

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

• X • ΘΛ • ΣX [:// :V • X [• Λ [• O
FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE
ET INFORMATIQUE



Mémoire de fin d'études



En vue de l'obtention du diplôme de Master en informatique

« Option : Systèmes Informatiques »

Thème

*Agrégation de données à la volée pour un
réseau de capteur sans fil (RCSTF)*

Dirigé par :

M^r M. DAOUI

Réalisé par :

M^{lle} NOUALI Djouher

❧ Remerciements ❧

Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage et la volonté pour la réalisation de mon projet.

Je tiens à remercier vivement :

✓ Mon promoteur Mr DAOUI.M, pour sa disponibilité, son aide, ses conseils précieux, ses critiques constructives, ses explications et ses suggestions pertinentes.

✓ Je tiens à remercier Le professeur LALAM.M pour tous ses conseils précieux, ses orientations et ses encouragements

✓ Les membres du Jury pour avoir accepté d'évaluer et de juger notre travail.

✓ Ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de mon travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de mon grand père Akli

Mon grand-père Lounès

Mes grand-mères Zohra et Ouerdia

*Mes parents Drifa et Saïd pour leur aide précieuse et
sacrifices*

*Mon adorable frère Nabil, à qui je souhaite une réussite
totale dans ses projets*

Mes oncles, Mes tantes et leurs enfants

*Mon oncle Idir, sa femme Djamila et leurs enfants Akli,
Ghiles et Amira*

*A mes meilleurs amis de Sougueur Louiza, Mokhtar,
Saïd, Tinhinane et Hiba*

*Mes chères amies Amina MEZIOUD, Maroua
BOUDECHICHE, AROUDJ Djouher et KHALDI
Wissam aux quelles je souhaite une réussite dans leur
vie*

*Mr BENDELLAL.D le président de mon club el Hilal
SBA, à tous les membres du club El Hilal en particulier à
Amine FELLAH, notre capitaine CHERIF Abdellah et à
tous les échéphiles algériens*

*Mes amis, en particulier Nassima, Nacéra, Samia, Lyly,
Mira, Kahina, Lila, Wissam, Karima, Saber, Redha, Anis,
Takfarinas, Slimane, Yacine, Farid et à tous les étudiants du
département informatique.*

Djouher

Liste des figures

Liste des figures

Fig. I.1 : Exemple de réseau de capteur	2
Fig. I.2 : Classification des protocoles dans les réseaux ad hoc	4
Fig. I.3 : Les composants d'un nœud capteur	6
Fig. I.4 : Les plateformes de réseaux de capteurs	7
Fig. I.5 : Architecture d'un réseau de capteur	9
Fig. I.6 : La pile protocolaire des réseaux de capteurs.....	12
Fig. I.7 : Quelques exemples de types de scénarios dans les RCSF.....	15
Fig. II.1 : Représentation du nœud de fusion.....	22
Fig. II.2 : Messages envoyés sans agrégation	24
Fig. II.3 : Messages envoyés avec agrégation	25
Fig. II.4: Agrégation distribuée.....	26
Fig.III.1 Position du circuit d'agrégation dans un capteur sans fil	31
Fig.III.2 Schéma synoptique du circuit d'agrégation de données	33
Fig.III.3 Schéma de bloc du circuit	34
Fig.III.4 Schéma de bloc de deux tampons en mode flip flop.....	34
Fig.III.5 Schéma de bloc de l'organe de contrôle	35
Fig.III.6 Organigramme de conception de circuit numérique en VHDL	37
Fig.III.7 Les différents composants d'Active-HDL.....	38
Fig.III.8 Simulation VHDL des enregistrements dans le tampon	39
Fig.III.9 Simulation VHDL de la phase de vidage dans le tampon.....	40
Fig.III.10 Signaux du contrôleur lors de la première phase de captage	40
Fig.III.11 Signaux du contrôleur lors de du basculement des tampons.....	41
Fig.III.12 Signaux du contrôleur lors de la demande de transfert venant de l'unité de traitement.	41
Fig.III.13 Circuit FPGA	42
Fig.III.14 Description de la carte DE2.....	43

Acronymes

ADC: Analog-to-Digital Converter

ADS: Area Dominating Set Protocol

AOA: Angle of Arrival

AODV: Ad hoc On-demand Distance Vector routing protocol

ARMA: Association of Records Managers and administrators

ASIC: Application Specific Integrated Circuit

AVR: Automatic Voltage Regulator

CAN: Convertisseur analogique numérique

CAO: Conception assistée par ordinateur

CCD: Charge coupled device

CDA: Compact Disc Audio

CISC: Complex instruction set computer

CPU: Central Processing Unit

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency

DSDV: Destination Sequenced Distance Vector

DSR: Dynamic Source Routing protocol

FIFO: First in, First out.

FPGA: Field programmable gate array

FSK: Frequency shift keying

GARCH: Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity

GLoMo: Global versus Local Processing Model

GPRS: Global Packet Radio Service

GPS: Global Positioning System

HDL: High density lipoprotein

IBM: International Business Machines

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IETF: Internet Engineering Task Force

IrDA: Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

KB: kilobyte

LCD: Langage de contrôle de données.

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LED: Light Emitting Diode

LIMOS: Informatique, Modélisation et Optimisation des systèmes.

MAC: Medium Access Control

MANET: Mobile Ad Hoc Network.

MDA: Model Driven Architecture

MTS: Microsoft transaction system

OLSR: Optimized Link State Routing

PCMCIA : Personal Computer Card International Association

PDA: Personal Digital Assistant

RAM: Mémoire volatile à accès direct (*Random Access Memory*).

RCSF: Réseaux de Capteurs Sans Fil

RdCs: Réseaux de capteurs sans fil

RF : Radio Frequency

RISC: Type d'architecture matérielle de microprocesseur (*reduced instruction-set computer*).

RSSI: Receiver Signal Strength Indication.

SDRAM: Type de mémoire volatile (*Synchronous Dynamic Random Access Memory*).

STAR: Standardized Testing And Reporting

TDMA: Time Division Multiple Access

TDOA: Time Difference of Arrival

TEEN: Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

VCLA: Virginia Communication and Literacy Assessment

VGA: Virtual Grid Architecture routing

VHDL: VHSIC hardware description language

VHSIC: Very High Speed Integrated circuit

WSN: Réseau de capteurs sans fils (*Wireless Sensor Network*).

ZRP: Zone Routing Protocol

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Réseaux de capteurs sans fil.

Introduction.....	2
I. Définition	2
I.1. Définition d'un capteur	2
I.2. Définition d'un RCSF	2
II. Les réseaux Ad hoc.....	3
II.1.Définition	3
II.2.Les familles de protocoles de routages pour les réseaux ad hoc.....	4
II.2.1. Les protocoles hiérarchiques	5
II.2.2. Les protocoles géographiques.....	5
II.2.3. Les protocoles à plats.....	5
III. Composants d'un RCSF	5
IV. Architecture d'un nœud capteur	6
V. Technologies des nœuds capteurs	7
VI. Caractéristiques des RCSF	8
VI.1.Architecture d'un RCSF	8
VI.2.Les différents facteurs de conception	9
VI.2.1. Tolérance aux pannes	9
VI.2.2. Coût de fabrication	10
VI.2.3. Topologie du réseau	10
VI.2.4. Consommation d'énergie	10
VI.3.Architecture protocolaire	11
VI.4. Vue d'ensemble des plates-formes existantes	12
VII. Applications des RCSF	14
VIII. Types des RCSF	17
IX. Catégories de communication.....	17
X. Contraintes des RCSF	18
X.1. Duré de vie du réseau	18
X.2.Ressources limités	18
X.3.Bande passante limitée	18
X.4.Facteurs d'échelle.....	18
X.5. Topologie dynamique.....	19
X.6. Redondance de données	19
Conclusion	19

Chapitre II : Fusion et agrégation de données dans les RCSF

Introduction.....	20
I. Fusion de données dans les RCSF	20
I.1. Définition de la fusion de données.....	20
I.2.Objectif de la fusion de données.....	20
I.3. Etapes de la fusion de données	21
I.4. Architecture de la fusion de données	22
I.5. Applications de la fusion de données.....	23
I.5.1. Domaines d'applications de la fusion de données	23
I.5.2. Réseaux multi-capteurs	23
II. Agrégation de données dans les RCSF	24
II.1. Définition de l'agrégation de données	24
II.2. Problématique de l'agrégation de données.....	25
II.3. Types d'agrégation de données.....	25
II.4. Etat de l'art sur l'agrégation de données.....	26
II.4.1. Le modèle ARMA.....	26
II.4.2.Les modèles ARCH	27
II.4.3. Agrégation MAC.....	27
II.5. Protocoles d'agrégation de données	28
II.5.1. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH).....	28
II.5.2. Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN)..	28
II.5.3. COUGAR.....	28
Conclusion.....	29

Chapitre III : Implémentation du circuit d'agrégation de données.

Introduction	30
I. Problématique et solution proposée	30
II. Algorithme d'agrégation de données à la volée dans un WSN	31
III. Description du circuit d'agrégation de données	32
IV. Description des modules du circuit d'agrégation de données.....	33
VI.1.Schéma de bloc du circuit d'agrégation	33
VI.2. Les deux tampons en mode flip flop	34
VI.3. L'organe de contrôle	35
V. Outils de simulation VHDL	35
V.1.Langage VHDL	35
V.2. Le logiciel Active-HDL	38
VI. La simulation VHDL	38
VI.1.La simulation de la phase de remplissage	38
VI.2.La simulation de la phase de vidage	39
VI.3. La simulation du contrôleur	40
VII. L'implémentation en un circuit FPGA.....	42
VII.1.Le circuit FPGA	42
VII.2.Les étapes d'implémentation	43

VII.2.1. Synthèse	43
VII.2.2. Mapping	44
VII.2.3. Placement routage	44
VII.2.4. Configuration	44
Conclusion	45
Conclusion générale	46
Bibliographie	
Annexe	
Circuit of Data Aggregation on the Fly for WSN M. DAOUI, M. LALAM, S.	
HAMRIOUI B. DJAMAH and D. NOUALI Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	

Introduction Générale

Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler les environnements hostiles est devenu essentiel pour de nombreuses applications militaires et scientifiques. Ceci nécessite une nouvelle technologie qui prend en considération la sensibilité de l'environnement et qui fournit des informations pertinentes sur le milieu balayé. Ainsi, des progrès récents dans les communications sans fil et le domaine de l'électronique ont permis le développement de minis composants moins coûteux et multifonctionnels. Ces derniers sont capables de détecter différents types d'informations, comme la température, l'humidité, la lumière, les vibrations sismiques, et la présence ou la nature d'organismes biologiques. De plus, ils se doivent d'être autonomes, d'une taille miniature et peuvent être déployés d'une manière dense et aléatoire dans le champ surveillé. Ces dispositifs sont appelés des "nœuds de senseurs" et peuvent être repartis sur le sol, dans les véhicules, à l'intérieur des constructions et même sur le corps humain. Comme ils peuvent être connectés sans être reliés physiquement, ils constituent un réseau de senseurs sans fil capable de rassembler, traiter et relayer les informations entre les nœuds.

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 des 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.

Notre objectif majeur à travers ce projet est de proposer une simple méthode d'agrégation de données à la volée dans les réseaux de capteurs sans fils afin d'éliminer les données redondantes en vue de leur transmission dans un minimum de paquets assurant ainsi un gain en énergie et en bande passante et ensuite l'implémentation matérielle de notre solution permet de soulager la CPU qui réservera toute sa puissance pour d'autres traitements.

