

```
«««< HEAD =====
»»»> 99163397f76421fd03f37178fa50a7ded25b153f
«««< HEAD           =====                                »»»>
99163397f76421fd03f37178fa50a7ded25b153f
```

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Le progrès technologique qu'a connu le domaine des réseaux sans fil et de la micro-électronique ont permis le développement de micro-composants intégrant des dispositifs de captage, de calcul et de communication sans fil, dans un même circuit, de petite dimension et à cout réduit nommé capteur sans fil intelligent, ces nouveaux composants ont donné naissance à un tout nouveau type de réseaux, il s'agit des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), un réseau basé sur l'effort collaboratif entre plusieurs capteurs sans fil, ces réseaux initialement dédiés au domaine militaire, ont actuellement envahi presque tous les secteurs, de l'industrie, à la médecine, en passant par le domaine des transports et l'environnement.

A travers ce chapitre, nous allons présenter une description globale de ces réseaux, leurs architectures, leurs caractéristiques, ainsi leurs domaines d'utilisation.

1.2 Les réseaux sans fil

Les réseaux sans fil se sont de plus en plus répandu au fil des années, les liaisons filaires permettant l'accès au réseau se font désormais rare, cela est due à la flexibilité offerte par le sans fil et la forte apparition des unités de calcul mobiles (smartphones, tablettes, laptops, PDA...), plusieurs normes et technologies de transmission sans fil se sont développées (WiFi, BlueThooth, ZigBee...) selon le domaine d'utilisation et la portée de la transmission.

Les réseaux sans fil peuvent être classé selon plusieurs critères, nous nous intéressons à leur classement en deux grandes classes selon la présence ou l'absence d'une infrastructure administrant le réseau.

- **Les réseaux avec infrastructure** : Dans ce type de réseaux, une infrastructure est mise en place pour l'administration du réseau, les périphériques au sein ce réseau ne peuvent pas communiquer directement entre eux sans passer par cette infrastructure.

- **Les réseaux sans infrastructure** : Les réseaux sans infrastructure appelés aussi réseaux Ad-Hoc, ne comportent pas d'infrastructure de gestion, tous les nœuds du réseau peuvent être mobiles et communiquent directement entre eux, les nœuds s'auto-organisent afin d'effectuer les processus de routage et d'acheminement de données, cette décentralisation offerte par ces réseaux ouvre la voix à plusieurs types d'applications, les réseaux de capteurs sans fil dont nous allons présenter est un type particulier de ces réseaux.

1.3 Les capteurs sans fil

1.3.1 Qu'est qu'un capteur ?

Un capteur sans fil est un objet physique de petite taille peu coûteux, sa fonctionnalité principale est de détecter et mesurer des phénomènes physiques l'environnant, ces données récupérées seront par la suite converties en données numériques pour une exploitation future. Un capteur est alimenté généralement par des batteries ne pouvant ni se recharger ni se remplacer dans la majorité des cas, ce qui rend la consommation énergétique un des défis majeurs pour la conception et le déploiement des réseaux de capteurs sans fil. La figure ci-dessous illustre un modèle réel de capteur sans fil :

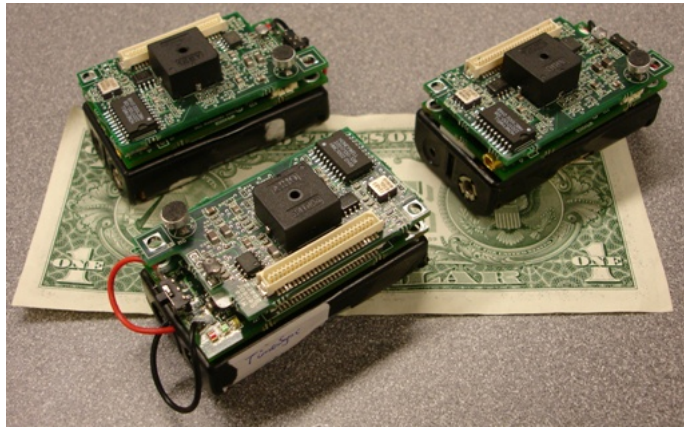


FIGURE 1.1 – Exemple d'un capteur sans fil

1.3.2 Architecture d'un capteur sans fil

Afin d'accomplir ses fonctions principales un capteur est généralement composé de quatre unités principales à savoir une unité de capture, de traitement, de communication et une unité d'alimentation.

- **Unité de capture** : L'unité qui caractérise le capteur selon son domaine d'application, elle permet de récupérer des grandeurs physiques à partir de l'environnement (température, pression, son...) à travers des capteurs, ces grandeurs seront par la suite converties en grandeurs numériques pour être exploitées par l'unité de

traitement, cette unité est composée donc de deux sous unités, la première effectue les opérations de captage, la deuxième quant à elle, elle s'occupe de la conversion des données analogiques acquises en données numériques.

- **Unité de traitement** : Il s'agit de l'unité intermédiaire entre l'unité de capture et l'unité de communication, elle est dotée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique, son rôle est de récupérer les données acquises par l'unité de capture, d'effectuer quelques traitements sur les données pour les transmettre par la suite vers l'unité de communication.
- **Unité de communication** : L'unité responsable de communiquer les données acquises par le capteur vers l'extérieur (capteurs avoisinants), à travers un support de communication radio.
- **Unité d'alimentation** : L'unité en charge de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement des trois autres unités, il s'agit dans la majorité des cas de batteries ne pouvant être ni rechargés ni remplacés vu l'environnement hostile de déploiement des capteurs.

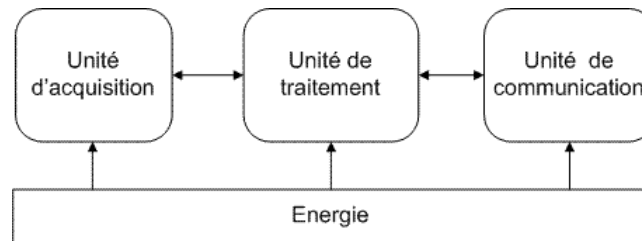


FIGURE 1.2 – Architecture de base d'un capteur sans fil

Il est à noter qu'en plus de ces unités de base, les capteurs peuvent être dotés d'autres unités additionnels selon leurs domaines d'applications, (eg : unités permettant la mobilité des capteurs, unités permettant la localisation des capteurs...etc)

1.4 Les réseaux de capteurs sans fil

1.4.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil, est un ensemble de capteurs sans fil -appelés nœuds- spatialement distribué sur une surface nommée *champ de captage*, ces nœuds sont capables d'interagir avec leur environnement en détectant et mesurant des paramètres physiques de ce dernier (température, pression, bruit, mouvement, lumière...), ces paramètres sont échangées entre les nœuds à travers des ondes radio jusqu'à ce qu'ils atteignent une station de base externe au champ de captage, cette station appelée station puits (ou point de récolte) (*sink* en anglais) peut utiliser les données récoltées localement ou elle les transmet à son tour à un utilisateur final à travers le réseau (réseau local, par satellite, via internet...). L'utilisateur peut aussi envoyer des requêtes au réseau à travers cette station de base qui considérée comme une passerelle. La figure ci-dessous représente un exemple d'architecture d'un réseau de capteurs sans fil :

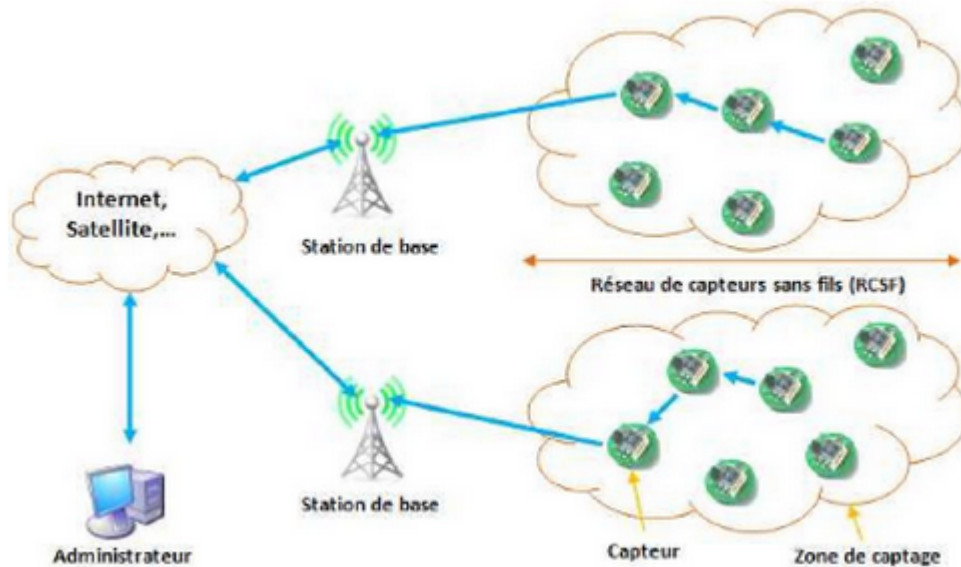


FIGURE 1.3 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil (RCSFs)

