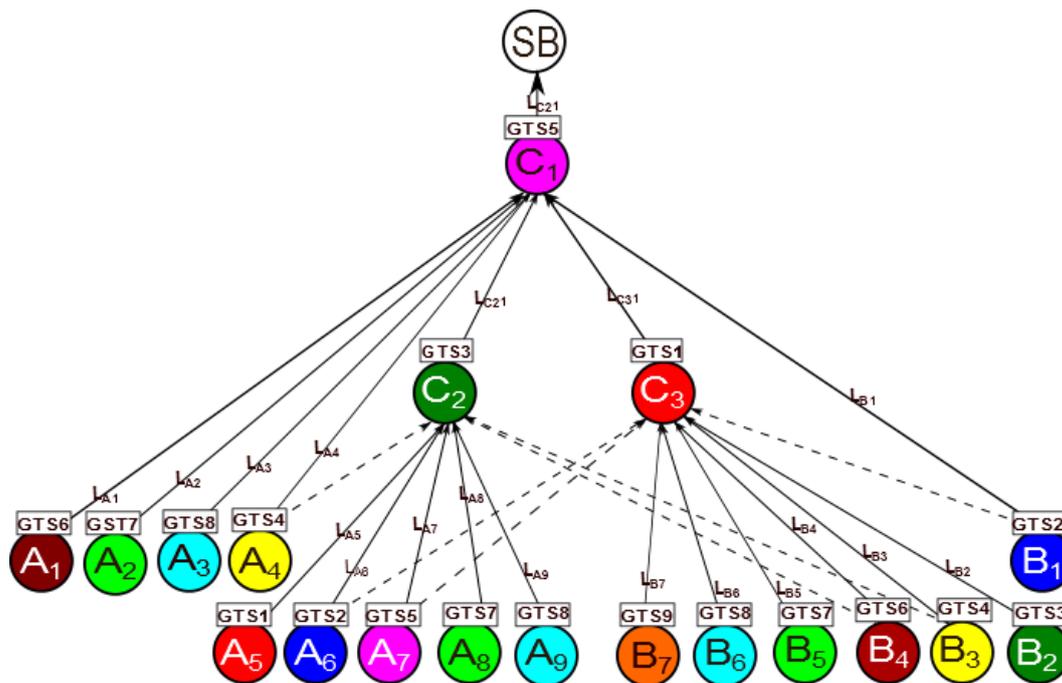


FIG. 4.12 – Graphe G coloré avec l’algorithme standard

### 4.6.2 Allocation de slots selon l’algorithme standard

Le schéma dans la figure 4.13 suivante présente la trame avec les superslots obtenu à partir de l’algorithme standard.

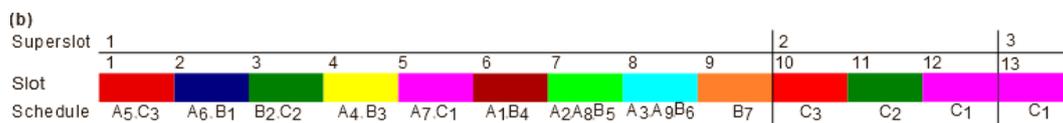


FIG. 4.13 – Trame avec l’algorithme standard

## 4.7 Comparaison des résultats

Le protocole IPSP utilisé pour l’ordonnancement, nous donne un minimum de slots de temps en respectant la contrainte des PAN telle que les nœuds du PAN1 ne transmettent jusqu’à ce que les nœuds du PAN2 transmettent leurs informations en premiers. Par contre, un protocole non déterministe qui essaye seulement d’avoir le minimum de slots de temps dans une trame TDMA (pour minimiser la communication du réseau), nous donne plus de slots par rapport à notre protocole IPSP.