Pour la rédaction de ce mémoire, nous avons organisé notre démarche en trois chapitres, nous commencerons d'abord par le chapitre 1 qui englobe des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, nous passerons en suite au chapitre 2 intitulé : La fusion et agrégation de données dans les réseaux de capteurs sans fil. Le chapitre 3 sera consacré à la présentation de notre solution et son implémentation et terminerons par une conclusion générale, sans oublier de citer les références bibliographique sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour mener à bien ce travail.

CHAPITRE

Réseaux de capteurs sans fil

Introduction

Le progrès réalisé dans le domaine sans fils a contribué à l'évolution de l'Internet en facilitant l'accès aux usagers. L'évolution dans le domaine des communications sans fils et l'informatique mobile gagne de plus en plus de popularité et les composants mobiles deviennent de plus en plus fréquents (PDA, laptops, handsets). Ceci a permis l'apparition d'un nouveau type de réseaux sans fils appelé réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication et leurs applications. Nous discuterons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil.

I. Définitions

I.1. Définition d'un capteur [1]

Un capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat. Ces mesures peuvent tant concerner la température, la pression que la lumière ou le son. Son rôle est également de transformer l'état de ces grandeurs physiques observées afin qu'elles soient plus aisément manipulables, par exemple en un signal numérique utilisable par un ordinateur.

I.2. Définition d'un RCSF [2]

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil.

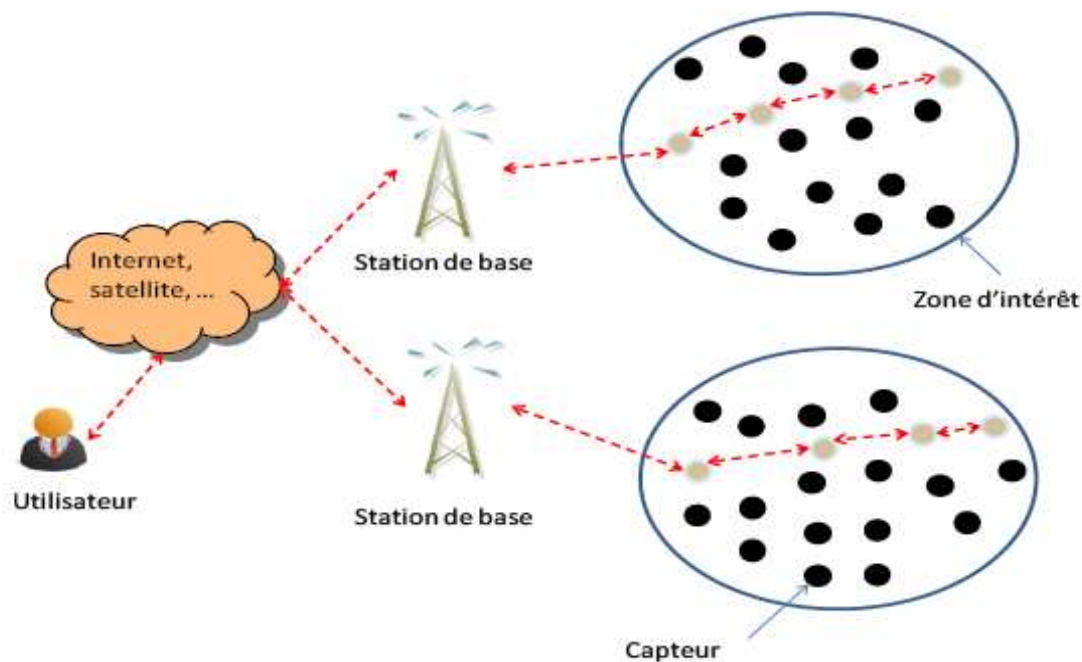


Fig.I.1 Exemple de réseau de capteurs

II. Les réseaux ad hoc

Les réseaux de capteurs constituant une spécialisation des réseaux ad hoc, nous allons brièvement présenter ce type d'architecture réseau.

II.1 Définition

Un réseau ad hoc se définit alors comme un système formé de noeuds ne disposant d'aucune infrastructure, communiquant par ondes radio, où chaque noeud offre un service relais permettant de réémettre un message dont il n'est pas destinataire à un noeud qui est hors de portée radio de l'émetteur du message [3]. Cette technique de réémission très utilisée dans les réseaux ad hoc dépourvus d'infrastructure porte le nom de multisaut ou multihop.

A la base, les réseaux ad hoc sont une application militaire née dans les années 1970 avec le Projet PRNet de la DARPA qui correspond à l'agence pour les projets de recherche avancée de défense des Etats-Unis. Ces réseaux illustrent proprement le concept de lieu de combat où il n'y a pas d'infrastructure préexistante et dans lequel le multisaut permet de pallier le problème de dispositif n'étant pas à portée radio. D'autres projets militaires sponsorisés par DARPA suivront tel que SURAN (SURvivable Radio Network) en 1983, prolongement de PRNet, ayant pour but de combler les lacunes rencontrées expérimentalement par PRnet avec un champ d'application un peu plus large que le champ de bataille ou encore GLoMo (Global Mobile Information System) en 1994 avec pour mission l'étude des possibilités d'adaptation des concepts d'internet à des terminaux mobiles.

Cette technologie finira par aussi susciter un intérêt pour les applications civiles qui se traduira par la création du groupe MANET par l'IETF en 1995. Les caractéristiques de ces réseaux font que la manière d'acheminer les informations est très importante. On distingue

alors différents types de protocoles de routage illustrés sur la figure Fig. I.2. Cette figure n'est qu'un support mais d'autres familles et références peuvent bien sûr être ajoutées.

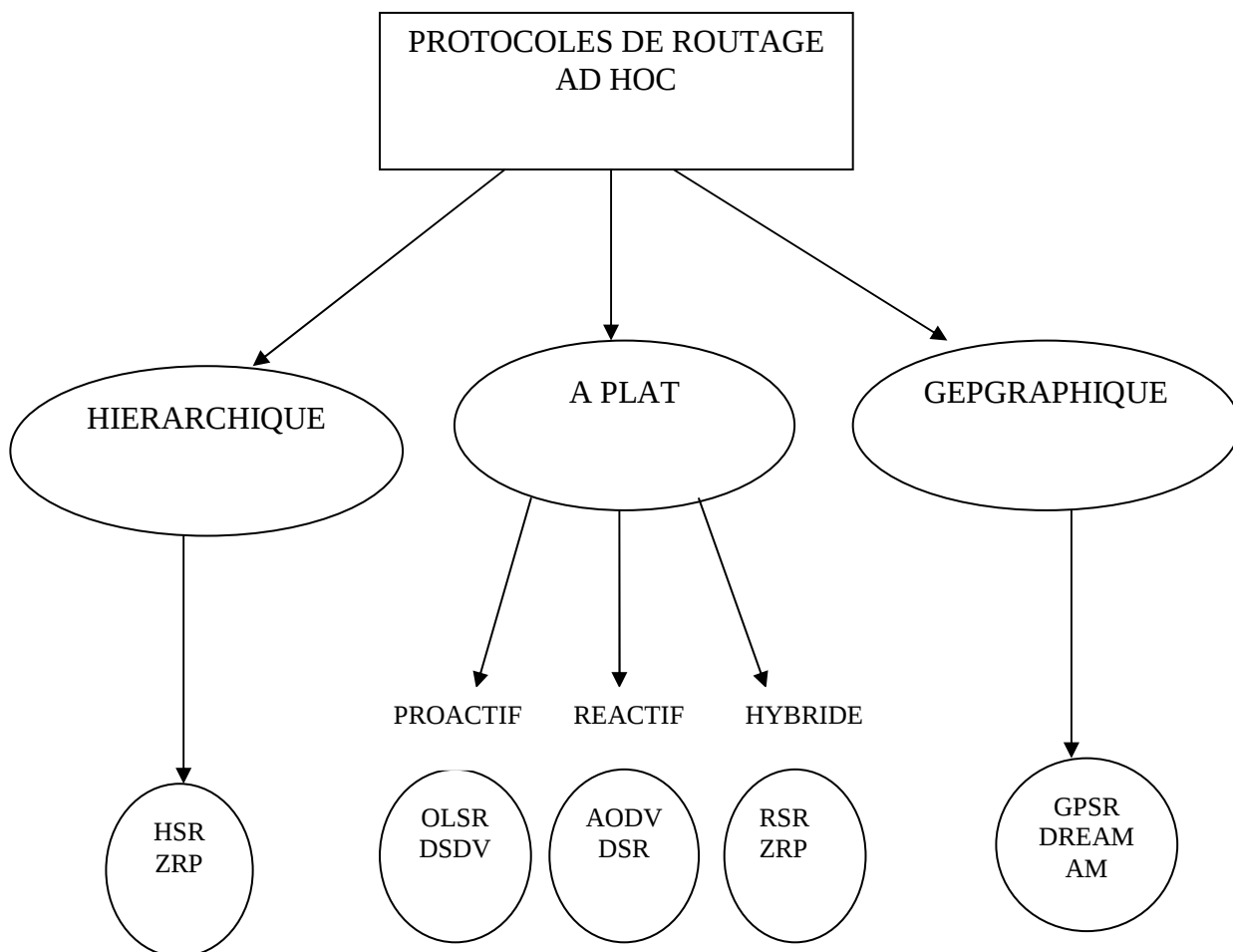


Fig. I.2 Classification des protocoles dans les réseaux ad hoc

Les principales caractéristiques dans ces environnements sont :

- Une topologie dynamique.
- Une sécurité des communications limitée.
- Des contraintes d'énergie.
- Une bande passante limitée.
- L'absence d'infrastructure.

Sur la figure Fig. I.2, les principales familles de protocoles de routage pour les réseaux ad hoc sont : hiérarchiques, géographiques et les protocoles à plat.

II.2 les familles de protocoles de routage pour les réseaux ad hoc

II.2.1 Les protocoles hiérarchiques

Le point clé dans un protocole de routage hiérarchique est la différenciation entre les nœuds du réseau. Cette distinction peut se faire au niveau physique ou au niveau logique.

- Au niveau physique : lorsqu'il y a une différenciation au niveau matériel, les nœuds sont hétérogènes et différents de par leurs capacités et fonctionnalités. De ce fait, certains nœuds disposent de caractéristiques supplémentaires et peuvent réaliser des tâches plus complexes que d'autres nœuds. Cependant, il existe un coût supplémentaire au niveau du prix et de la consommation énergétique pour les dispositifs qui ont plus de fonctionnalités.
- Au niveau logique : dans un réseau homogène les nœuds peuvent également être hiérarchisés selon leurs fonctionnalités. Dans un découpage en cluster par exemple, permettant de partitionner le réseau et donc de le structurer, certains nœuds appelés cluster-heads ou encore tête de clusters ont pour rôle d'organiser leurs clusters respectifs. Les clusterheads qui sont des nœuds de niveau supérieur dans la hiérarchisation peuvent communiquer exclusivement entre eux. Le principe de base d'un protocole de routage hiérarchique est de créer une topologie virtuelle dans un réseau dense, puis de l'exploiter pour router les paquets. Cette architecture facilite l'échange de paquets lors du passage à l'échelle de ce type de réseau car il y a des échanges intra-zones et interzones organisés.

II.2.2 Les protocoles géographiques

Dans les protocoles qui utilisent le concept de routage géographique, les nœuds sont supposés connaître leur position :

- Soit en utilisant un module externe comme le GPS,
- Soit en utilisant des mesures du signal (RSSI, TDOA, AOA).