1.4.2 Contraintes de conception des RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), sont omniprésents dans de nombreux secteurs, et dans de nombreuses applications, cette diversification d'application est due à une certaine flexibilité offerte par ces réseaux, à titre d'exemple la diversité des capteurs existants, la mobilité des nœuds, la possibilité d'utilisation de ces réseaux dans des milieux hostiles...etc, cette flexibilité a pour conséquences des défis de conception majeurs, afin d'adapter chaque réseau à son domaine d'application, car les exigences diffèrent selon l'application. Parmi ces contraintes on peut citer :

introduction ambiguë

- **Durée de vie du réseau** : Elle diffère selon les domaines d'applications, elle peut varier de quelques jours à plusieurs années, elle correspond à la durée entre la mise en place du réseau et l'épuisement de l'énergie d'un capteur du réseau.
- **Limitation des ressources** : Les capteurs disposent de ressources limitées en terme de bande passante, puissance de calcul, mémoire...etc, cela afin de garantir une taille réduite et un prix abordable au capteur. La conception d'un RCSF doit prendre en considération ces limitations.
- **Topologie dynamique** : La topologie du réseau peut varier à travers le temps, cela est due à plusieurs facteurs comme : la possibilité de mobilité des nœuds dans certaines applications, l'épuisement de l'énergie d'un nœud du réseau, la défaillance d'un nœud...etc, le réseau devrait s'adapter automatiquement à ces changements.
- **Le temps de réponse** : Dans certaines applications, le temps de réponse est un des facteurs critiques de conception du réseau, (eg : dans le cas des stations nucléaires), dans ce genre d'applications il faudrait mettre l'accent sur le temps, même s'il peut affecter la durée de vie du réseau, il faudrait faire un compromis lors de la conception.
- **La scalabilité du réseau** : La scalabilité du réseau (adaptation à l'échelle), est un des critères clé de conception des RCSFs, le réseau devrait s'adapter à l'ajout des nœuds au fil du temps.

1.4.3 Domaines d'application des RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil initialement dédiés au domaine militaire ont envahi ces dernières années la majorité des secteurs, cela est due au développement qu'a connu ce type de réseau en terme matériel et logiciel, la miniaturisation et la réduction des coûts des capteurs, ainsi l'impact que peuvent apporter ces derniers dans les différents secteurs. Parmi les domaines où ces réseaux ont eu un fort impact on retrouve le domaine médical, l'industrie, l'environnement, l'architecture (Maisons et structures intelligentes).

- **Applications militaires** : Les RCSFs étaient initialement dédiés au domaine militaire, avant de s'élargir vers les autres secteurs, ils ont la capacité d'être déployés dans des environnements hostiles (champ de bataille par exemple) ou l'intervention humaine est quasiment impossible, ils permettent de collecter pas mal d'information, des informations sur les troupes (positionnement, armement ...) et des informations sur les ennemis (lieux de présence, nombre, ...), ils peuvent aussi être utilisés dans le cas de détection des attaques chimiques et biologiques.

- **Applications médicales** : Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés pour récupérer des données physiologiques des patients (pression artérielle, fréquence cardiaque...etc), ces données permettent une surveillance à distance des patients et une meilleure réactivité en cas d'urgence, les capteurs sans fil peuvent aussi être administrés comme étant des gelules, permettant de transmettre des images en temps réel de l'intérieur du corps sans recourir à la chirurgie, .
- **Applications environnementales** : Les RCSFs ont connu un progrès remarquable dans les applications environnementales, ils permettent la détection des incendies, des inondations, des fuites de produits dangereux (gaz, produits chimiques, éléments radio-actifs...). Ils peuvent aussi être utilisés pour le suivi des plantes et des animaux.
- **Applications domestiques** : Les RCSFs se sont introduits même dans les habitations, les capteurs sont intégrés dans pas mal d'appareils électroménagers (aspirateurs, réfrigérateur, machine à laver ...), ils permettent la détection des problèmes, l'interaction avec les appareils à distance et d'une manière confortable par les utilisateurs finaux. Ils sont aussi utilisés pour réguler la température au sein de l'habitation d'une manière automatique tout en réduisant la consommation énergétique.
- **Applications routières** : Les RCSFs peuvent apporter une aide considérable dans la gestion routière, ils permettent en conséquence un gain de temps considérable pour les automobilistes ainsi une réduction de la consommation énergétique et du taux de pollution, ils sont utilisés pour la gestion des carrefours (gestion intelligentes des feux tricolores selon la présence et le flux des véhicules), la gestion intelligente des parkings (détection des emplacements vides et de la surcharge de la structure automatiquement) et pas mal d'autres applications intelligentes facilitant la vie des automobilistes.

1.4.4 La communication dans les RCSFs

Un réseau de capteurs sans fil étant composé de plusieurs nœuds déployés dans un environnement supervisé, la puissance de ces réseaux figure dans la possibilité de coopération entre ces nœuds afin de transmettre des informations sur l'environnement supervisé, pour assurer cette coopération des mécanismes de communication devraient être mise en place pour assurer une communication efficace répondant aux exigences des capteurs sans fil (en termes de limitation de ressources et d'énergie).

A cet effet, une pile protocolaire a été mise en place semblable à celle du modèle OSI afin de faciliter et standardiser la communication au sein des RCSFs, la pile protocolaire mise en place pour les RCSFs comprend 5 couches (La couche application, transport, réseau, liaison de données, et la couche physique) et 3 plans de gestion (Plan de gestion de l'énergie, plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches) résumés dans la figure ci-dessous :

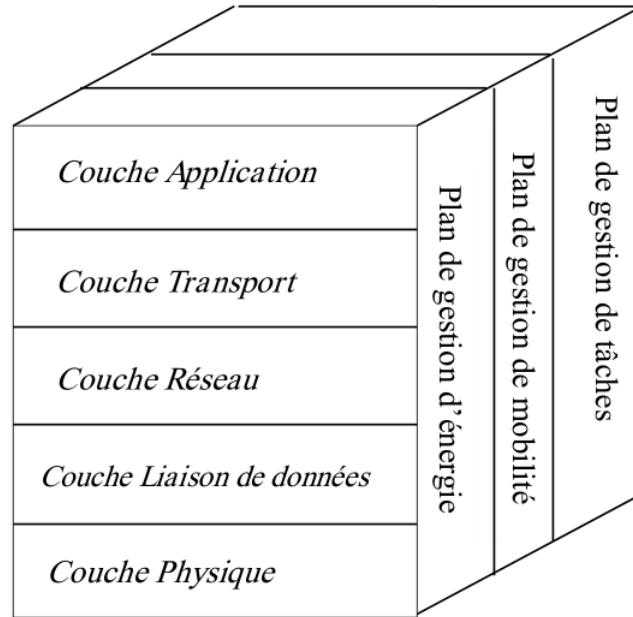


FIGURE 1.4 – La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil

Description des couches de la pile protocolaire

- **La couche application** : Elle représente l'interface avec les applications, il s'agit de la couche la plus proche des utilisateurs finaux, de nombreuses applications peuvent être mise en place au niveau de cette couche à titre d'exemple SMP (Sensor Management Protocol), TADAP (Task Assignment and Data Advertisement Protocol), SQDDP (Sensor Query and Data Dissemination protocol).
La couche application a pour mission principale le traitement de l'information détectée (ou mesurée), son encodage, sa mise en forme et la manière de stockage et de transfert de cette information. Elle a aussi pour rôle de vérifier la disponibilité des ressources pour répondre aux exigences du réseau en communiquant avec les couches sous-jacentes.
- **La couche transport** : Elle est responsable de l'acheminement des données de manière transparente et fiable (Dans certaines applications la fiabilité n'est pas primordiale), de la segmentation des données venant de la couche application, réordonnant des segments provenant de la couche réseau, ainsi le contrôle de flux et la gestion des erreurs.
- **La couche réseau** : Elle est responsables du routage des données, en établissant les chemins optimaux entre les nœuds et les stations puits, dans les RCSFs l'accent est mis sur la consommation énergétique lors de l'établissement des routes.
Le routage dans les RCSFs diffère de celui des réseaux AD-HOC cela est due aux caractéristiques particulières des RCSFs à savoir :
 - Impossibilité d'établir un schéma d'adressage global.
 - Limitation de l'énergie et des ressources des capteurs sans fil.

- Redondance des données produite par des capteurs adjacents couvrant partiellement la même région géographique.
- Les routes devraient relier des sources multiples (capteurs sans fil) vers une seule destination (station de base).
- **La couche liaison de données** : Elle spécifie la façon d'expédition des données entre deux nœuds, dont la distance entre eux est d'un seul saut, elle est aussi responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs et du contrôle de l'accès au média.
- **La couche physique** : Elle est responsable des caractéristiques physiques (matérielles) de la communication, comme la génération des ondes et la détection des signaux, elle responsable de l'acheminement et de la réception des données au niveau bit.

Les plans de gestion :

En plus des 5 couches vus précédemment, la communication dans les RCSFs se fait à base de 3 plans de gestion, assurant une communication efficace, une meilleure coordination des tâches tout en minimisant la consommation énergétique.