## 4.8 Evaluation des performances d'IPSP

Afin d'évaluer les performances de notre algorithme IPSP déterministe qui utilise le protocole MAC pour l'ordonnancement des accès dans les réseaux de capteurs, nous avons développé notre propre simulateur, à évènement discrets, en utilisant le logiciel MATLAB, et le comparé avec l'algorithme standard de Welsh ainsi que TDMA pour montrer l'intérêt de l'utilisation des graphes de conflits et la réutilisation des slots de temps afin de minimiser le temps de communication du réseau.

## 4.9 Résultats de simulation

Nous avons choisi comme paramètres de performances : le nombre de slots (taille de la supertrame) qu'engendrent les protocoles pour minimiser la durée de la supertrame.

Afin de valider notre solution, nous avons évalué le nombre de slots que peut avoir une supertrame. Notre but est de montrer l'intérêt de graphes des conflits qu'on a utilisé dans notre algorithme d'ordonnancement IPSP afin de maximiser la réutilisation des slots de temps.

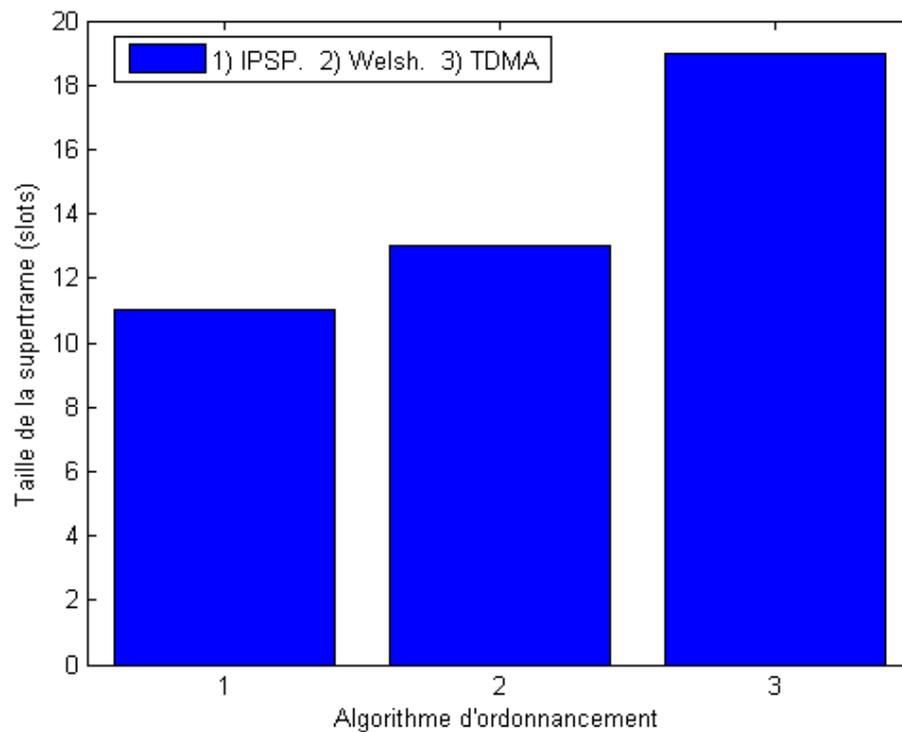


FIG. 4.14 – Comparaison du nombre de slot entre IPSP, Welsh et TDMA

La figure 4.14 montre une grande différence entre notre algorithme d'ordonnancement IPSP par rapport à celui qui utilise l'ordonnancement de Welsh et celui de TDMA.

Notre algorithme offre moins de slots pour transmettre toutes les données vers la station de base. Cette différence est expliquée par le fait que notre algorithme IPSP ne s'intéresse pas seulement à trouver le nombre de slot minimal, mais de chercher le maximum de réutilisations spatiales entre les capteurs sans conflits. On peut constater qu'avec la réutilisation spatiale des slots de temps dans IPSP nous donne un nombre minimal du slots.

La figure 4.15 suivante s'agit d'une simulation de 1, 2, 4 et 8 pannes dans des rounds différents. Nous avons simulé un nombre de panne qui est égal à 8 par l'algorithme IPSP ainsi que par Welsh et TDMA.