Une fois les positions connues par les nœuds, ils déterminent le chemin vers une destination en fonction de ses coordonnées [4]. Le protocole LAR par exemple exploite la connaissance des coordonnées du nœud émetteur et du nœud récepteur pour optimiser la procédure d'inondation. Il est aussi important de noter que l'ajout d'un module de géo localisation, comme le GPS par exemple, est coûteux, ce qui pousse certaines solutions à se servir juste de quelques nœuds repères, appelés ancres, qui connaissent leurs positions pour déterminer la position des autres nœuds en utilisant des techniques de triangulation.

II.2.3 Les protocoles à plats

Les protocoles à plat sont les plus répandus car ils peuvent être utilisés par les autres familles de protocoles comme les protocoles hiérarchiques et géographiques. Dans ces protocoles, tous les nœuds ont le même rôle et sont homogènes en termes de ressources. On distingue trois catégories de routage pour ces protocoles :

- Le routage proactif où les routes sont établies à l'avance,
- Le routage réactif où les routes sont recherchées à la demande,
- Le routage hybride qui constitue un mélange des deux précédents.

III. Composants d'un réseau de capteur

Un réseau de capteurs sans fil est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs dispersés dans le terrain d'intérêt appelé champ de captage. Les nœuds ont la possibilité de collecter périodiquement les données sur le phénomène surveillé et envoyer les rapports de captage à un nœud spécial appelé puits (sink). Ce nœud est responsable, en plus de la collecte des rapports, de la diffusion des demandes sur les types de données requise aux capteurs via des messages de requêtes. Un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds puits diffusant des intérêts différents. Par exemple, un nœud puits peut demander à tous les capteurs se trouvant dans la région nord du champ de captage d'envoyer un rapport de température chaque 1 minute, pendant qu'un autre peut être intéressé seulement par les hautes température ($> 40^{\circ}\text{C}$) dans la région sud. Par conséquent, un capteur doit pouvoir stocker toutes les requêtes reçues, et les traiter séparément.

IV. Architecture d'un nœud de capteur :

Un nœud capteur est composé de quatre unités principales, qui sont présentées dans la figure I.3 [5] [6] :

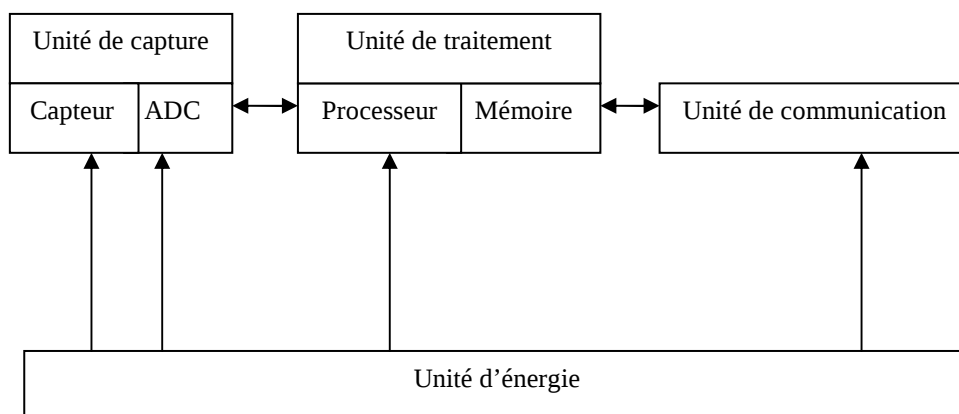


Figure I.3 les composants d'un nœud capteur.

- **Unité de capture (Sensing unit)** : elle est composée de deux sous unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters).
- **Unité de traitement (Processing unit)** : les données captées sont communiquées au processeur où elles sont stockées dans la mémoire.
- **Unité de communication (Transceiver unit)** : elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) permettant la communication entre les différents nœuds du réseau.
- **Unité d'énergie (Power unit)** : c'est la batterie qui, n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. Les unités d'énergie peuvent être supportées par des photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique.

V. Technologies des nœuds capteurs :

Le développement rapide dans les domaines de l'informatique, de l'électronique et des technologies sans fil a abouti à l'émergence de petits dispositifs distribués capables de surveiller de manière autonome nos environnements pour nous prévenir des éventuelles catastrophes : les réseaux de capteurs. Ces mêmes progrès scientifiques qui mettent à disposition différentes plateformes de réseau de capteurs (Figure.I.4), procurent une vision pragmatique à la recherche dans les RdCs.

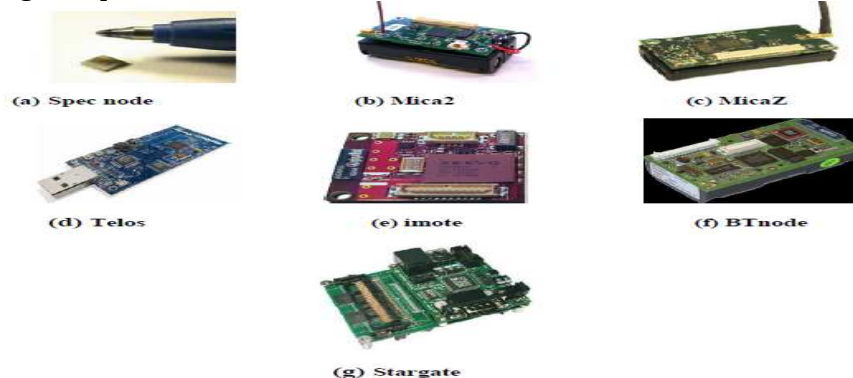


Figure I.4 Les plateformes de réseaux de capteur

En utilisant ces plateformes, les chercheurs peuvent valider et exploiter des résultats obtenus dans des conditions réelles et ne pas se contenter de résultats fournis par des simulateurs. La Figure I.4 illustre bien la disponibilité du matériel, la multiplicité des plateformes et la rapidité de renouvellement de celles-ci où quasiment chaque année une nouvelle plateforme est mise sur le marché. Il existe encore beaucoup d'autres plateformes, mais pour ne pas surcharger l'image elles n'ont pas été toutes représentées. Cependant, une liste exhaustive est disponible sur le site The Sensor Network Museum [7].

Les applications utilisant les réseaux de capteurs étant de plus en plus fréquentes et complexes, le nombre de plateformes aussi se multiplie vu le nombre croissant d'applications visées. Celles-ci diffèrent de par leurs capacités mémoire, leurs unités de traitement, leurs modules de transmission ou encore leurs tailles.

Sur la Figure I.4, (a) Spec node qui est une puce conçue à l'Université de Californie, à Berkeley, pour des opérations de coût ultra-faible et de faible puissance. Ce petit bijou technologique mesure approximativement 2mm x 2.5mm. Il se compose d'un microcontrôleur 8 bit Atmel AVR RISC, une mémoire (3K) et une communication radio basée sur la modulation par déplacement de fréquence (FSK).

Les nœuds Mica2 (b), MicaZ (c) et Telos (d) ce sont des plateformes Crossbow [8], qui sont les plus populaires et permettent des captures génériques.

Les nœuds Mica2, utilisant des piles de types AA pour fonctionner, sont équipées de plusieurs capteurs : lumière, température, pression barométrique, accéléromètre, et disposent d'un cœur de processeur Atmel AVR. Celles-ci diffèrent des nœuds micaZ au niveau du module de transmission qui est respectivement pour la mica2 et MicaZ un Chipcon CC1000 et un Chipcon CC2420.

La principale différence entre ces deux transceivers est le fait que le Chipcon CC2420 est conforme au standard IEEE 802.15.4/ZigBee tandis que le Chipcon CC1000 utilise les bandes de fréquence 315/433/868 et 915 MHz dont certaines sont interdites dans certains pays du monde tels que le Japon (qui interdit l'utilisation entre 433- 915 MHz) ou encore l'Europe (qui interdit la bande de 915 MHz).

A cela s'ajoute la différence de portée qui est plus longue par exemple à 433 MHz mais aussi le débit qui est respectivement pour le Chipcon CC1000 et le Chipcon CC2420 de 38,4 Kbps et de 250 Kbps.

La famille des Telos, c'est à dire des noeuds de capteurs avec USB, diffère principalement de celles qui précèdent au niveau du microcontrôleur. Les noeuds de type telos tournent sur des microcontrôleurs fabriqués par Texas Instruments appelé TI MSP430 [9], conçus pour des applications embarquées à basse consommation. C'est un dispositif qui consomme très peu et compatible avec la norme IEEE 802.15.4 pour la communication sans fil.

Comme la mote MicaZ son transceiver est de type Chipcon CC2420. Imote (e) développé par Intel Research et BTnode (f) élaborée à l'ETH de Zurich. Ces capteurs dotés d'architectures 32 bits et à haut débit qui utilisent la technologie sans fil Bluetooth comme moyen de communication. En effet, ils utilisent Bluetooth qui a un débit plus élevé et donc peuvent transmettre des informations plus volumineuses ou encore le même type information mais plus rapidement.

Stargate (g) à haut débit, capable de capturer des informations, les agréger puis les transmettre et ainsi donc de former une passerelle avec d'autres réseaux tel que internet. Il est conçu par Intel et produit par Crossbow. La plateforme Stargate est basée sur un processeur 32 bit d'Intel, PXA-255 XScale à 400 MHz, qui dispose de 32 Mo de mémoire flash, 64 Moctets de mémoire SDRAM, et de connecteurs Crossbow pour les motes mica2 ou micaZ ainsi qu'une entrée PCMCIA pour avoir une interface Bluetooth ou IEEE 802.11.

Il faut noter que l'énergie consommée est proportionnelle au nombre de portes logiques (CISC > RISC, ou encore une architecture 32 bits > 16 bits), à la vitesse (plus il est lent et moins il y a de communication de portes et donc la consommation est réduite) et à la durée de fonctionnement pour exécuter une tâche donnée [4].

VI. Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil :

VI.1. Architecture d'un réseau de capteur sans fil :

Un réseau de capteur sans fil, est un système distribué de grande échelle mettant en communication un grand nombre d'entités autonomes « noeuds capteurs ». Ces noeuds sont reliés à une ou plusieurs passerelles (sinks) qui permettent l'interconnexion avec d'autre réseaux (Internet, satellites,...).