- **Plan de gestion de l'énergie** : A pour rôle principal la gestion efficace de la consommation énergétique au sein du réseau lors des phases de détection, de traitement et de la communication en utilisant divers mécanismes, comme l'extinction du récepteur des messages lors de la réception d'un message pour éviter la réception et le traitement des messages dupliqués, ou bien encore signaler le faible niveau d'énergie atteint par nœud afin que ce dernier ne participe plus au processus de routage.
- **Plan de gestion de la mobilité** : A pour rôle la détection, le suivi et l'enregistrement des mouvements des nœuds voisins pour garder une image récente du voisinage d'un nœud à tout moment, cette image sert pour les plan de gestion des tâches et d'énergie en effectuant un équilibrage de tâches et de consommation énergétique entre les nœuds (Deux noeuds couvrant la même région géographique ne doivent pas travailler en même temps).
- **Plan de gestion des tâches** : A pour rôle l'équilibrage de l'affectation des tâches entre les nœuds du réseau, ce qui garantit une meilleure consommation énergétique donc augmentation de la durée de vie du réseau.

Chapitre 2

Généralités sur la simulation

2.1 Problématique

Les réseaux de capteurs sans fils peuvent être considérés comme un type particulier de réseaux Ad-hoc mobile(MANET),formés par des centaines voir des milliers de nœuds capteurs,communicants a l'aide d'une transmission sans fils.Les recherches dans le domaine des réseaux de capteurs et dans celui des réseaux ad-hoc partagent les même problématiques (topologie,routage,etc),mais les réseaux de capteurs se distingue par les caractéristiques suivantes :

- L'influence des grandeurs physiques mesurées par les capteurs sur le fonctionnement le l'application réalisée par le RCSF,et sur les différents protocoles utilisés ;
- L'énergie est une préoccupation majeur dans les RCSFs.Généralement, les batteries des nœuds capteurs sont non rechargeables et irremplaçables.De ce fait,la prévision de la durée de vie d'un nœud est un élément fondamentale a prendre en considération.

Les RCSFs sont formés par un très grand nombre de nœuds capteurs.Opter pour un modèle purement analytique des RCSFs est généralement très complexe pour ne pas dire impossible et conduit généralement a des analyses peu crédibles et beaucoup trop simplifiées.De plus, déployer un RCSF dans la réalité nécessite un effort énorme, et un cout très élevé vu le grand nombre de nœuds capteurs(qui peut varier de quelques centaines de nœuds jusqu'à des milliers).Donc,ce n'est pas raisonnable de déployer un RCSF dans la réalité seulement pour tester un nouveau protocole ou une nouvelle application, et il faudrait plutôt opter pour la simulation.

2.2 Définition de la simulation

La simulation permet de reproduire d'une façon virtuelle une situation réel observée.On appelle un simulateur le dispositif(logicielle) qui permet de réaliser la simulation.Il présente sous des conditions contrôlables est observables l'évolution du *modèle* du phénomène.S'il existe plusieurs modèles, on pourra aussi parler de *système* d'une façon plus générale.

Un simulateur permet donc de reproduire(simuler) un système réel avec tout les

avantages et les inconvénients que cela implique. En particulier le simulateur sera utilisé quand le système réel est inobservable ou difficilement observable pour toutes sortes de raisons (dimension, sécurité, coût, inexistence...).

La simulation est universellement utilisée pour développer et tester et approuver des protocoles pour les RCSFs. Plus particulièrement, dans la phase de conception de ces derniers. Le coût de simulation de milliers de nœuds d'un RCSF est très réduit, et la simulation peut s'exécuter dans une très courte durée.

2.3 Type de simulations

Il existe deux types de simulations :

- La simulation à événements discrets ;
- La simulation continue.

Dans une simulation à événements discrets, l'état du système est représenté par une séquence chronologique d'événements discrets. Chaque événement arrive à un instant donné et modifie l'état du système. Dans ce type de simulation, il faut qu'il se passe quelque chose pour que l'on observe et que l'on prenne des décisions. Ce sont ces instants de modification de l'état du système que l'on appelle événement.

À l'opposé de cette simulation se trouve la simulation continue qui ne prend pas en compte la notion d'événement mais découpe plutôt l'intervalle de temps en tranches égales (Δt), et à chaque intervalle de temps, l'état du système est déterminé. Un tel système peut se formaliser par des équations mathématiques (une étude analytique peut être faite).

L'exemple typique d'une simulation à états discrets est le système de péage dans une autoroute, où chaque voiture qui passe par le système est un événement qui change l'état du système (l'état du système est le nombre de voiture ayant passé par le système). Si aucune voiture ne se présente, il n'y a pas d'événements et le système ne change pas. Il peut se passer beaucoup ou très peu de temps entre deux événements, et on connaît pas à l'avance le nombre d'événements que comportera la simulation.

L'exemple typique d'une simulation continue est celui de l'eau qui chauffe. Ici l'eau chauffe en permanence, d'une façon continue, donc il n'y a pas d'événements. L'état du système -qui est la température de l'eau- peut être observé en mesurant la température toutes les secondes, toutes les millisecondes, ou toutes les minutes. Quel que soit le moment où on l'observe, l'eau aura une température en fonction de laquelle une décision pourra être prise.

Dans le cas d'une simulation à événements discrets, une fonction de pilotage s'occupe de gérer l'avancement chronologique du temps simulé. Elle maintient en permanence une liste d'événements, où les heures de tous les événements futurs sont inscrites. Pour calculer l'heure de l'événement suivant, la fonction regarde l'heure de l'événement le plus proche de l'heure présente. Le temps de la simulation va progresser par sauts de l'heure d'un événement à l'heure de l'événement suivant. Le modèle va être réévalué à chaque événement, donnant lieu à des nouveaux résultats débouchant sur d'éventuelles décisions, et créant d'éventuels nouveaux événements futurs.

2.4 La simulation et l'émulation

Alors que la simulation cherche à *modéliser* le fonctionnement d'un système, l'émulation consiste à se substituer à un élément matériel informatique (tel un terminal informatique, un ordinateur, ou une console de jeux) par un logiciel.

L'émulation est une imitation du comportement physique d'un matériel par un logiciel, et elle n'est pas à confondre avec la simulation, laquelle vise à imiter un modèle abstrait.

Dans le domaine des RCSFs, un émulateur est un outil qui utilise le firmware ainsi que le matériel (le hardware) pour effectuer la simulation. L'émulation combine le logiciel et le matériel pour simuler un RCSF. En d'autres termes, un émulateur permet de faire coopérer de vrais nœuds capteurs avec des nœuds capteurs simulés afin de construire un RCSF.

2.5 Avantages de la simulation de RCSFs

- La simulation peut être utilisée pour détecter et corriger des problèmes et des bugs avant de déployer le système dans le monde réel.
- Certaines applications des RCSFs nécessitent d'opérer dans un environnement très spécifique. Par exemple, la surveillance d'une activité volcanique. Conduire des expériences dans ces environnements peut être très coûteux et très dangereux ce qui est une raison de plus d'utiliser la simulation.
- La simulation permet de contrôler l'environnement et les conditions dans lesquelles s'effectue l'expérimentation. Par exemple, c'est possible de créer des scénarios difficiles à reproduire dans la réalité et de répéter le même scénario de simulation plusieurs fois avec différents paramètres.

2.6 Exigences d'une simulation

La simulation est une phase essentielle dans l'étude des RCSFs étant la manière la plus commune de tester de nouvelles applications ou de nouveaux protocoles. Cependant, la simulation doit se baser sur un modèle correct avec des hypothèses solides et un Framework approprié pour simplifier l'implémentation.

Les résultats de la simulation reposent sur le scénario mis en place. Ceci inclut les caractéristiques de l'environnement, les hypothèses concernant le matériel et les différentes couches de communication etc. Ces paramètres ne sont -généralement- pas assez précis pour pouvoir capturer le comportement réel d'un RCSF, mettant ainsi en péril la crédibilité des résultats. De l'autre côté, l'utilisation de modèles très détaillés induit une complexité supplémentaire dans le calcul et conduit ainsi à des problèmes de performance et de mise à l'échelle (lorsque le nombre de nœuds capteurs augmente).

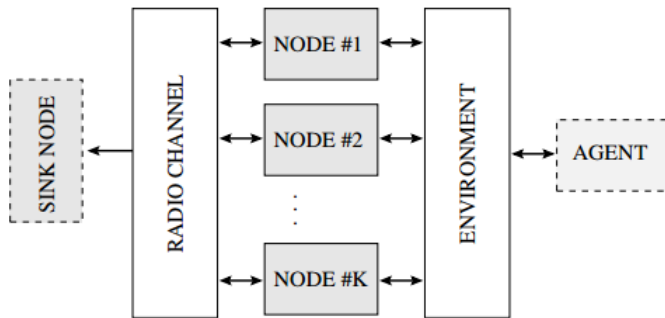
De ce fait, un compromis doit être fait entre la précision (le niveau de détail) et l'évolutivité (la mise à l'échelle). Ce compromis est un critère primordial lors de la simulation d'un RCSF.