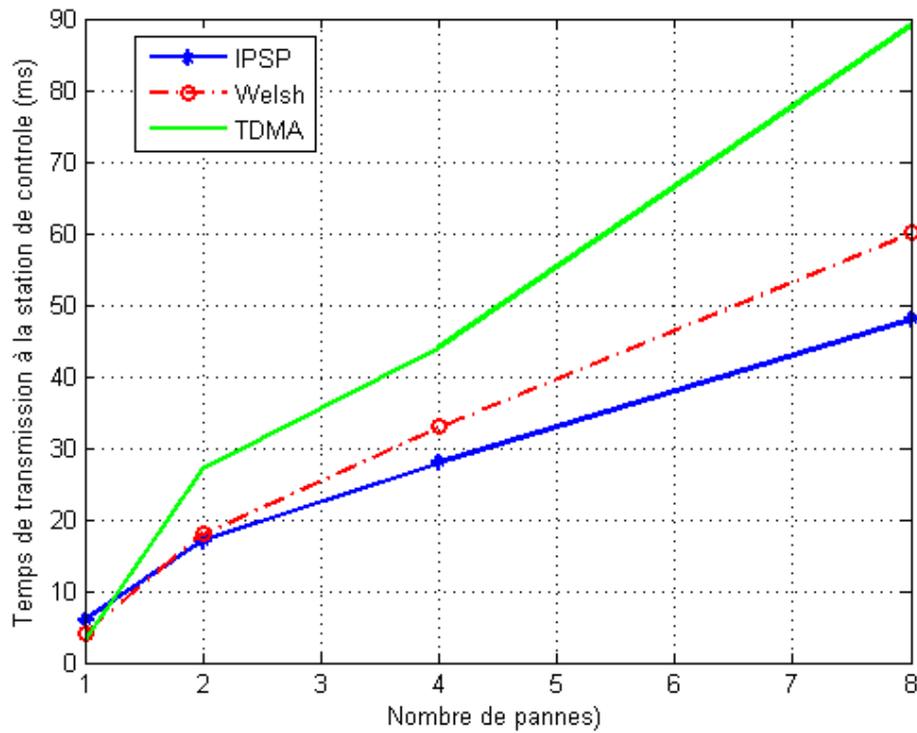


FIG. 4.15 – Comparaison de temps d'enregistrement des pannes par IPSP, Welsh et TDMA

Si nous considérons le temps de transmission à la station de contrôle en (ms), nous trouvons d'après les résultats de simulation illustrés par les courbes graphique dans la figure 4.15, que le temps de transmission pour le même nombre de pannes par IPSP est plus réduit (50ms) , par rapport à celui de Welsh, qui est égale à 60 ms et celui de protocole TDMA qui atteint 90ms. On remarque que notre protocole (IPSP) offre un temps de transmission meilleur en le comparant à Welsh et TDMA.

## 4.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation de la chaîne de production comme étant problèmes d'ordonnancement après avoir installé un RCSF, puis nous avons développé un algorithme d'ordonnancement (IPSP) pour notre modèle qui utilise un protocole déterministe à base de TDMA dans les réseaux de capteurs sans fil. Ce protocole utilise des techniques mathématiques (coloriage de graphe, graphe de conflits, etc.) pour un ordonnancement simultané entre plusieurs capteurs en utilisant le même slot de temps. Les résultats de simulation ont montré l'intérêt de IPSP dans la minimisation du temps de communication.

---

# Conclusion et perspectives

---

## Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à mettre en place un réseau de capteur sans fils pour le suivi automatique de l'unité de production de l'huile au niveau de l'entreprise CO.GB *Labelle*, Bejaia, à fin de détecter l'apparition des pannes des machine en temps réel.