Dans un scénario d'application classique, plusieurs noeuds capteurs sont déployés dans une zone « sensor field », un certain environnement pour mesurer certains phénomènes physiques et de faire remonter les informations collectées à une station de base, puits ou sinks (une porte d'entrée vers le monde extérieur qui fait l'interface entre le réseau capteur et l'utilisateur des données). Dans le cas le plus simple, les noeuds seront dans le voisinage direct du puits (un réseau de types étoilé a un saut). Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, les capteurs ne sont pas tous dans le voisinage du puits et les messages seront acheminés du nœud

source vers le puits en transitant par plusieurs noeuds, selon un mode de communication multi saut, comme l'illustre la figure I.5 suivante

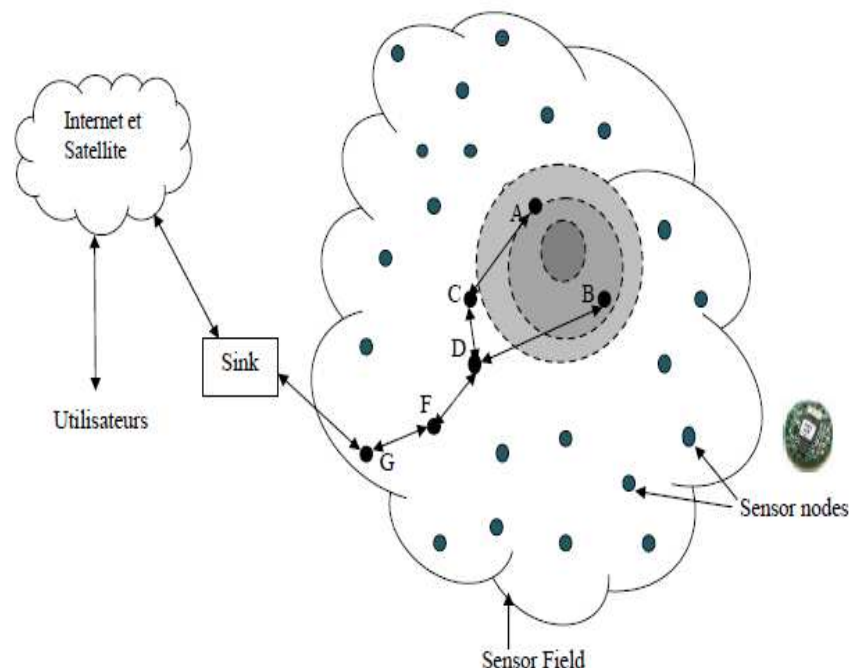


Fig. I.5 Architecture d'un Réseau de Capteur

Un réseau de capteur sans fil est un type particulier de réseaux ad hoc qui sont utilisés pour l'interconnexion spontanée des systèmes informatiques [10]. Dans un réseau ad hoc, les entités sont en mesure de s'organiser entre elles pour former le réseau sans l'aide d'une infrastructure fixe définie à l'avance, ni d'une intervention humaine. Les nœuds ont la capacité de jouer le rôle de routeurs.

Les principales différences entre les réseaux de capteurs sans fils et les réseaux ad hoc traditionnels sont le problème de l'énergie et le facteur d'échelle.

VI.2 Les différents facteurs de conception :

La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs comme la tolérance aux pannes, les coûts de production, la consommation d'énergie, l'environnement ou la topologie du réseau. Ces facteurs représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs.

VI.2.1 Tolérance aux pannes :

Les noeuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de 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.

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [11]. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruptions.

Les protocoles conçus pour les réseaux de capteurs doivent atteindre le niveau de tolérance aux pannes requis par les réseaux, cela dépend essentiellement de l'environnement de déploiement du réseau, des caractéristiques des nœuds capteurs, etc.

VI.2.2 Coût de fabrication :

Les nœuds sont des produits fabriqués en série du fait de leur grand nombre. Il faut que le coût de fabrication de ces nœuds soit tel que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt.

VI.2.3 Topologie du réseau :

En raison de leur forte densité dans la zone à observer, il faut que les nœuds capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau :

- **Déploiement :** Les nœuds sont soit répartis d'une manière prédéfinie soit de manière aléatoire (lancés en masse depuis un avion). Il faut alors que ceux-ci s'organisent d'une manière autonome.
- **Post-déploiement - Exploitation :** Durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des nœuds ou bien à des pannes.
- **Redéploiement :** L'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.

VI.2.4 Consommation d'énergie :

L'économie de l'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge de ressources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner. Les réseaux de capteurs fonctionnent selon un mode de routage par saut, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie et impose une réorganisation du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs. La majorité des travaux de recherche se concentrent sur ce problème afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de réseau qui consomment le minimum d'énergie.

VI.2.4.1 Phases de consommation d'énergie :

Détecter les événements dans l'environnement capté, élaborer un traitement de données local et rapide, et transmettre les résultats à l'utilisateur sont les principales tâches d'un nœud dans un réseau de capteurs. Les étapes de consommation d'énergie par ce nœud peuvent être, dès lors, divisées en trois phases : le captage, la communication et le traitement de données.

Phase de captage

L'énergie consommée au moment de captage varie suivant la nature de l'application. Un captage sporadique consomme moins d'énergie qu'un contrôle d'événement constant. La

complexité de l'événement à détecter joue également un rôle crucial pour déterminer la quantité d'énergie consommée. Les environnements contenant un niveau de bruit élevé entraîne l'augmentation de l'énergie nécessaire pour cette phase.

Phase de communication

Parmi les trois phases citées auparavant, la phase de communication de donnée est celle qui consomme la plus grande quantité d'énergie [12], ceci, à cause de la multitude de composants électroniques intégrés au circuit responsable de cette opération. Cette phase implique les deux étapes d'émission et de réception de données. Il est démontré que pour les communications à courte portée, avec une faible puissance de radiation, les coûts énergétiques pour l'émission et la réception de données sont pratiquement égaux. Durant cette phase, il est important de considérer l'énergie nécessaire pour la mise en marche du circuit de communication, le temps de démarrage étant égal à plusieurs centaines de microsecondes rend l'énergie consommée durant cette période non négligeable. L'influence de cette étape sur la quantité globale d'énergie consommée par la communication augmente quand la taille des paquets transmis diminue. Par conséquent, une bonne politique de consommation d'énergie passe obligatoirement par éviter au maximum le recours à la mise en marche et l'arrêt fréquents des circuits de communication.

Phase de traitement de données

Comparé à la phase de communication, l'étape de traitement local des données consomme beaucoup moins d'énergie [12]. En effet, le coût énergétique nécessaire pour transmettre 1 KB sur une portée de 100 m est approximativement égal à celui nécessaire pour exécuter 3 millions d'instructions à une vitesse de 100 millions instructions par seconde, ce fait, favorise largement le traitement local des données pour l'amélioration de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Les nœuds capteurs doivent donc posséder des moyens de traitement local de données, tout en restant capable d'interagir avec les nœuds avoisinants. Enfin il est à noter qu'un nœud peut contenir des circuits additionnel pour le codage/décodage des données, en plus de certains circuits spécifiques aux applications du réseau, dans tous ces cas, la conception des algorithmes et protocoles du réseau est influencé largement par l'énergie consommée par ces circuits en plus de ceux invoqués précédemment.

VI.3. Architecture protocolaire :

La pile de protocole utilisée par le « puits » ou « Sink » ainsi que par les autres nœuds capteurs est donnée dans la figure 1.11. Cette pile de protocoles combine routage et gestion d'énergie et intègre les données avec les protocoles réseau. Elle communique de manière efficace (terme d'énergie) à travers le support sans fil et favorise les efforts de coopération entre les nœuds capteurs. La pile protocolaire comprend une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique, un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches. Selon les tâches de détections, différents types de logiciels d'applications peuvent être construits et utilisés dans la couche application. La couche transport contribue au maintien du flux de données si l'application de réseau de capteurs l'exige. La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport. Comme l'environnement sujet au bruit et que les nœuds capteurs peuvent être mobiles, le protocole MAC doit tenir compte de la consommation d'énergie et doit être en mesure de réduire les collisions entre les nœuds voisins lors d'une diffusion par exemple. La couche physique répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et de techniques de transmission et de réception

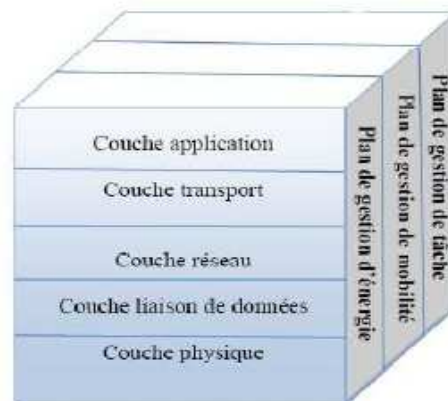


Fig. I.6 : La pile protocolaire des réseaux de capteurs.

En outre, les plans de gestion d'énergie, de mobilité et des tâches surveillent et gèrent la consommation d'énergie, les mouvements, et la répartition des tâches entre les nœuds capteurs. Ces plans aident à coordonner les tâches de détections et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie.

Plans de gestion d'énergie : contrôle l'utilisation de la batterie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée au captage.

Plans de gestion de mobilité : détecte et enregistre le mouvement du nœud capteur. Ainsi un retour arrière vers l'utilisateur est toujours maintenu et le capteur peut garder trace de ses nœuds voisins. En déterminant leurs voisins, les nœuds capteurs peuvent balancer l'utilisation de leur énergie et la réalisation de tâche.

Plans de gestion de tâche : balance et ordonnance les différentes tâches de captage de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de captage au même temps, certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie.

VI.4 Vue d'ensemble des plates-formes existantes :

Comme un certain nombre de technologies connues à ce jour, les nœuds de capteurs sans fil doivent être nés d'un projet militaire, ce qui entrave la mise en place d'une chronographie précise de leur développement. Cependant le titre de premier prototype de nœuds de capteurs sans fil correspond au module LWIM (Low-power Wireless Integrated Micro sensors) développé dans le milieu des années 90 par l'Agence pour les Projets de Recherche Avancée de Défense (DARPA) des Etats-Unis et l'UCLA [13]. Il s'agissait d'un géophone équipé d'un capteur de transmission radiofréquence et d'un contrôleur PIC. Depuis un peu plus de 10 ans, la technologie de capteurs sans fil a beaucoup évolué. Les modules deviennent de plus en plus petits et les durées de vie prévues augmentent. Aujourd'hui, le marché de nœuds a été ouvert

à l'industrie. Le fournisseur le plus connu est Crossbow Inc., avec son offre de capteur Mica2 et Micaz.

Le tableau I.1 recense les différents composants actuellement disponibles sur le marché. Le concept prévalent dans le développement des noeuds de capteurs est la conception modulaire. En effet, tous les noeuds de la table 1.1, sont en fait des cartes intégrées qui regroupent l'unité de communication et l'unité de traitement, tandis que l'unité de captage est conçue comme une carte distincte qui peut être attaché sur l'unité principale. Cela permet bien sûr de pouvoir réutiliser les mêmes unités pour différentes applications. Par exemple un nœud Mica2 peut être combiné avec une carte MTS310, qui comprend un capteur de température, capteur de lumière, un capteur de son, un capteur de champ magnétique, et un accéléromètre à deux axes. De même nous pouvons combiner le noeud Mica2 avec une carte MTS420 pour le doté d'un capteur d'humidité et d'un capteur de pression barométrique, et même d'un GPS pour le positionnement géographique. Une autre possibilité pour la même unité est l'ajout d'une carte d'acquisition MDA320 [13].

Compte tenu des impératifs d'économie d'énergie que doivent respecter les nœuds de capteurs sans fil, un grand nombre de capteur peuvent basculés, par programmation, dans différents modes d'activités. Ainsi, un noeud capteur peut passer d'un mode actif, où le nœud est en pleine capacité de travail (toutes les unités sont opérationnelles), à un mode sommeil, où tout ou partie de ses éléments sont inactivés pour économiser l'énergie. Dans ce dernier mode, le minimum est laissé actif de sort que le noeud puisse revenir à l'état s'il juge nécessaire (par exemple, après un certain temps).

La plupart des fabricants adoptent des émetteurs RF à basse fréquence. Certains ont choisi de mettre en œuvre un protocole d'origine récente conçus pour les modules sans fil industriels et spécifié dans la norme IEEE 802.15.4. Ce protocole de transmission opère dans la bande de fréquence des 2.4GHz. Les microcontrôleurs choisis sont généralement d'une faible vitesse et

de très faible consommation d'énergie. De même, la mémoire disponible pour les programmes et les données est très réduite en comparaison avec celle des équipements informatiques d'aujourd'hui.