2.7 Un modèle générique pour la simulation des RCSFs

Avec le développement des outils de simulation pour les RCSFs, leurs modèles ont été introduits. Ces modèles incluent de nouveaux composants qui n'étaient pas présents dans les simulateurs de réseaux classiques, comme des modèles détaillés de la consommation énergétique et de l'environnement dans lequel opère un RCSF.

Dans la figure

FIGURE 2.1 – Un modèle générique pour les RCSFs



2.7.1 Le modèle du réseau

Les nœuds capteurs(nodes)

chaque nœud capteur est un périphérique physique capturant un ensemble de grandeurs physiques. Les nœuds communiquent entre eux à l'aide d'un canal radio. À l'intérieur de chaque nœud, une pile de protocoles semblable à celle du modèle OSI contrôle la communication. À l'encontre des modèles classiques des réseaux sans fils, les nœuds capteurs incluent un second groupe de composants qui sont les capteurs physiques (qui capturent les grandeurs physiques) et qui sont connectés à l'environnement (pour la détection de stimulus).

Les nœuds sont positionnés dans un environnement à deux ou à trois dimensions, un composant topologique additionnel (le composant de la mobilité) gère les coordonnées du nœud dans l'environnement. Selon l'application, le nombre de nœuds capteurs dans un RCSF peut aller de quelques nœuds jusqu'à plusieurs milliers de nœuds.

L'environnement

Ce composant simule la génération et la propagation d'événements (les stimulus) qui sont détectés par les nœuds capteurs et qui déclenche une réaction de ces derniers (généralement une série de communication entre les nœuds du réseau). Les événements sont des grandeurs physiques comme du son, des ondes sismiques ou de la température.

Le canal radio

Le canal radio simule la propagation des signaux radio entre les nœuds du réseau. Les modèles les plus détaillés incluent un composant de terrain (qui simule un vrai terrain avec les obstacles qui peuvent y figurer) connecté à l'environnement et au canal radio. Ce composant est pris en considération lors du calcul de la propagation des signaux dans le canal radio et influence aussi les grandeurs physiques mesurées.

Les stations de base(sink nodes)

Ce sont des nœuds spéciaux qui, s'ils sont présents, reçoivent des données à partir des nœuds du réseau et les traitent (les agrègent). Ils peuvent aussi envoyer des requêtes aux nœuds capteurs afin de les interroger sur un événement particulier. L'utilisation des stations de base ou pas, dépend de l'application qu'on veut mettre en place et des tests que l'on veut effectuer à l'aide du simulateur.

Les agents

Responsables de la génération des événements à destination des nœuds capteurs. Les agents peuvent causer une variation dans une grandeur physique, qui va se propager dans l'environnement et qui va stimuler les nœuds capteurs. Ce composant est utile lorsque son comportement peut être implémenté indépendamment de l'environnement. Par exemple, un véhicule en mouvement. Autrement, l'environnement lui-même peut générer des événements.

2.7.2 Le modèle du nœud

L'architecture du nœud peut être décomposée en trois tiers comme illustré dans la figure

2.8 Les outils de simulation existants

L'accroissement de la recherche dans le domaine des RCSFs, spécialement dans ces dernières années, a conduit au développement d'une multitude de simulateurs pour les RCSFs. Les simulateurs peuvent être des frameworks (ou extensions) pour des outils de simulation existants (comme les frameworks Castalia et Mixim qui sont des extensions pour Omnet++), ou des simulateurs créés explicitement dans le but de simuler les RCSFs (comme TOSSIM).

2.8.1 Type de simulateurs

Il existe trois types de simulateurs selon le niveau de détail qu'ils emploient pour simuler les RCSFs.

Le premier type sont les simulateurs à usage général, qui se concentrent sur des aspects de haut niveau des RCSFs, comme le routage, la détection de stimulus, et le

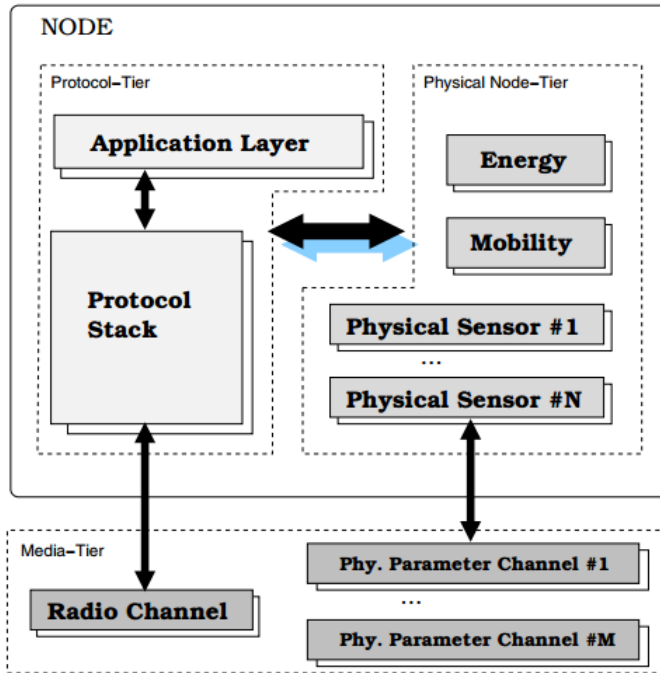


FIGURE 2.2 – L'architecture d'un nœud capteur

traitement de l'information, et ignorent les aspects liés au système d'exploitation du nœud et à son architecture matériel. Ce type de simulateur est pratique pour l'évaluation des protocoles et des algorithmes de haut niveau.

Le second type sont les simulateurs niveau code (ou les simulateurs de code) qui permettent de développer des applications pour les RCSFs en utilisant le langage de programmation natif utilisé pour développer des applications pour ce type de nœuds capteurs dans la réalité. Par exemple, le simulateur TOOSIM permet le développement d'applications pour les RCSFs en utilisant le langage de programmation NESC qui est le même utilisé dans la pratique pour développer des applications pour les nœuds capteurs de la marque MICA2. Ce type de simulateur fait abstraction de l'architecture matériel du nœud et ne la prend pas en compte. Le code source de l'application et celui du système d'exploitation des nœuds capteurs simulés sont compilés suivant le code machine de la machine qui exécute le simulateur. Ce type de simulateur peut être utilisé pour la détection de bugs au niveau applicatif.

Le troisième type de simulateurs sont les simulateurs niveau firmware (ou niveau instruction machine). Ce type de simulateurs prend en compte l'architecture matériel du nœud capteur, et permet de simuler de vrais nœuds capteurs jusqu'au détail des instructions machines utilisées par ces derniers (les applications sont compilées suivant le code machine du nœud capteur simulé). Utilisant ce type de simulateurs, la plupart des bugs peuvent être détectés, et les applications à contraintes temporelles peuvent être testées.

2.8.2 Évaluation des simulateurs

Pour pouvoir évaluer et comparer les différents outils de simulation existants, des critères d'évaluation doivent être établies. Les critères les plus pertinents sont :

- La disponibilité et la réutilisabilité ;
- La performance et l'évolutivité (la mise à l'échelle) ;
- Le support de langages de programmation riche en fonctionnalités pour définir les expérimentations et traiter les résultats ;
- Le support d'une interface graphique et d'un environnement de débogage.

Nous allons détailler chaque critère cité précédemment, en évaluant son impacte sur le choix d'un outil de simulation.

Disponibilité et réutilisabilité

Il y'a deux aspects clés à considérer ici :

- Est ce que l'outil de simulation inclue l'implémentation des modèles fréquemment utilisés dans la pratique (ex les modèles des protocoles MAC existants) ;
- Avec quelle facilité pouvant nous modifier un modèle existant ou intégrer un nouveau modèle avec ceux déjà existants dans le simulateur.

La première question dépend de la durée de temps pendant laquelle le simulateur existe, et de la taille de la communauté qui l'utilise. Plus la communauté d'un simulateur est grande, plus il y'aura des modèles disponibles pour ce simulateur, et il est fort probable que s'il y'a de nouvelles propositions de modèles, celles-ci seront intégrées dans les versions à venir du simulateur en question.

Dans le même contexte, il faudrait citer que tous les simulateurs à usage générale, incluent une implémentation plus ou moins complète de la pile de protocole TCP/IP, et doivent aussi inclure :

- Une implémentation des protocoles de routage communément utilisés dans les RSCFs ;
- Une implémentation des protocoles MAC communément utilisés dans les RSCFs ;
- Une implémentation des modèles de propagation et de mobilité.

Par exemple, ces éléments sont généralement implémentés dans les simulateurs des RSCFs :

- Le protocole de routage AODV ;
- Le protocole MAC IEEE 802.11 ;
- Un modèle d'affaiblissement de propagation des signaux radio sur le canal de transmission.

La deuxième question est intimement liée à la conception du simulateur. Une structure étudiée, avec des interfaces bien définies, et une haute modularité, permet à l'utilisateur de facilement rajouter ou changer une fonctionnalité au simulateur. La disponibilité de modèles prêts à l'emploi, permet à l'utilisateur de rapidement mettre en place des scénarios de simulation, et de concentrer sur des aspects plus spécifiques et plus importants dans la modélisation des RSCFs.