En effet, nous avons installé des capteurs sans fils sur toute la chaine pour avoir un réseau que nous avons modélisé par la suite sous forme d'un graphe normal avec une architecture prévu par le standard IEEE 802.15.4, en introduisant la notion des PANs, puis nous avons obtenu un graphe de conflits en éliminant tout les liens d'interférences. Nous avons également proposé un algorithme de coloriage par ordonnancement en tenant compte d'un protocole déterministe MAC IPSP à base de TDMA pour les RCSFs, qui utilise des techniques mathématiques (coloriage de graphe, graphe de conflits, etc.) pour un ordonnancement simultané entre plusieurs PANs, et nous avons comparé les résultats obtenus par cet algorithme avec ceux obtenus par l'algorithme de coloriage standard. En effet, nous avons constaté que l'installation d'un réseau de capteurs sans fil va réduire le temps de communication, ce qui améliore les performances de la chaine de production.

Nous proposons comme perspectives :

- Etude de la mise en place des capteurs sans fils sur les 5 lignes de conditionnement au niveau de toute l'unité de production ;
- Validation analytiques en utilisant les RDPs ;
- Prise en compte de cas d'utilisation de plusieurs canaux de communication ;
- Rajouter d'autres scénario de cas de simulation.

---

# Glossaire

---

**Graphe (Graph)** : un graphe est un ensemble de points, dont certaines paires sont reliées par des lignes. Les points sont appelés sommets et les lignes sont nommées arêtes.

**Sommet** (Vertex, pluriel Vertices) : extrémité d'une arête ou d'un arc.

**Arc** (Arc) : une arête orientée relie deux sommets dans un graphe.

**Arête** (Edge) : une arête relie deux sommets dans un graphe. Nous appelons ces deux sommets les extrémités de l'arête.

**Ordre** (Order) : l'ordre d'un graphe est le nombre de ses sommets.

**Simple** (simple) : un graphe est dit simple, s'il ne contient pas de boucle et s'il n'y a pas plus d'une arête reliant deux mêmes sommets.

**Complet** (Complete) : dans un graphe complet, toutes les paires de sommets sont adjacentes.

**Adjacent** (Adjacent) : deux sommets sont adjacents s'ils sont reliés par une arête. On qualifie souvent de voisins deux sommets adjacents.

**Biparti** (Bipartite) : un graphe est biparti si ses sommets peuvent être divisés en deux ensembles  $X$  et  $Y$ , de sorte que toutes les arêtes du graphe relient un sommet dans  $X$  à un sommet dans  $Y$ .

**Boucle** (Loop) : arête ou arc partant d'un sommet et allant vers lui-même.

**Clique** (Clique) : sous-graphe complet d'un graphe  $G$ . L'ordre de la plus grande clique de  $G$  est noté  $\alpha(G)$ .

**Stable** (Stable) : un stable d'un graphe  $G$  est un sous-graphe de  $G$  sans arête. L'ordre du plus grand stable de  $G$  est noté  $W(G)$  et s'appelle nombre de stabilité.

**k-colorable** (k-colorable) : un graphe est dit k-colorable si à chacun de ses sommets peut être assignée une parmi  $k$  couleurs de sorte qu'à deux sommets adjacents soit assignée une couleur différente. Cette assignation est appelée coloration.