Imote2	Crossbow	Intel PXA271 256 ko mémoire SRAM 32 Mo mémoire SDRAM 32 Mo mémoire flash	TI CC2420 (bande ISM, de 2400 à 2483.5 MHz, 250 kbps)	Connecteur pour carte de capteurs externe	3.2 - 4.5V
Imote Sky	Moteiv (Sentilla)	Texas Instruments MSP430 F1611 (10Ko RAM, 48Ko Flash, 128o stockage d'information)	Chipcon CC2420	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.1 - 3.6V
BTnode rev3	ETH	Atmel ATmega128L 64+180 Kbyte RAM EEPROM 4 Ko	Bluetooth, CC1000	Connecteur pour carte de capteurs externe	DC externe 3.8 - 5V ou 2AA
Particle 2/29	TECO	PIC 18F6720 (20 MHz), Mémoire interne : 128Ko de mémoire de programme, 4Ko RAM, 1Ko EEPROM, 512 Ko Mémoire flash pour des données	TR1001 (RFM, bande passante 125Ko, bands ISM 868.35 ou 315 MHz)	Connecteur pour carte de capteurs externe	0.9 - 3.3 V

Plate- forme	Fabriquant	Unité Traitement	Unité Communication	Unité de Captage	Unité de Puissance
MICA2	Crossbow	Atmel ATmega128L (128 Ko de mémoire de programme, 4 Ko RAM) 512 ko mémoire flash pour des données EEPROM 4 Ko (configuration)	CC1000 (radio transcepteur multi-freq, 868/916 - 433 - 315 MHz, 38.4Kbaud)	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.7 - 3.3V
MICAZ	Crossbow	Atmel ATmega128L 512 ko mémoire flash pour des données EEPROM 4 Ko (configuration)	Chipcon CC2420 (radio transcepteur 802.15.4, bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz, 250 kbps)	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.7 - 3.3V
IRIS	Crossbow	Atmel ATmega128L (128 Ko de mémoire de programme, 8 Ko RAM) 512 ko mémoire flash pour des données EEPROM 4 Ko (configuration)	Radio transcepteur 802.15.4 (bande ISM, de 2400 à 2480 MHz, 250 kbps)	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.7 - 3.3V

Tab I.1 Caractéristiques de nœuds de capteurs existants actuellement.

VII. Applications des RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes du 21^{ème} siècle [14]. En effet, la recherche dans le domaine des capteurs est en train de vivre une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines. Ainsi, nous classifions les applications des RCSF en quatre classes d'applications : orientées temps (time driven), orientées événements (event driven), orientées requêtes (query driven) et hybride [15].

- **Applications périodiques**

Les capteurs prennent des mesures dans des intervalles de temps réguliers, et ils envoient des données au puits de manière périodiques. Dans l'exemple de la figure I.7 (a), une image est capturée périodiquement par le noeud A, puis, il envoie les paquets vers le puits à travers les noeuds 1 et 2.

- **Applications à la demande (On-Demand)**

Les capteurs attendent de recevoir un ordre du puits pour déclencher une mesure et l'envoyer. Cet ordre peut être généré par la demande manuelle d'un utilisateur humain ou d'une tâche automatique programmée. Dans l'exemple de la figure I.7 (b), une demande est adressée au noeud source A, le message est acheminé à travers les noeuds 2 et 1, et à sa réception, A active son unité de captage et envoie ces mesures vers le puits, cette fois par le chemin constitué des noeuds intermédiaires 3, 4 et 2.

- **Applications événementielles (Event-Driven)**

Dans ce type d'applications, l'envoi de données vers le puits est déclenché lorsqu'un événement particulier est détecté. Les événements peuvent être causés par un dépassement de seuil dans les mesures récoltés par le capteur. Dans l'exemple de la figure I.7 (c), le noeud capteur A détecte un événement causé par un objet qui traverse sa zone de détection, et commence à envoyer ces mesures vers le puits à travers les noeuds capteurs 1 et 2.

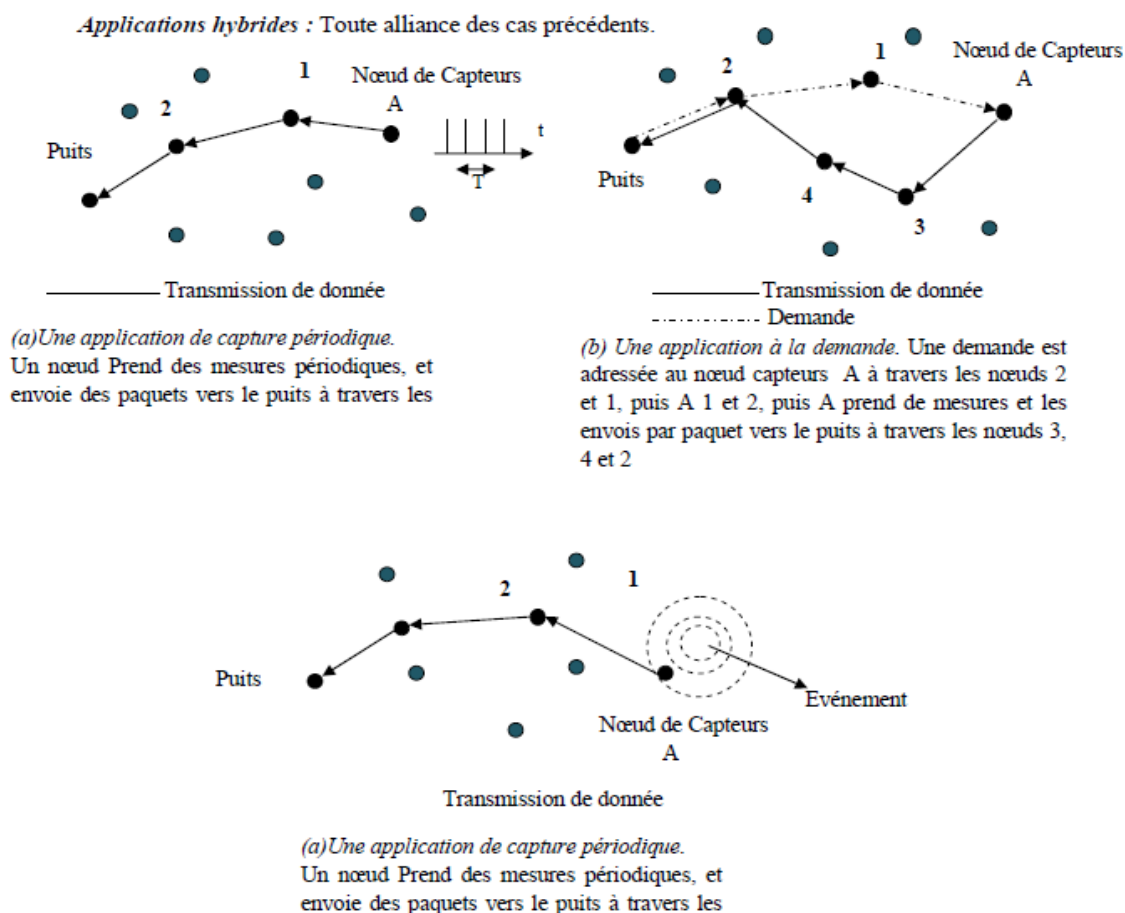


Figure. I.7 Quelques exemples de types de scénario pour les réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil ont trouvé un ensemble de très vaste d'application dans divers domaines [16], parmi lesquels on peut citer les applications militaires, environnementales, industrielles et de surveillances en général.

- **Applications militaires**

Les premières applications potentielles des réseaux de capteurs ont concerné le domaine militaire. L'idée était de déployer un réseau de capteurs nanoscopiques (donc invisibles) sur des champs de bataille ou des zones ennemies pour surveiller les mouvements des troupes. Historiquement, le projet DARPA, qui a déjà été cité, a donné comme résultat les nœuds expérimentaux LWIM (très rudimentaires et assez volumineux) qui communiquaient selon une topologie en étoile. Les applications militaires sont les premières et certainement les plus représentatives des applications trouvées actuellement dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil.

Dans [17], nous trouvons les résultats d'une expérience intitulée « A Line in the Sand » (« Une ligne dans le sable ») où un réseau de capteurs sans fil était déployé dans un scénario de sécurité. Ce réseau était constitué de 90 nœuds Mica2 dotés de capteurs de métaux et de capteurs de mouvement TWR-ISM-002. Il a été déployé sur la base militaire de MacDill (Air Force Base) à Tampa (Floride), et d'autres zones d'expérimentation de la même ampleur. L'objectif du réseau de capteurs était de détecter et suivre les mouvements d'objets mobiles intrus. Le système devait être en mesure de classer les objets détectés dans le champ d'action du réseau. Trois différents groupes d'objectifs ont été classés en tenant compte des caractéristiques détectables telles que leur quantité de métal et de leur rapidité de mouvement : personne non armée, soldat et véhicule blindé. Les résultats de l'expérience montrent une précision largement acceptable dans la reconnaissance des objets.

- **Applications environnementales :**

Une application très représentative a été effectuée dans l'île Grand Duck (44.09N, 68.15W), à Maine. Un réseau de 32 nœuds a été déployé pour la surveillance de l'habitat d'espèces protégées [18]. Les unités déployées étaient des nœuds Mica et elles ont été utilisées pour étudier le comportement de l'océanité culblanc (*oceanodroma leucorhoa*), conformément aux changements climatiques. Les nœuds, dont certains ont été installés dans les nids des oiseaux, étaient capables de mesurer la température, la pression barométrique et d'humidité, et de transmettre les données dans un mode multi-saut jusqu'à un puits, puis vers une station de base accessible à partir d'Internet. Une application similaire peut être trouvée dans [19], concernant l'étude des oiseaux de mer dans une réserve nationale naturelle au Royaume-Uni.

De nombreuses applications de réseaux de capteurs se concentrent sur la mesure de phénomènes climatiques qui permettent d'étudier des changements dans l'environnement de certaines espèces animales ou végétales, afin de mieux comprendre leur comportement et, dans certains cas, supporter des études de réintroduction et de sauver des espèces qui sont en cours de disparition. Un exemple supplémentaire d'application est documenté dans [20], pour l'étude à long terme des espèces végétales en danger. D'autres applications environnementales sont destinées à la surveillance de certains phénomènes climatiques afin de détecter ou de prévoir certaines catastrophes naturelles telles que l'éruption des volcans (Harvard Sensor Networks Lab, 2004 - 2008), les inondations [21] et les incendies de forêt [22].

- **Application industrielles :**

Les technologies sans fil n'ont pas encore atteint leur apogée dans les industries, néanmoins nous commençons à voir aujourd'hui une augmentation du nombre de produits proposés pour ce milieu qui est WINA (Wireless Industrial Networking Alliance). Certains protocoles comme la norme 802.15.4 sont en cours d'évaluation afin de déterminer s'ils peuvent supporter certaines des contraintes typiques des applications industrielles, telles que la communication temps réel [23] et la robustesse aux erreurs de transmission [24]. Pour le moment, l'utilisation de technologies de réseaux de capteurs sans fil est encore, dans la plupart des cas, en stade expérimental.

- **Applications médicales :**

Le domaine médical constitue un intérêt de plus en plus grandissant pour les nouvelles technologies [4]. On utilise de plus en plus de matériels hautement technologiques en médecine. L'apport de ces techniques permet non seulement de garder le patient à son domicile mais aussi de lui éviter le traumatisme de l'hospitalisation. Il faut ajouter qu'à l'aide de capteurs, les comportements anormaux des personnes dépendantes tels que des chutes, des chocs ou des cris peuvent être détectés, ce qui facilitera les interventions immédiates. Dans le même sens, le projet STAR (Système TéléAssistance Réparti) de l'équipe LIMOS de Clermont-Ferrand en collaboration avec le service de cardiologie du CHU de la même ville propose une plateforme de télésurveillance novatrice permettant de suivre en continu et à distance les personnes ayant des troubles du rythme cardiaque [4].