Performance et évolutivité

La performance et l'évolutivité sont deux problématiques majeures dans le domaine de simulation des RCSFs. la première est généralement liée à l'efficacité du langage de programmation avec lequel le simulateur est développé. La deuxième est liée à la disponibilité de mémoire vive, à la capacité de calcul du processeur, et à la taille nécessaire pour stocker les fichiers log de la simulation.

Support des langages de programmation riches en fonctionnalités

La configuration typique d'une simulation d'un RCSF requiert de spécifier au minimum les paramètres suivants : combien de nœuds existent-ils dans la simulation ? qu'elle est la position de chaque nœud ? est-ce que les nœuds sont mobiles ? si oui, comment s'effectue ce mouvement ? quel est le modèle énergétique utilisé ? combien de grandeurs physiques existent-elles dans la simulation ? comment les événements sont-ils générés ? qu'elle est la grandeur physique que doit détecter chaque nœud ? qu'elles statistiques doit-on mesurer dans l'expérimentation ? quels sont les paramètres du canal radio (canal de transmission) ?.

Le nombre considérable de variables intervenant dans une simulation requiert l'utilisation d'un langage de programmation approprié, avec des sémantiques de haut niveau, qui facilitent la définition des paramètres de la simulation.

Support d'une interface graphique et d'un environnement de débogage

L'interface graphique est un outil intéressant dans les simulations pour les trois raisons suivantes :

- Elle constitue Une aide pour le débogage : la façon la plus rapide et la plus pratique de détecter une anomalie dans le système simulé est de visualiser et de suivre le comportement de la simulation pas par pas. La caractéristique clé qu'une interface graphique devrait supporter est la capacité d'inspection des différents modules, des variables, et des files d'attente des événements, tout ça en temps réel (pendant l'exécution de la simulation). Ces caractéristiques rendent les interfaces graphiques des outils très puissants pour le débogage ;
- L'interface graphique peut servir comme outil de modélisation et de composition graphique : cette caractéristique permet de faciliter et d'accélérer la mise en place de petites expérimentations, et la composition de modules basiques. Cependant, pour les simulations volumineuses (simulation à grande échelle) l'approche graphique n'est pas très appropriée.
- L'interface graphique peut inclure des outils pour la visualisation des résultats de la simulation (même en temps réel).

2.8.3 Présentation de quelques outils de simulation existants

Dans cette section on va présenter quelques simulateurs des RCSFs utilisés dans la pratique. Notre décision de choisir ces simulateurs est justifiée par les raisons suivantes :

- On a choisis les simulateurs gratuits et open source les plus utilisés dans le domaine de la recherche (surtout la recherche académique).
- Dans le cas des simulateurs propriétaires (payants), on a choisis ceux dont les fournisseurs assurent le support activement.

En se basant sur ces critères on a choisis quatre simulateurs : ns-2, Castalia (qui se base sur omnet++), TOSSIM, COOJA/MSPSim.

NS-2 est le simulateur de réseaux le plus populaire, OMnet++ se distingue par une popularité croissante, une grande communauté et possède une structure modulaire, ce qui a permis à la communauté de chercheurs de l'enrichir avec beaucoup de modèles et de fonctionnalités, et lui donne le potentiel d'évoluer encore plus. TOSSIM est un simulateur de TinyOS, le système d'exploitation le plus utilisé dans les RSCFs. COOJA/MSPSim, sont des simulateurs du système d'exploitation Contiki avec sa popularité croissante.

NS-2

NS-2 est le simulateur des réseaux le plus utilisé. Il a commencé comme un simulateur de réseaux de communication classiques, le support pour les réseaux ad hoc mobile (MANET) a été ajouté ultérieurement. NS-2 est un simulateur à événement discret, orienté-objet, écrit en c++. Il dispose d'un interpréteur de langage OTCL utilisé comme front end.

Le noyau de simulation (le kernel), les modèles, les protocoles et les différents composants sont implémentés en c++, mais sont aussi accessibles depuis OTCL. Les scripts OTCL sont utilisés pour la configuration du simulateur, la mise en place de la topologie du réseau, la spécification des scénarios de simulation, l'enregistrement des résultats de la simulation etc. Un script OTCL typique pour une simulation d'un réseau sans fils commence avec une commande de configuration qui définit les paramètres de la couche physique, de la couche MAC, de la couche de routage, du modèle de propagation radio etc.

L'étape suivante est la création des nœuds. Les modèles de mouvement des nœuds et du trafic du réseau sont généralement définis dans des fichiers séparés. Des outils sont disponibles pour la génération automatique de ces fichiers.

Un modèle très simple de consommation énergétique est utilisé. Chaque nœud démarre avec une quantité d'énergie initiale, les quantités d'énergies dépensées lors de la transmission et la réception de paquets sont aussi définies. Après l'envoi ou la réception d'un paquet, l'énergie du nœud est décrétementée par une certaine quantité. Quand l'énergie du nœud atteint zéro, le nœud en question ne pourra ni envoyer ni recevoir de nouveaux paquets.

L'outil nam permet la visualisation graphique de la progression de la simulation. Durant la simulation, NS-2 génère un fichier contenant la trace de la simulation destiné à nam, un script OTCL est utilisé pour définir quelles informations devraient être enregistrées dans ce fichier. nam utilise les données stockées dans ce fichier pour donner une visualisation de la topologie du réseau, et pour animer la circulation des paquets.

L'utilisation de NS-2 comme outil de simulation pour les RSCFs possède ses inconvénients. D'abord, il n'existe pas de modèles pour les capteurs physiques (qui détectent les grandeurs physiques), de plus, les formats de paquets et les protocoles MAC défi-

nies dans NS-2 sont différents de ceux qu'on trouve dans les RCSFs ,et le modèle de consommation énergétique est très simple.

Cependant,NS-2 est extensible et plusieurs extensions tiers on été développées pour combler les manques cités précédemment.MANNASIM ajoute par exemple : un modèle de capteurs physiques,beaucoup de modèles d'applications,une implémentation du protocole de routage LEACH,un modèle des capteurs de la marque MICA2 et une interface graphique pour créer automatiquement des scripts OTCL.

Omnet++ et Castalia

Un autre simulateur a événements discrets est Omnet++.Ce n'est pas un simulateur spécifique aux réseaux de capteurs et ce n'est pas non plus un simulateur spécifique aux réseaux de communications,mais une plateforme pour le développement de simulateurs, dans laquelle plusieurs groupes peuvent construire leur propres simulateurs.Comme l'utilisation la plus répandu d'Omnet++ est la construction de simulateurs pour les réseaux de communication,il est communément décrit comme un simulateur de réseaux.

Un simulateur basé sur Omnet++ est construit a partir d'éléments appelés modules.Les modules simples ou *simple modules*(leur appellation dans le vocabulaire d'Omnet++) sont les briques de base de la simulation, et leur comportement est définie avec du C++.Les modules composés ou *Compound modules* sont obtenues par l'imbrication d'autres modules (simples ou composés) liés entre eux par des connexions.Le Module composé de plus haut niveau est le réseau *network module*.

Les différents modules communiquent entre eux a l'aide de messages, qui sont soit envoyer a travers la chaine de connexions entre les modules,soit directement a partir d'un module vers un autre. La définition des modules simples,des modules composés et de la topologie du réseau est réalisée en utilisant un langage déclaratif appelé NED.Les paramètres de la simulation sont définit dans un fichier de configuration(généralement nommé omnetpp.ini).

OMNET++ inclue un environnement de développement intégré (IDE) basé sur l'IDE eclipse, qui simplifie la programmation des modules en offrant un support pour le langage C++.Il offre aussi un support pour la rédaction des fichiers NED(fichiers avec extension ".ned") et des fichiers de configuration (fichiers avec extension ".ini") en intégrant des outils pratiques comme la colorisation des mots clés,l'auto-complétion,le débogage des programmes c++ etc.

Tkenv est le nom de l'interface graphique utilisée pour l'exécution de la simulation.C'est un outil très puissant qui permet de visualiser l'exécution de la simulation en représentant la circulation des messages entre les nœuds du réseau avec des animations.Elle permet aussi la visualisation du changement d'état de chaque objet dans la simulation , la visualisation des résultats de la simulation et l'analyse de ces derniers.