**Partiel** (Spanning Subgraph) : le graphe obtenu en enlevant des arêtes d'un graphe  $G$  est appelé graphe partiel.

---

# Bibliographie

---

- [1] F. Abdelfatah. *Développement d'une bibliothèque de capteurs*. Rapport de master en informatique, Université Montpellier 2, 25 avril 2008.
- [2] M. Atmani. *Proposition et validation formelle d'un mécanisme d'accès au medium pour les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [3] A. Ben Nacef. *Relais coopératifs dans un réseau de capteurs : performances limites et stratégies*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, jeudi 24 novembre 2011.
- [4] A. Boudjadar. *Plateforme basée agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil*. Mémoire de magistère en informatique, Université 20 Aout 55 de Skikda, 2010.
- [5] S. Coler Ergn, P. Varaiya. *TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks*. Article de journal, publié le 27 mai 2009.
- [6] S. Collart-Dutilleul. *Les réseaux de petri P-temporels : modélisation et validation d'exigences temporeles..* Mémoire d'habilitation à diriger des recherches en automatique et informatique, Université des sciences et technologies de Lille, 28 novembre 2008.
- [7] D. Dessales. *Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 8 décembre 2011.
- [8] D. Dessales, A-M. Poussard, R. Vauzelle, N. Richard, F. Gaudaire, C. Martinsons. *Transmission Power Adaptation According to the Message Length for Wireless Sensor Networks in Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC*. Canada, 2011.

- 
- [9] C. Duran-Faundez. *Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 23 juin 2009.
- [10] P. Djukic, S. Valaee. *Delay aware link scheduling for multi-hop tdma wireless networks*. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*. vol.17, no.3 :870-883,2008.
- [11] O. Garet. *Introduction aux graphes*. Cours, Université de Nancy, 2007-2008.
- [12] HiKoB : Capteurs de terrain. <http://business.lesechos.fr/directions-generales/numerique/hikob-favorise-la-creation-et-l-aide-a-la-decision-7798.php>. Dernière consultation le 3 juin 2016.
- [13] L. Hung-Cuong. *Optimisation d'accès au médium et stockage de données distribuées dans les réseaux de capteurs*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- [14] B. Jean-Louis. *Simulation, systèmes de production, réseaux de petri, siman-arena*. Cours.
- [15] R. Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Juillet 2009.
- [16] O. Khemmoudj, L. Merrani. *Planification de la production au CCGB(complexe des corps gras de Bejaia)*. Mémoire d'ingénieur d'état en recherche opérationnelle, Université de Bejaia, 2000.
- [17] Mathématique facile. <http://www.mathematiquesfaciles.com/>. Dernière consultation le 15 juin 2016.
- [18] S. Moad. *La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. Etude bibliographique Master Recherche 2 en informatique, IFSIC-Rennes 1, 2008.
- [19] M.C. Abbas, R. Mokrani. *Résolution par la méthode directe du support d'un problème linéaire multiobjectifs, Application à l'unité CO.GB-UP08*. Mémoire d'ingénieur d'état en recherche opérationnelle, Université de Bejaia, 2002.
- [20] Q. Monnet. *Modèles et mécanismes pour la protection contre les attaques par déni de service dans les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 17 Juillet 2015.

- 
- [21] F. Mourchid. *Nouveau Modèle Pour Le Positionnement Des Senseurs Avec Contraintes De Localisation*. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées (Génie Informatique), Université de Montréal, avril 2010.
- [22] D.Mller. *Introduction à la théorie des graphes*. Cahier de commission romande de mathématique, 2012.
- [23] R. Pascal, H. Christophe. *Applications des réseaux de Petri*. Article de journal, France.
- [24] G. Pujolle. *Les réseaux*. 5<sup>me</sup> édition, Groupe Eyrolles, 2006.
- [25] C. Ramassamy. *Analyse des protocoles des Réseaux de capteurs sans-fil*. Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, 23 novembre 2012.
- [26] B. Rivollet, C-E. Serre. *Les réseeaux de capteurs* . Note de veille - Captiven, Tech2Market, juillet 2013.
- [27] S.M. Ross. *Introduction to Probability Models*, Academic Press, 1989.
- [28] E. Roxana Albu. *Architecture de communication pour les réseaux d'instrumentation sans fil*. Thèse de doctorat, Université Toulouse, 11 Juillet 2011.
- [29] Surveillance pour maintenance préventive. <http://www.ni.com/newsroom/release/ni-embedded-monitoring-products-minimize-downtime-prevent-structural-failure-and-analyze-fatigue/fr/>. Dernière consultation le 10 juin 2016.
- [30] S. Taouinet. *Théorie des graphes avancée*. Cours de Master1 en recherche opérationnelle, Université de Bejaia, 2014/2015
- [31] S. Tilak, N.B. Abu-Ghazaleh, W.Heinzelman. *A taxonomy of wireless micro-sensor network models*. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review archive*, 6(2), 28-36 . 2002.
- [32] T. Val, E. Campo, A. Van Den Bosche. *Technologie ZigBee 802.15.4 Protocoles, topologies et domaines d'application*. Edition T.I, Toulouse.
- [33] B. Yeart. *Files d'attente*. Cahier de mathématiques appliquées n 14.
- [34] . ZigBee Alliance, [www.ZigBee.org](http://www.ZigBee.org). Dernière consultation le 16 juin 2016.