- **La domotique :**

Nous imaginons très bien les maisons du futur où une véritable interaction avec des capteurs embarqués permettra de contrôler localement ou à distance des appareils domestiques [4]. Ces smart home, c'est à dire ces maisons intelligentes, vont faciliter les activités domestiques quotidiennes telles que l'automatisation de l'activation/l'extinction de la lumière qui existe déjà dans certains garages ou encore la mise en marche automatique de la télévision, la climatisation ou le chauffage lorsqu'il y a une présence dans le salon.

VIII. Types de réseaux de capteurs (« Mostly-on » et « Mostly-off »):

Le comportement global de la consommation dans les réseaux de capteurs sans fil est axé sur l'application. Par conséquent nous trouvons plusieurs types de réseaux en fonction du modèle de délivrance de données qu'impose l'application (continue, initié par la Station de Base ou Hybride). Ce modèle influe sur l'activité radio des nœuds, ce qui fait que plusieurs types de réseaux existent, en l'occurrence les réseaux « Mostly-on » et les réseaux « Mostly-off ». Les réseaux de capteurs « Mostly-off » est une catégorie de réseaux de capteurs, où les nœuds gardent leurs radios éteintes pendant de très longues périodes. Par la suite ces nœuds se réveillent pour envoyer leurs données à un collecteur. Le problème qui revient le plus souvent dans ce type de réseaux est le problème de synchronisation entre les nœuds dû à la dérive d'horloge. Par antonymie, nous qualifierons de « Mostly-on » les réseaux de nœuds dont les radios sont la plus part du temps allumées.

IX. Catégories de communication [25]

Le comportement des réseaux de capteurs est vraiment différent que celui des réseaux IP. Il n'y a pas généralement de communication capteur-à-capteur (pair-à-pair). Au lieu de cela, les capteurs envoient les mesures directement ou en mode multi-sauts à une ou plusieurs stations de base. Dans les réseaux de capteurs, les contraintes imposées aux protocoles de communication dépendent de la nature des capteurs ainsi que de l'application qui en est faite. Toutefois, la contrainte énergétique est considérée comme une contrainte plus forte, puisque l'on considère que les capteurs sont généralement déployés dans des zones d'intérêt hostiles et par suite le rechargement de leurs batteries est presque impossible. La manière d'acheminer les messages dans les réseaux de capteurs peut changer selon l'application qui en est faite. Ainsi, dans les scénarios impliquant la collecte de données périodiques, les capteurs transmettent régulièrement leurs mesures à la station de base. Ce processus peut être continu ou pourrait suivre une certaine distribution (géométrique, gaussienne, ...), déterministe ou probabiliste. La connaissance du processus d'envoi peut également influencer les périodes de sommeil des capteurs non impliqués dans l'envoi de données. Ce comportement est typique pour effectuer des mesures statistiques d'une certaine métrique, par exemple l'étude du climat. En outre, dans les scénarios orientés événement (event-driven), les capteurs doivent seulement transmettre une alerte quand un événement pertinent survient ou quand un changement brusque se produit. Dans ce type de scénarios, la réception de message doit être assurée et le délai de transmission doit être limité. Néanmoins, certains mécanismes d'alerte peuvent être désactivés à cause de la défaillance d'un lien radio. Par conséquent, il est recommandé d'envoyer l'alerte plusieurs fois.

X. Contraintes des RCSF [2]

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF.

X.1 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. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

X.2 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.

X.3 Bande passante limitée

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s.

Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

X.4 Facteur d'échelle

Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [5].

X.5 Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes :

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de bataille par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

X.6 Redondance de données

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.

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 et même dans le domaine sportif.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, la pile protocolaire des capteurs et leurs diverses applications. Dans un réseau de capteurs sans fils, de nombreuses contraintes existent. Par exemple, les capteurs doivent consommer le moins d'énergie et pourtant les communications entre chacun de noeuds en consomment énormément. Une solution possible est donc d'introduire l'agrégation de données qu'on va détailler dans le second chapitre.

CHAPITRE

Fusion et agrégation de données dans les RCSF

Introduction

Les réseaux des capteurs constituent un des domaines de recherche les plus actifs actuellement. Ils se révèlent utiles dans de nombreuses applications pour collecter et traiter des informations provenant de l'environnement grâce à des nœuds capteurs: mesure des températures, surveillance militaires, automatisation dans les bâtiments, sécurité, etc. Les capteurs utilisés dans ces réseaux ont des capacités limitées tant en mémoire qu'en termes de puissance de calcul. De plus, ils sont souvent déployés dans des environnements accidentés et, une fois déployés, y accéder physiquement est difficile, voire impossible. Remplacer la batterie du capteur est impossible, ce qui fait de cette dernière une ressource critique. Les capteurs collectent et transmettent des données d'une façon autonome à d'autres nœuds appelés puits. En raison de la taille de l'espace à surveiller ces transmissions se font souvent par plusieurs sauts en utilisant d'autres capteurs comme relais. La transmission d'une seule donnée peut ainsi impliquer plusieurs capteurs et une consommation d'énergie sur chacun d'eux. Des techniques permettant de réduire la quantité de données transférées tels que la fusion de données et l'agrégation de données et, qui permettent de réduire la charge de trafic acheminé dans le réseau. [26]

I. Fusion de données dans les RCSF

I.1 Définition de la fusion de données [27]

La fusion de données dans les réseaux de capteurs consiste essentiellement à confronter et intégrer des informations multiples provenant de plusieurs capteurs, pour former une seule information globale. Elle décrit les méthodes et les techniques numériques permettant de mélanger des informations provenant de sources différentes afin d'obtenir une décision ou une estimation.

I.2. Objectif de la fusion de données [27]

La fusion de données est apparue afin de gérer des quantités très importantes de données multi sources dans le domaine militaire et reste d'actualité dans ce domaine. Depuis quelques années des méthodes de fusion ont été adaptées et développées pour des applications en traitement du signal. Dans ce domaine la fusion de données doit tenir compte des spécificités des données à toutes les étapes du processus de fusion. Elle diffère des autres domaines, d'une part à cause de ces spécificités (données hétérogènes, quantité importante, données surtout issues de capteurs (donc principalement objectives), etc.), d'autre part des principales raisons de la fusion en traitement du signal et des images. En effet, il s'agit ici d'améliorer la connaissance du monde observé pour le décrire du mieux possible tel qu'il est. Nous ne cherchons donc pas ici à fusionner des informations pour que le monde devienne tel que nous le souhaitons, ou tel qu'il devrait être. Par exemple dans le cas d'élections il faut fusionner les votes pour que le monde devienne tel que la population le souhaite, il n'y a pas de vérité préexistante. Les données à fusionner peuvent être nombreuses et issues de sources hétérogènes (capteurs, bases de données, expertises). Les raisons de la fusion se justifient selon les applications, et elles sont nombreuses. La fusion s'applique en imagerie satellitaire et aérienne, imagerie médicale, sonar et radar, robotique, intelligence artificielle, imagerie pour des applications aérospatiales, etc. Nous pouvons distinguer trois buts dans ces domaines d'applications. Tout d'abord la fusion d'informations est employée de plus en plus pour des applications de reconnaissance (détection, identification). Les méthodes présentées permettent également l'estimation d'un paramètre obtenu par la combinaison de valeurs issues de différentes sources, mais dans ce cas d'autres

approches sont envisageables. Enfin pour l'association de données qui permet de trouver parmi différents signaux ceux qui sont émis par la même source, les approches employées sont soit déterministes soit probabilistes.

I.3 Etapes de la fusion de données

Un système de fusion est généralement composé de sources d'information, de moyens d'acquisition d'information, de moyens de communication et de capacités à traiter l'information. Il peut être par conséquent présenté sous une forme très complexe. Lors de l'étude ou de la présentation d'un système, on dispose des aspects topologiques et des aspects traitement d'informations. La topologie a une influence sur le choix de l'architecture du système de fusion, sur les choix d'outils, des méthodes de traitement et de communication. On peut trouver, dans la littérature, plusieurs manières de classer les différentes étapes et types de fusion. Cette différence provient principalement du niveau où l'opération, du type de sources et de l'application considérée. On peut par exemple reprendre la classification générale proposée par Dasarathy qui décompose la fusion en trois principaux niveaux à savoir, la fusion de mesures ou des pixels en traitement d'images, la fusion d'attributs en ce qui concerne la combinaison d'informations extraites après diverses phases de traitement et d'analyse des mesures et la fusion de décisions en ce qui concerne la combinaison des décisions obtenues à partir de chaque source. La décision finale est prise en fonctions des décisions de tous les capteurs. Dans tous les cas, l'opération de fusion s'effectue en plusieurs étapes telles que :

- L'alignement ou conditionnement ou encore harmonisation qui définit un espace commun dans lequel les informations sont projetées pour les rendre comparables. Les données sont donc ramenées dans un même référentiel.
- La corrélation pour déterminer des relations entre les différentes données.
- L'association pour unir des différentes représentations issues des informations multi-sources. Chaque mesure se trouve associée à l'entité correspondante.
- La combinaison des données obtenues après alignement et qui sont en accord avec l'étape d'association pour obtenir une meilleure représentation de l'estimation correspondant à l'attribut avec lequel l'étape d'alignement à été réalisée.
- La fusion statique quand le résultat de l'opération de fusion est obtenu indépendamment des états précédents. On exploite alors uniquement les données de l'instant courant.
- La fusion dynamique quand le résultat dépend des états antérieurs.

I.4. Architecture de la fusion de données [27]

En général, la fusion peut se décomposer en plusieurs étapes Figure Fig.II.1.1

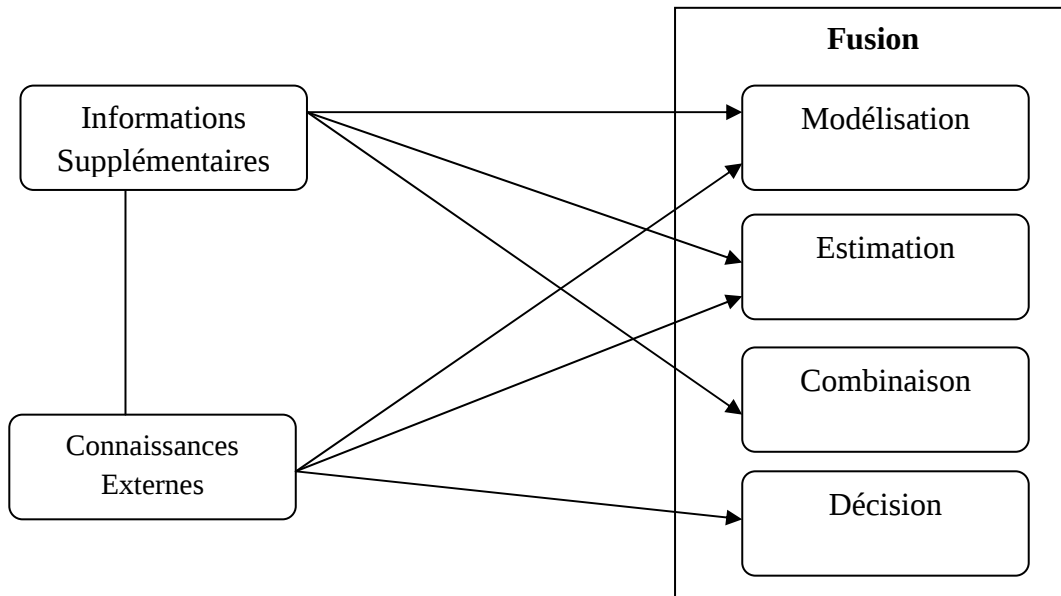


Fig. II.1 Représentation du nœud de fusion.