Un exemple de simulateurs de RCSFs construit avec Omnet++ est Castalia .C'est un simulateur a usage générale prévu pour faire le test et la validation des algorithmes de haut niveau(algorithmes de routage,algorithmes de la couche MAC) avant de passer a leurs implémentation sur une plateforme spécifique. Dans Castalia, les nœuds capteurs sont implémentés comme des modules composés *Compound modules*, constitués d'un ensemble de sous modules qui représentent :

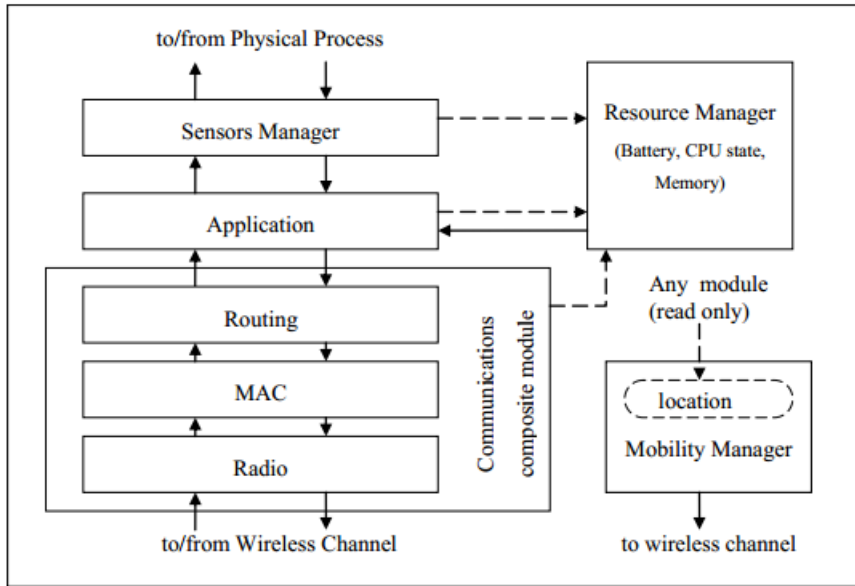


FIGURE 2.3 – Le Modèle d'un nœud capteur dans Castalia

- La pile des protocoles de communication (MAC ,rou tage) ;
- L'application ;
- Les capteurs physiques(*sensors manager*) ;
- L'antenne radio (émetteur/récepteur des signaux radios) ;
- Le gestionnaire de ressources,qui incluent la batterie ,le processeur ,et la mémoire.Et qui communique avec tout les autres modules ;
- Le gestionnaire de mobilité qui s'occupent de gérer la mobilité du nœud et sa position dans l'environnement.

Le module radio simule le comportement d'une antenne radio basse puissance,qui peut prendre différents états (chaqu'un d'eux dispose d'une différente consommation énergétique) et différents niveaux de puissance de transmission.

Le module radio effectue aussi La détection de la porteuse et la modulation.Les modulations de type PSK et FSK sont supportés,et l'utilisateur peut très bien définir ses propres modèle de modulation.

Il y'a deux modules MAC disponible dans CASTALIA.Le premier implémente les protocoles TMAC et SMAC alors que le deuxième peut réalisé une approximation de plusieurs protocoles MAC mais ne supporte que les communications en mode broadcast.Les modules radio et MAC peuvent être contrôlés a partir de l'application.

Les grandeurs physiques a détecter (les stimulus) sont modélisées par des processus physiques qui peuvent se déplacer et changer de valeur.Les effets de bruit et de diffusion sont pris en considération lors de la détection de ces grandeurs physiques.

Le modèle énergétique utilisé est très simple,il est comparable a celui utilisé par NS-2.

TOSSIM

TOSSIM est un simulateur niveau code, à événement discret, pour la simulation des RCSFs qui utilisent TinyOS comme système d'exploitation (la plupart des nœuds capteurs existants). Au lieu de compiler une application pour TinyOS sur un vrai nœud capteur, l'utilisateur peut la compiler dans TOSSIM qui s'exécute sur un PC. Ceci permet à l'utilisateur de faire le test, le débogage et l'analyse des algorithmes dans un environnement contrôlable et reproductible.

Le but principal de TOSSIM est de fournir une simulation aussi fidèle que possible des applications de TinyOS. Pour cette raison, il se concentre beaucoup plus sur la simulation de TinyOS et sur son exécution plutôt qu'à la simulation du monde réel. Bien que TOSSIM peut être utilisé pour comprendre les causes d'un comportement observé dans le monde réel, il ne peut pas capturer toutes les causes, et il ne doit pas être utilisé pour faire des assertions absolues.

TOSSIM permet la simulation des applications de TinyOS en remplaçant quelques composants de bas niveau avec des implémentations de la simulation. C'est un simulateur à événements discrets où les événements de la simulation représentent les interruptions matériels, les événements système et les tâches à exécuter.

TOSSIM possède trois lacunes. D'abord, tout les nœuds simulés doivent exécuter la même application. De plus, TOSSIM ne prend pas en compte la consommation énergétique (bien qu'il existe l'extension "PowerTOSSIM" qui permet de régler ça).

COOJA/MSPSim

COOJA/MSPSim sont des simulateurs inclus dans la distribution du système d'exploitation pour nœuds capteurs : Contiki. MSPSim peut être intégré dans COOJA formant ainsi COOJA/MSPSim.

MSPSim est un simulateur niveau firmware basé sur le jeu d'instruction du micro-contrôleur *Texas Instruments MSP430*. Il combine l'interprétation des instructions CPU avec la simulation à événements discrets des autres composants.

COOJA est un simulateur niveau code pour les RCSFs avec des nœuds utilisant Contiki comme système d'exploitation. Des nœuds avec différentes plateformes matériels et exécutant différentes applications peuvent coexister dans la même simulation.

La combinaison COOJA/MSPSim peut simuler des nœuds capteurs sur les trois niveaux de détails cités précédemment (haut niveau, niveau code, niveau firmware). De plus, des nœuds simulés sur différents niveaux de détails peuvent coexister et interagir dans la même simulation. Cette fonctionnalité est appelée *cross level simulation* et est l'une des points forts de COOJA/MSPSim.

2.9 Présentation d'Omnet++

Comme notre travail est basé sur Omnet++ nous allons donner dans cette section une description de cet outil de simulation.

OMNET++ est un *framework* orienté objet, modulaire, pour la simulation des réseaux. Il est basé sur la simulation à événement discret.

Omnet++ peut être utilisé (et il est utilisé) dans divers domaines :

- La modélisation des réseaux filaires et des réseaux sans fils ;
- La modélisation des protocoles ;
- La modélisation des architectures multiprocesseur et d'autres systèmes distribués ;
- La validation des architectures matériels ;
- D'une façon générale la modélisation et la simulation de n'importe quel système pouvant être simulé en utilisant l'approche de simulation a événements discrets, et qui peut être représenté par un ensemble d'entités communicants par l'échange de messages.

OMNET++, en lui même,n'est pas un simulateur d'un système en particulier,mais plutôt,il fournit une infrastructure et des outils pour le développement de simulateurs.L'un des ingrédients fondamentaux de cette infrastructure est son architecture a base de composants.Les modèles sont assemblés a partir de composants réutilisables appelés modules .Les modules bien écrits sont parfaitement réutilisables et peuvent étres combinés de multiple façon.

Les différents modules peuvent étres interconnectés via leurs portes (*gates*), et peuvent étres imbriqués pour formé des modules composés.La profondeur de l'imbrication des modules n'est pas limité.

les modules communiquent par l'échange de messages et les messages peuvent transporter n'importe quelle structure de donnée.Les modules peuvent envoyé un message soit a travers un chemin prédéfini -formé d'une série de connexions entre les nœuds-,ou directement a son destinataire (le dernier cas est particulièrement utile pour la simulation des communications sans fils).

Les modules peuvent contenir des paramètres qui peuvent étres utilisés pour personnaliser le comportement de ces modules et paramétrer la topologie du modèle.les modules au plus bas niveau de la hiérarchie(les modules atomiques) sont appelés modules simple(*simple modules* dans le vocabulaire d'Omnet++) , et il encapsulent le comportement du modèle. Les modules simples sont programmés en C++ et font usage de la librairie de simulation d'Omnet++.

Les simulations construites avec Omnet++ peuvent être exécutées avec divers interfaces utilisateur.Les interfaces graphiques contenant des animations sont très utiles pour le débogage de la simulation et l'inspection des différents modules.De l'autre coté ,les interfaces en ligne de commande sont utiles pour l'exécution par lots (batch processing).

OMNET++ supporte aussi les simulations parallèles distribuées.OMNET++ peut utilisé différents mécanismes pour la communication entre les différentes partitions d'une simulation parallèle distribué,par exemple MPI .Les modèles n'ont pas besoin d'une manœuvre (instrumentation) particulière pour qu'ils puissent être exécuté en parallèle,c'est juste une question de configuration.

Le simulateur ainsi que les différents outils et interfaces sont très portables et sont testés dans la plupart des systèmes d'exploitation (Linux,Mac OS/X,Windows) et ils peuvent être recompilé (après modification) dans la plupart des système basés sur Unix.

OMNEST est la version commerciale d'OMNET++ .OMNET++ est gratuit et il est utilisé uniquement a des fin académiques et a but non lucratifs ;pour une utilisation commerciale ,les licences d'OMNEST doivent être acquis.

2.9.1 Concepts de modélisation

Généralités

Un modèle dans Omnet++ consiste en un ensemble de modules qui communiquent entre eux avec des messages. Les modules actifs sont les modules simples et leur comportement est définie avec du C++ en utilisant la librairie de simulation. Les modules simples peuvent être groupés pour construire des modules composés. Le réseau finale obtenue est un module composé.