# Annexe

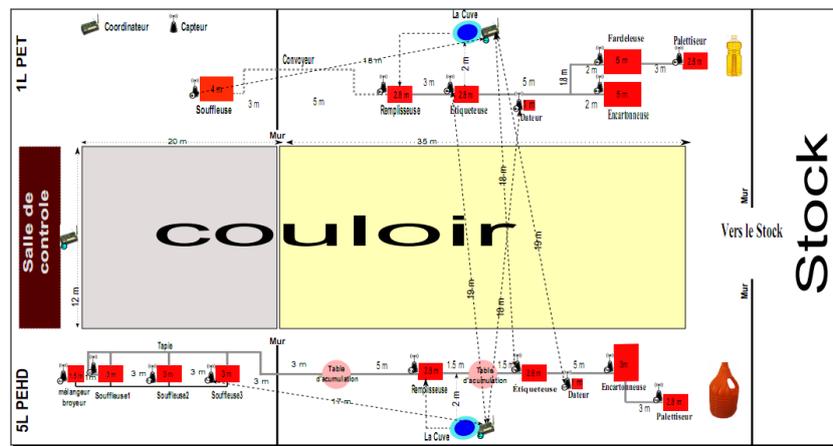


FIG. 4.16 – Schéma générale de la chaîne de production après l'installation des capteurs

## Résumé

---

Dans le cadre de ce projet, notre problématique porte sur la possibilité de mettre en place un réseau de capteurs sans fil pour le suivi de l'unité de production de l'huile au niveau de l'entreprise CO.GB *Labelle*, Bejaia. Ce travail consiste à proposer l'architecture globale du réseau de capteurs. Nous avons proposé de mettre en place plusieurs PAN (Personal Area Network). Ce type d'architecture est prévu par le standard IEEE 802.15.4e. Le problème majeur et qui est ouvert, c'est de synchroniser la communication parallèle entre les PANs. Nous avons modélisé ce réseau par un graphe simple, puis par un graphe de conflits. Par la suite, nous avons proposé un algorithme de coloriage de IPSP (Inter PAN Scheduling Protocol) graphe en tenant compte des spécificités des réseaux de capteur. La solution proposée n'est pas de trouver un nombre chromatique minimal, mais de trouver un nombre de slots (GTS : Guaranteed Time Slot) de communication minimal et sans risque d'interférence.

**Mots clés :** Automatisation de contrôle, RCSF, Graphe de Conflit, Coloriage d'un Graphe, Ordonancement IPSP.

---

## Abstract

---

As part of this project, our problem concerns the possibility of setting up a wireless sensor network for monitoring the unit of oil production at the company CO.GB *Labelle*, Bejaia. This work is to provide the overall architecture of the sensor network. It was proposed to set up several PAN (Personal Area Network). This type of architecture is provided by the IEEE standard 802.15.4e. The major problem and that is open is to synchronize parallel communication InterPANs. This network was modeled by a normal graph, then a conflict graph. Subsequently, a graph coloring algorithm has been proposed taking into account the specificities of sensor networks. The proposed solution is not to find a minimal chromatic number, but to find a number of slots (GTS : Guaranteed Time Slot) minimal communication and without interference.

**Keywords :** Control automation, WSN, conflict graph, coloring of a graph, Scheduling IPSP.