Les principes étapes de construction d'un processus de fusion sont les suivantes :

- Représentation homogène et recalage des informations pertinentes :
Les données à fusionner sont souvent hétérogènes. Il est impossible de les combiner sous leur forme initiale. On est alors amené à rechercher un espace de représentation commun dans lequel les différentes informations pertinentes disponibles renseignent sur une même entité. Un premier traitement consiste donc à transformer certaines de ces informations initiales en informations équivalentes dans un espace commun dans lequel s'effectuera la fusion.
- Modélisation des connaissances :
Les données propres à chaque source ne sont pas forcément exploitable en tant que tel, notamment si l'information fournie est très imparfaite et ne donne qu'un aspect de réalité. Cependant, même imparfaite, toute information peut apporter de la connaissance sur l'état du système. Donc, une étape essentielle du processus de fusion consiste à modéliser et à évaluer la connaissance apportée par chaque source. Elle est couplée au choix d'un cadre théorique adapté.
- Fusion
C'est à ce niveau du processus que l'opération de fusion est réalisée. Les informations modélisées sont combinées selon une règle de combinaison propre au cadre théorique choisi. La fusion d'informations contradictoires doit permettre de gérer les conflits potentiels entre les diverses sources.
- Décision par choix d'une stratégie :
La fusion permet de choisir l'information la plus vraisemblable, au sens d'un certain critère, parmi toutes les hypothèses possibles. En ce sens, la fusion de données aboutit

bien souvent à une affectation d'un ensemble de mesures aux hypothèses possibles. Le critère de décision dépend du cadre théorique dans lequel le processus de fusion a été développé et de l'objectif à atteindre. La principale difficulté de la fusion de données est de pouvoir modéliser et évaluer la connaissance apportée par chaque source afin de tirer le meilleur parti des informations disponibles. Cette opération consiste à exprimer l'imperfection de chaque information en fonction de la source dont elle est issue.

I.5 Applications de la fusion de données [27]

I.5.1 Domaines d'applications de la fusion de données

La fusion de données a d'abord visé à améliorer la qualité des réponses aux problèmes posés par les militaires. Actuellement, elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que la télédétection, la prévision météorologique, la biométrie multimodale, la reconnaissance des écrits et traitement de documents, les applications médicales, la robotique et véhicules intelligents. En télédétection, les données numériques d'un satellite sont transmises sous forme d'images acquises à travers différents canaux à différentes longueurs d'ondes. Ces canaux acquièrent des différentes bandes spectrales ou à différentes résolutions. La fusion est souvent employée pour combiner les données radar. La prévision météorologique est un autre exemple d'application de la fusion de données: l'air, les satellites, des avions et des ballons météorologiques fournissent des mesures sur l'état de l'atmosphère et sur les propriétés de surface du sol et de l'océan. Au sol, des dizaines de milliers de stations mesurent les paramètres météorologiques, comme la température, le vent, la pression, etc. et les radars suivent les orages et les cellules de pluie. En mer, des bateaux et des bouées automatiques mesurent également les paramètres météorologiques, ainsi que la houle. Toutes ces informations de mesures sont traitées avec des modèles numériques et de fusion pour faire des prévisions du temps qui sont diffusées par les media. La biométrie multimodale fait appel à la combinaison de plusieurs méthodes biométriques telles l'identification par les empreintes digitales, l'iris, etc. La reconnaissance des écrits et traitement de documents utilise plusieurs techniques de reconnaissance de formes. Les applications médicales font appels au traitement d'images et à divers capteurs.

I.5.2 Réseaux multi-capteurs

Pour pouvoir fonctionner correctement, tout processus doit tenir compte de tous les capteurs pour utiliser toute information issue de l'environnement extérieur. Ainsi, avoir une connaissance précise et complète sur ce milieu nécessite souvent le placement de plusieurs capteurs et il est nécessaire de combiner toutes les informations renvoyées pour optimiser l'action à exécuter. Ainsi, un réseau de capteurs est composé d'un grand nombre de nœuds communiquent entre eux. L'espace où agissent ces capteurs est appelé champ de captage. Les nœuds de capteurs sont généralement dispersés dans la zone à surveiller d'une manière arbitraire et ils ont la possibilité de collecter périodiquement les données sur le phénomène surveillé et envoient les rapports de captage à un nœud principal appelé puits. Notons qu'un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds puits. En plus de la collecte des rapports, le puits est responsable de la fusion de données requises et il peut communiquer avec l'utilisateur y compris par Internet ou par satellite dans certains cas. Par exemple, un nœud puits peut demander à tous les capteurs se trouvant dans la région nord du champ de captage d'envoyer un rapport de température toutes les minutes, pendant qu'un autre peut être intéressé seulement par des températures dépassant un certain seuil dans la région sud. Par conséquent, un capteur doit pouvoir stocker toutes les requêtes reçues, et les traiter séparément. Les réseaux de capteurs peuvent donc être composés de différents types suivant leur utilisation. On peut y trouver les capteurs sismiques, thermiques, visuels,

infrarouges, acoustiques et radar. Ils sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants tels que la température, l'humidité, le mouvement de véhicules, la pression, le taux de bruits, la présence ou absence de certains types d'objets, la vitesse, la direction et le volume d'un objet donné, etc. Les nœuds capteurs peuvent être utilisés aussi pour la surveillance continue d'un phénomène, la détection et l'identification d'un évènement ou la surveillance d'un terrain et le contrôle local d'objets déclencheurs d'évènements. Les domaines où les réseaux multi-capteurs peuvent être utilisés sont nombreux.

II. Agrégation de données dans les RCSF

II.1 Définition de l'agrégation de données [28]

L'agrégation de données dans les réseaux de capteurs consiste à remplacer les lectures individuelles de chaque capteur par une vue globale, collaborative sur une zone donnée (clustering).

On peut utiliser par exemple de simples fonctions d'agrégat telles que MIN, MAX ou MOYENNE, qui permettent à partir d'une série de n messages reçus par un « chef de zone » (capteur chef d'une zone) de ne renvoyer vers le puits qu'un seul message résumant l'information contenue dans ces n messages.

Ceci réduit le nombre de messages envoyés et donc économise l'énergie.

Exemple sans agrégation :

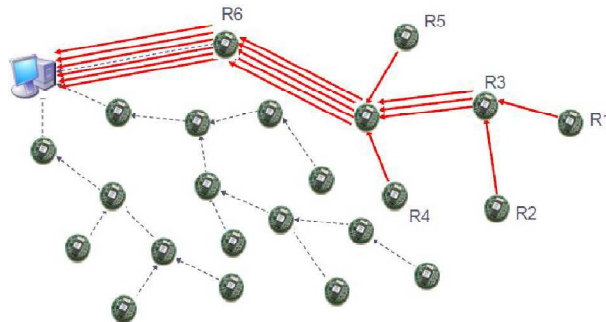


Fig. II.2 Messages envoyés sans agrégation de données.

Au total, 18 messages sont envoyés sur le réseau de capteurs.

En utilisant le mécanisme d'agrégation de données, on obtient un total de 7 messages envoyés sur le réseau :

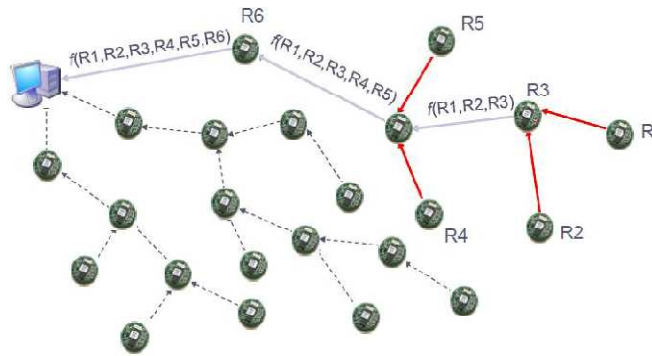


Fig. II.3 Messages envoyés avec agrégation de données.

II.2. Problématique de l'agrégation de données [28]

Dans un capteur, la problématique principale concerne la consommation d'énergie : en effet, ces derniers doivent restés opérationnels le plus longtemps possibles, dans des conditions parfois difficiles (ex : lâchés par avion sur les parois d'un volcan). Comme il n'est pas possible de recharger leur énergie ni changer les piles par exemple (on ne sait pas toujours où se trouvent les capteurs), il est nécessaire d'économiser au maximum l'énergie consommée par ces derniers. On estime que la transmission des données d'un capteur représente environ 70% de sa consommation d'énergie. De plus, les réseaux de capteurs étant assez denses en général, cela signifie que des nœuds assez proches en terme de distance (voisins) peuvent capter les mêmes données (température, pression, humidité équivalentes par exemple) et donc il apparaît nécessaire d'introduire le mécanisme d'agrégation de données afin d'éviter la duplication d'information au sein du réseau de capteurs et donc de préserver leur énergie et donc d'augmenter la durée de vie du réseau.

II.3. Types d'agrégation de données [28]

Les techniques d'agrégation de données peuvent être découpées en deux :

- **Agrégation centralisée**

Agrégation dans des clusters, formés via un protocole de clustering (classification). On définit d'abord des zones (clusters) via ce protocole puis ensuite on agrège les données dans ces zones grâce à un chef de zone. Ce chef peut éventuellement changer au cours du temps afin de répartir au mieux la consommation d'énergie entre tous les nœuds du réseau.

- **Agrégation distribuée**

Agrégation dans un arbre c'est-à-dire que le réseau est vu de façon globale.

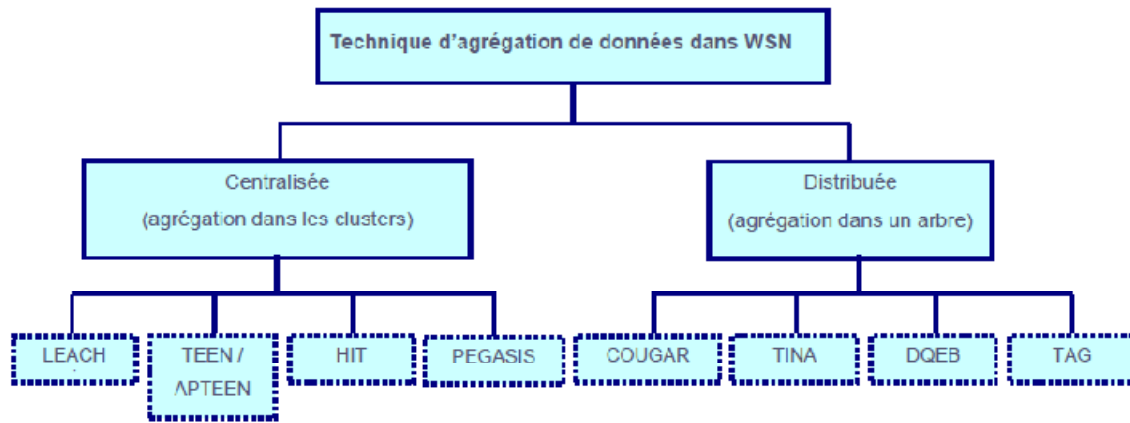


Fig. II.4 agrégation distribuée.