La figure

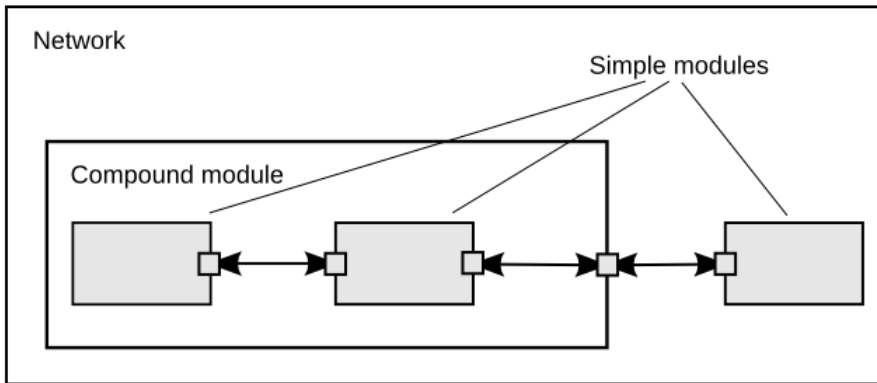


FIGURE 2.4 – Les modules simples et composés

Les modules communiquent entre eux avec des messages qui peuvent contenir n'importe quelle donnée, en plus des attributs habituels tel que l'estampille du message. Les modules envoient les données généralement à travers leurs portes, mais il est aussi possible de les envoyer directement vers le module de destination (sans passer par les portes). Les portes sont les interfaces d'entrée et de sortie des modules, les messages sont -généralement- envoyés à travers les portes de sortie et arrivent sur les portes d'entrées.

Une porte d'entrée d'un module et une porte de sortie d'un autre module peuvent être liées par une connexion. Les connexions peuvent être créées entre modules appartenant au même niveau hiérarchique : Dans un module composé, les portes de deux sous-modules, ou une porte d'un sous-module et la porte du module composé parent peuvent être interconnectées. Les connexions impliquant des modules appartenant à différents niveaux hiérarchiques ne sont pas permises car ça constituerait un obstacle pour la réutilisation du modèle.

A cause de la structure hiérarchique du modèle, les messages passent généralement par une chaîne de connexions, partant de et arrivant dans des modules simples. Les modules composés agissent comme des conteneurs dans le modèle, faisant office de relais de messages entre leur sous-modules et le monde extérieur. Des paramètres comme le délai de propagation, le débit de transfert de données et le taux d'erreurs peuvent être assignés aux connexions.

L'utilisateur peut définir des types de connexions avec leurs propriétés spécifiques. Ces types de connexions sont appelées -dans le vocabulaire d'Omnet++- les *Channels*

(pour canaux de communication) et peuvent être réutilisé dans plusieurs endroits de la simulation.

Les modules peuvent avoir des paramètres, les paramètres sont principalement utilisés pour passer des données de configuration aux modules, et pour aider à définir la topologie du modèle. Les paramètres peuvent être de différents types : des chaînes de caractères, des types numériques ou des booléens. Les paramètres peuvent aussi agir comme des sources de nombres aléatoires dont la distribution est définie dans les fichiers de configuration du modèle. Leur valeur peut aussi être assignée d'une façon interactive par l'utilisateur lors de l'exécution de la simulation. Les paramètres peuvent aussi contenir des expressions référençant d'autres paramètres. Les modules composés peuvent passer des paramètres ou des expressions à leur sous modules.

Omnet++ fournit des moyens pour permettre à l'utilisateur de décrire la structure du système d'une façon efficace, les principaux sont les suivants :

1. Un langage de description de la topologie ;
2. L'imbrication hiérarchique des modules ;
3. La définition de différents types de modules et de connexions ;
4. Une flexibilité dans la définition des paramètres des modules ;
5. Une communication entre les modules à l'aide de messages.

Imbrication des modules

Un simulateur construit avec Omnet++ consiste en un ensemble de modules hiérarchiquement imbriqués qui communiquent en s'envoyant des messages. Tout commence avec les modules simples qui sont les briques de bases. Ensuite, après une série d'imbrication (le nombre d'imbrication est illimité) et d'interconnexion des modules, on obtient le réseau désiré. La définition des modules, des interconnexions et de la topologie du réseau est réalisée avec le langage NED.

Types de modules/Types de connexions

Ici l'analogie est faite avec la programmation orienté objet, dans laquelle on définit des types (des classes) ensuite on les instancie pour construire le système désiré.

Tous les modules, simples ou composés, sont des instances de types de modules. Dans la description du modèle, l'utilisateur définit des types de modules. Les instances de ces types peuvent servir comme composants afin de construire des types de modules encore plus complexes.

Les types de modules peuvent être stockés dans des fichiers séparés de l'emplacement de leur utilisation. Cela veut dire que l'utilisateur peut regrouper plusieurs types de modules existants, et ainsi, construire des bibliothèques de composants.

Le même raisonnement s'applique pour les connexions entre les nœuds. Bien qu'il existe des types de connexions prédéfinies dans Omnet++ que l'utilisateur peut utiliser directement, l'utilisateur peut très bien définir des types de connexions personnalisés et leur assigner des paramètres comme le délai de propagation, le débit de transfert des données etc. Ces types de connexions peuvent être instanciés par la suite dans différents endroits de la simulation.

Les messages

Les modules communiquent en s'échangeant des messages. Dans une simulation, les messages peuvent être des trames ou des paquets dans le cas d'un réseau d'ordinateurs, des travaux (jobs) ou des clients dans une file d'attente, ou autre type d'entités mobiles.

Le temps local de simulation d'un module avance quand le module reçoit un message. Le message peut arriver d'un autre module ou du module lui-même. Dans le deuxième cas, le module s'auto envoie un message, et ceci permet l'implémentation des timer (quand le timer expire le module effectue une action).

Modélisation de la transmission du paquet

Afin de modéliser les réseaux de communication, les connexions sont utilisées pour modéliser les liens physiques. Les connexions supportent les paramètres suivants :

- Le débit de transfert des données ;
- Le délai de propagation ;
- Le taux d'erreurs de transmission que se soit au niveau des bits ou au niveau des paquets.

Quand le débit de transfert des données est spécifié, le paquet est par default délivré au module cible au temps de la simulation qui correspond à la fin de la réception de ce dernier. Vu que ce comportement n'est pas convenable pour la modélisation de quelques protocoles (half duplexe ethernet), OMNET++ offre la possibilité au module de destination de spécifier que le paquet doit lui être délivré quand la réception commence.

Les paramètres

Les modules peuvent avoir des paramètres, ces paramètres peuvent être assignés soit dans les fichiers ".ned", soit dans le fichier de configuration "omnetpp.ini". Les paramètres peuvent être utilisés pour personnaliser le comportement des modules et pour paramétrer la topologie du modèle. Les paramètres peuvent avoir comme valeurs des chaînes de caractères, des valeurs numériques, des valeurs booléennes, et même des fichiers XML. Les valeurs numériques peuvent être : des expressions utilisant d'autres paramètres et/ou appelant des fonctions prédéfinies, des variables aléatoires de différentes distributions ou des constantes introduites interactivement par l'utilisateur.

Les paramètres à valeurs numériques peuvent être utilisés pour construire des topologies d'une manière flexible. Au sein d'un module composé, les paramètres peuvent être utilisés pour paramétrer les sous-modules. Ainsi, ils peuvent être utilisés pour définir le nombre de sous modules, le nombre de portes de ces derniers, et la façon avec laquelle les connexions entre les sous modules sont effectuées.

Méthode de description de la topologie

La topologie du réseau est définie dans les fichiers ".ned" ceci inclue :

- La définition des différents types de modules intervenants dans la simulation et la spécification de leurs paramètres ;

- La définition des différents types de connexions intervenants dans la simulation et la spécification de leurs paramètres ;
- L’interconnexion des différents modules via leurs portes en spécifiant les types de connexions utilisés ;
- L’imbrication des modules pour construire de nouveaux types de modules (selon l’application et les tests que l’on veut réaliser) ;
- La construction du réseau globale en instanciant les modules définies précédemment et en effectuant les interconnexions nécessaires.

2.9.2 Programmation des algorithmes

Les modules simples sont la partie active du modèle, leur comportement est défini en utilisant le langage de programmation C++. Si l’utilisateur veut définir un algorithme de routage, un algorithme de la couche MAC ou n’importe quel autre fonctionnalité, il doit créer un module simple pour ça, et implémenter l’algorithme voulu comme des fonctions en C++. Toute la puissance du langage C++ peut être utilisée. Le programmeur de la simulation peut choisir librement entre un style de programmation événementiel ou un style de programmation procédurale classique. Et peut très bien utiliser tout les concepts de la programmation orienté objet (l’héritage, le polymorphisme, les design patterns etc).

Les objets présents dans la simulation (messages, modules, files d’attente etc) sont représentés par des classes implémentées en C++. Ces classes ont été conçues de façon à pouvoir travailler ensemble efficacement, créant ainsi un framework puissant pour la programmation de simulations. Les classes suivantes font partie de la bibliothèque de simulation d’Omnet++ :

- Module, gate, parameter, channel ;
- Message, packet ;
- Les classes conteneurs (les files, les tableaux) ;
- Les classes pour faire des statistiques (histogrammes, calcul des quantiles) ;
- Les classes pour le calcul de la précision des résultats de la simulation.

Les classes sont spécialement développées de façon à permettre l’inspection des objets (instances de ces classes) durant l’exécution de la simulation, et d’afficher des informations les concernant, comme le nom de chaque objet, le contenu de l’objet, le nom de la classe à partir de laquelle l’objet a été instancié etc. Cette possibilité permet la création d’une simulation où tous les composants internes et leurs propriétés sont visibles dans l’interface graphique.

2.9.3 Les interfaces utilisateur

L’objectif principal des interfaces utilisateur est de rendre l’intérieur du modèle (les composants du modèle) visibles à l’utilisateur, et de lui offrir la possibilité de changer les variables et les objets du modèle pour lui permettre de contrôler l’exécution de la simulation. L’interface graphique est un outil très important dans la phase du développement et du débogage de la simulation et sert à prouver que le modèle est fonctionnel.

La même simulation peut être exécutée avec différentes interfaces utilisateur et ceci sans faire de modifications dans les fichiers du modèle, c'est juste une histoire de configuration. Ceci permet à l'utilisateur de faire le test et le débogage de la simulation avec une interface graphique puissante, et finalement, d'exécuter la simulation avec une interface utilisateur simple et rapide qui supporte l'exécution par lots (batch execution).

2.9.4 OMNET++ dans la pratique

Omnet++ est composé des parties suivantes :

- **Le noyau de la simulation** : Il contient le code qui gère la simulation et la librairie de classes de la simulation. Il est écrit en C++.
- **Les interfaces utilisateur** : Les interfaces utilisateur dans OMNET++ sont utilisées pendant l'exécution de la simulation pour faciliter le débogage, la démonstration, et les exécutions par lots (batch execution). Elle sont écrites en C++ et compilées sous forme de bibliothèques dynamiques.

Un modèle dans OMNET++ est constitué des parties suivantes :

- **La description de la topologie** : Elle se fait en utilisant le langage NED (les fichiers avec extension ".ned"), qui est utilisé pour décrire la structure des modules en définissant leurs paramètres, leurs portes, les interconnexions etc. Les fichiers NED peuvent être rédigés en utilisant n'importe quel éditeur de texte. L'IDE d'Omnet++ fournit un excellent support pour l'édition de ces fichiers, soit d'une manière graphique en glissant/déposant des composants tout prêts, soit d'une manière textuelle ;
- **La définition des types de messages utilisés dans la simulation** : Ceci se fait dans des fichiers avec extension ".msg"; OMNET++ permet de définir plusieurs types de messages et de leur ajouter des champs de données qui représentent alors le contenu de ces messages. OMNET++ va par la suite générer automatiquement des classes en C++ à partir de ces définitions pour que ces types de messages puissent être instanciés et utilisés par la suite dans la simulation.
- **Le code source des modules simples** : Les modules simples sont la partie active du modèle, leur implémentation est faite en C++ (dans les fichiers ".cc/.h"). Cette implémentation décrit la tâche réalisée par ces modules simples.

Les programmes de simulation sont construits à partir des composants cités précédemment. D'abord les fichiers ".msg" contenant la définition des messages sont traduits en C++ en utilisant le programme *oppmsgc* fourni avec Omnet++. Ensuite, les fichiers sources en C++ sont compilés et une édition de liens est effectuée avec le noyau de la simulation et avec une interface utilisateur pour former soit un exécutable de la simulation (un simulateur) et dans ce cas il pourra être exécuté sur une machine même si celle-ci ne dispose pas d'Omnet++, soit une bibliothèque dynamique et dans ce cas les bibliothèques d'Omnet++ doivent être présentes dans la machine ou cette bibliothèque dynamique est utilisée. Les fichiers NED et le fichier de configuration "omnetpp.ini" sont chargés dynamiquement sous leur forme textuelle quand la simulation est exécutée.

L'exécutable de la simulation peut inclure plusieurs modèles indépendants qui utilisent le même ensemble de modules. L'utilisateur peut spécifier dans le fichier de confi-

guration quel modèle il désire exécuter. Ceci permet de créer un large exécutable qui contient plusieurs modèles de simulation, et de le distribuer comme outil de simulation autonome. La flexibilité dans la description de la topologie contribue à la réalisation de cette fin.

Quand l'exécutable de la simulation est lancé, il lit d'abord tout le fichier NED contenant la topologie du modèle, ensuite il lit le fichier de configuration (généralement appelé `omnetpp.ini`), ce fichier contient les paramètres qui contrôlent comment la simulation sera exécutée, et fournit les valeurs aux paramètres des différents modules. Le fichier de configuration peut aussi indiquer que la simulation doit s'exécuter plusieurs fois, dans le cas le plus simple, les exécutions se feront l'une après l'autre, avec les mêmes paramètres ou avec des paramètres différents à chaque exécution.

Les résultats de la simulation peuvent être sauvegardés dans des fichiers. Il existe deux formats de fichier prédéfinies dans OMNET++ pour la sauvegarde des résultats de la simulation : les *vector files* qui servent à l'enregistrement des résultats au fur et à mesure de l'exécution de la simulation (enregistrement à intervalle de temps régulier), et les *scalar files* qui servent à enregistrer des statistiques à la fin de l'exécution de la simulation. L'utilisateur peut définir ses propres formats de fichiers pour la sauvegarde des résultats. L'IDE fournit avec Omnet++ offre un environnement riche pour l'analyse de ces fichiers de résultat.

2.10 Présentation de Castalia

Castalia est un simulateur pour les RCSFs, les réseaux BAN (Body Area Networks), et plus généralement les réseaux contenant des dispositifs travaillant à une faible puissance.

Castalia est basé sur Omnet++ et peut être utilisé pour tester les algorithmes/protocoles distribués, en offrant des modèles réalistes du canal de communication sans fils et de la transmission radio, avec un comportement réaliste des nœuds capteurs. De plus, vu qu'il est hautement paramétrable, Castalia peut être utilisé pour tester l'influence de différents paramètres et caractéristiques sur le fonctionnement d'une application spécifique.

Les principales caractéristiques de Castalia sont :

- Un modèle réaliste du canal de communication sans fils, basé sur des mesures empiriques
 - Le modèle prend en compte la perte des données due à leur transition sur le canal de communication
 - Le modèle prend en compte la variation temporelle de la perte des données
 - Le modèle supporte la mobilité des nœuds
 - Le modèle prend en compte l'interférence lors du calcul de la puissance du signal reçu
- Un modèle détaillé de la transmission radio basé sur des radios réels pour les communications à basse puissance
 - La probabilité de la réception est basée sur le SINR, la taille du paquet et le type de modulation (les modulations PSK et FSK sont supportées et l'utilisateur peut définir des schémas de modulation personnalisés)

- L'utilisateur peut définir différents niveaux de puissances de transmission, ces puissances peuvent varier d'un nœud à l'autre
- La possibilité de définir plusieurs états dans lesquelles un nœud capteur peut se trouver, avec différentes consommations énergétiques et des délais de commutation en eux
- Une modélisation réaliste de la détection de la porteuse
- La prise en compte des dérives des horloges des nœuds
- Inclue une implémentation des protocoles MAC et des protocoles de routage communément utilisés dans le domaine des RCSFs
- Castalia a été conçue de façon à ce qu'il soit extensible

Concernant la dernière caractéristique, la conception de Castalia permet aux utilisateurs de facilement implémenter leur propres algorithmes et protocoles tout en faisant usage des caractéristiques qu'offre le simulateur. La modularité, la rapidité, et l'efficacité de Castalia est principalement due à Omnet++.

Castalia n'est pas un simulateur spécifique à une plateforme matérielle particulière des nœuds capteurs, mais plutôt un outil pour le test et la validation des algorithmes de haut niveau avant leur implémentation sur une plateforme matérielle particulière.

2.10.1 Structure de Castalia

La figure

Les modules ne sont pas connectés directement mais à travers le module qui représente le canal de communication sans fils. Les flèches représentent le transfert de messages entre les nœuds du réseau. Quand un nœud transmet un paquet, ce dernier passe par le canal de communication sans fils qui décide alors quels nœuds devraient le recevoir. Les nœuds sont aussi liés par les processus physiques (grandeurs physiques) qu'ils sont entraînés de surveiller. Chaque processus physique est modélisé par un module qui détient la quantité de la grandeur physique représentée par ce processus physique. Les nœuds échantillonnent les processus physiques (en envoyant un message au module correspondant) pour obtenir leurs lectures. Il peut y avoir plusieurs processus physiques dans une simulation.

Le nœud capteur est un module composé, la figure

tous les modules existants (application, routage, Mac, etc) sont hautement configurables, et peuvent être changés par l'utilisateur en créant de nouveaux modules afin de définir une nouvelle application, un nouveau protocole de routage, un nouveau modèle de mobilité etc.

Bibliographie