II.4. Etat de l'art sur l'agrégation de données

II.4.1 Le modèle ARMA [26]

La collecte des données est un des enjeux majeurs dans les réseaux de capteurs. En effet, les communications induites par la transmission de données réduisent considérablement la durée de vie du réseau. Une des techniques utilisées pour réduire la quantité de données transférées est l'agrégation et selon le type des données étudiées, une des possibilités est l'utilisation de série temporelle ARMA. Les modèles ARMA sont les principaux modèles de séries temporelles. Etant donnée une série temporelle X_t , ils sont utilisés pour comprendre et prédire, éventuellement, les valeurs futures de cette série. Un modèle ARMA(k,q) est composé de deux parties : une partie autorégressive (AR) d'ordre k qui analyse l'autocorrélation dans la série temporelle et joue un rôle important dans les applications car elle peut être extrapolée linéairement à tout instant n , à partir des k valeurs précédentes. L'autre partie de la série est la moyenne-mobile (MA) d'ordre q . La série (AR) se présente sous la forme : $X_{i+k} = a_0 + a_1 X_{i+k-1} + \dots + a_k X_i$ (1) où $a_0, \dots, a_k$ sont les paramètres du modèle, X_t est une série temporelle. Différentes approches d'agrégation temporelle des données basées sur la prédiction des mesures ont produit un effet important sur la réduction du coût de communication. Le puits exploite un modèle de série temporelle pour prédire localement des données au lieu d'une communication directe avec le capteur. Certaines approches, utilisent des modèles AR/ARMA (autoRegression/AutoRegressionMoving Average).

Chaque nœud, en plus de son activité de surveillance de l'environnement, calcule un modèle ARMA basé sur la série de W échantillons consécutifs afin d'exploiter la corrélation temporelle des données. Les étapes d'estimation des paramètres du modèle sont comme suit : dès qu'un nœud a collecté W échantillons, il calcule localement le modèle ARMA (k,q) : $k+1$ paramètres sont calculés pour la partie AR et sont transmis ainsi que les k premiers échantillons. Régulièrement, dès qu'un capteur collecte S nouveaux échantillons, il mesure l'erreur e entre ces nouveaux échantillons et les S valeurs prédites à partir du modèle précédent. Si l'erreur est inférieure à un seuil, le modèle précédent est conservé et aucune transmission d'information n'est réalisée. Sinon, le nœud recalcule les coefficients ARMA à partir des W échantillons les plus récents et les transmet au puits. Ainsi le modèle ARMA joue un rôle important dans la consommation d'énergie, par exemple si un nœud transmet 40 coefficients ARMA complexes et

39 échantillons au lieu de 5000 données brutes, ça permet de réduire plus de 90% ($79/5000=0.015$) la consommation d'énergie. Cependant, il a été démontré que la transmission d'un bit est équivalente, en termes d'énergie à l'exécution d'environ 1000 instructions. Dans cet article, nous essayons de réduire la consommation d'énergie par la modélisation de séries temporelles linéaires en utilisant le processus AR du modèle ARMA, dans le but de chercher une corrélation des données qui permet de réduire la communication tout en préservant la précision des données estimées. L'utilisation de la série AR et non la série ARMA complète permet aussi de réduire la complexité de calcul sur chaque capteur.

II.4.2 Les modèles ARCH

Les modèles ARCH (autorégressifs conditionnellement hétéroscédastiques) ont été introduits par Engle en 1982 et leur extension GARCH (ARCH généralisés) est due à Bollerslev en 1986. Notamment, la définition des GARCH forts a été aussi introduite par Engle et Bollerslev en 1982, celle des GARCH semi-forts par Weiss (1986), celle des GARCH faibles par Drost et Nijman (1993) et celle des GARCH super faibles par Francq et Zakoïan (2000). Leur caractérisation repose essentiellement sur le concept de variance conditionnelle. Dans ces modèles, celle-ci s'écrit comme une fonction affine des valeurs passées du carré de la série. Cette spécification particulière se révèle très riche car elle permet une étude complète des propriétés des solutions tout en étant assez générale. La plupart des séries économiques, et plus particulièrement les séries financières, sont analysées à différentes fréquences (jour, semaine, mois...). Le choix de la fréquence d'observation a souvent une importance cruciale quant aux propriétés de la série étudiée et, par suite au type de modèle adapté. Dans le cas des modèles GARCH, les travaux empiriques font généralement apparaître une persistance plus forte lorsque la fréquence augmente.

Du point de vue théorique, le problème de l'agrégation temporelle peut être posé de la manière suivante : étant donné un processus (X_t) et un entier m , quelles sont les propriétés du processus échantillonné (X_{mt}) (i.e. construit à partir de (X_t) en ne retenant que les dates multiples de m) ? Lorsque, pour tout entier m et pour tout modèle d'une classe donnée, admettant (X_t) comme solution, il existe un modèle de la même classe dont (X_{mt}) soit solution, cette classe est dite stable par agrégation temporelle.

Un exemple très simple de modèle stable par agrégation temporelle est évidemment le bruit blanc (fort ou faible) : la propriété d'indépendance (ou de non corrélation) subsiste lorsque l'on passe d'une fréquence donnée à une fréquence plus faible. Par contre, les modèles ARMA au sens fort ne sont généralement pas stables par agrégation temporelle. Ce n'est qu'en relâchant l'hypothèse d'indépendance du bruit (ARMA faibles) qu'on obtient l'agrégation temporelle.

II.4.3 Agrégation MAC [29]

Peu de travaux se sont intéressés aux schémas d'agrégation des MAC (AMAC). On peut cependant citer [BHL06, KL08] dans lesquels les auteurs, après avoir donné une définition formelle des primitives employées, proposent le schéma d'agrégation de MAC suivant : chaque nœud i envoie un message mi ainsi qu'un tag $tag_i = MACK(mi)$ au nœud agrégateur qui lui-même concatène les messages et calcule le X-OR des tags reçus en plus du sien. Les auteurs montrent également la sécurité de leur schéma et mesurent l'impact de la longueur du tag sur le temps de vérification d'un simple message. Dans [CC08], les auteurs étudient la possibilité de construire des AMAC. Ils présentent deux modèles formels de sécurité, l'un concernant les chiffrements agrégés appelé CDA (Concealed Data Aggregation) et un concernant la sécurité du schéma défini en introduction appelé AMAC. Ils montrent ensuite les problèmes de sécurité induits directement par les définitions données. A notre connaissance, il s'agit des deux seuls

travaux établissant un lien formel entre agrégation de MAC et réseau de capteurs. Notons également qu'habituellement quand on parle de MAC, il s'agit d'utiliser essentiellement soit HMAC [Pub02] soit CBC-MAC [Pub85] ou CMAC1. Il existe dans la littérature beaucoup d'autres constructions notamment celles qui nous intéressent ici à savoir les MAC construits sur les fonctions de hachage universelles. Ces dernières ont été introduites par Carter et Wegman dans [CW79] et étudiées par la suite dans [Kra94, Sho96, Sar08].

II.5. Protocoles d'agrégation de données. [28]

II.5.1 Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [28]

LEACH est un protocole de routage hiérarchique qui utilise la classification (clustering) afin de diviser le réseau en deux parties : les cluster-Head (chefs de zone) et les nœuds membres. Ce protocole se décompose en deux phases qui se succèdent plusieurs fois : la construction et la communication.

- **Phase de construction :**

Dans cette phase, on construit les différents clusters (zones) et on choisit leur chef. Chaque nœud du réseau choisit aléatoirement un nombre et si ce nombre est inférieur à une valeur, le nœud devient chef de zone (cluster-Head). Ces chefs de zone sont élus en fonction de la force du signal reçu (proximité).

- **Phase de communication :**

Les communications à l'intérieur d'une zone (cluster) sont effectuées avec la méthode TDMA (mode permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal) : chaque chef établit un *Schedule TDMA* pour les membres de sa zone en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Les membres émettent donc les données captées pendant ce slot d'émission. Ce mécanisme permet aux différents capteurs d'éteindre leur interface de communication en dehors de leur slot d'émission, ce qui a pour effet d'économiser leur énergie.

Ensuite les données agrégées (dans les chefs de zone) sont envoyées directement au puits.

II.5.2 Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN) [28]

Le protocole TEEN a été développé à partir de LEACH mais au contraire de LEACH qui est orienté temps, TEEN est quant à lui orienté événement.

La différence majeure entre ces deux protocoles résulte dans le fait que TEEN n'utilise pas TDMA qui est inadapté pour les applications orientées événements. Les chefs de zones élus dans TEEN ne transmettent donc pas de *Schedule TDMA* à leurs membres, mais un message qui contient la tâche demandée au capteur, la valeur critique après laquelle les membres doivent envoyer leurs rapports de données (Hard Threshold) et le changement minimal obligeant le nœud à envoyer un nouveau rapport (Soft Threshold).

Donc lorsqu'un nœud détecte que sa valeur captée a dépassé le HT, il doit émettre un rapport au chef de zone, mais uniquement si sa valeur a changé suffisamment (par rapport au ST). Le comportement est ainsi réactif (orienté événement) mais il limite également la consommation d'énergie.

II.5.3 COUGAR [28]

Le protocole COUGAR est un exemple d'agrégation de données distribuée. Les données produites par le réseau sont modélisées comme une table relationnelle, le réseau étant vu comme une grande base de données distribuée. Les attributs de cette table sont soit des informations sur

le capteur soit des données produites par ce capteur car COUGAR fournit une agrégation partielle au niveau des nœuds.

En effet, chaque nœud contient une liste d'attente de tous les nœuds fils qui doivent lui envoyer des données. Le nœud n'émet le paquet agrégé que lorsque tous les fils de sa file d'attente lui ont envoyé des données (+ timer au cas où un de ses fils deviendrait inaccessible).

Ce protocole nécessite donc une grande synchronisation afin de traiter les données dans le réseau (il faut attendre toutes les données avant d'effectuer le calcul de l'agrégation).

Conclusion

La fusion de données et l'agrégation de données sont employées aussi bien dans la vie quotidienne que dans les technologies les plus récentes. Il existe plusieurs topologies et niveaux dont le choix dépend de la nature des sources et de l'information. De nombreux travaux sur la fusion de données et l'agrégation de données dans les applications réelles montrent qu'elles améliorent nettement les performances du système par rapport à chacune des sources prises isolément. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Nous proposons dans le prochain chapitre une simple méthode d'agrégation de données qui est une agrégation de données à la volé dans un wsn.

CHAPITRE

Implémentation du circuit d'agrégation de données

Introduction

La collecte des données est un des enjeux majeurs dans les réseaux de capteurs. En effet, les communications induites par la transmission de données réduisent considérablement la durée de vie du réseau. Une des techniques utilisées pour réduire la quantité de données transférées est l'agrégation et selon le type des données étudiées. Dans ce chapitre nous proposons une technique simple d'agrégation de données qui aboutit à une limitation de temps de transfert de données des différents senseurs du réseau de capteurs sans fil. IL constituera une solution d'énergie efficace pour la collecte de données et un gain en bande passante. Cette solution sera implémentée dans une architecture embarquée de type FPGA pour les réseaux de capteurs sans fil.

I. Problématique et solution proposée

Un capteur sans fil est généralement doté d'une CPU avec une puissance de calcul limitée, alimenté par une pile à durée de vie dépendante de l'utilisation du capteur. Le module radio est le module qui consomme le plus d'énergie. Vient ensuite le processeur et enfin le capteur CAN (voir figure.III.1). La bande passante limitée engendre des phénomènes de congestion et d'erreurs de transmission qui entraînent une surconsommation d'énergie.

Pour améliorer la performance d'un capteur sans fil, il est évident qu'il faut réduire l'utilisation du module radio et de la CPU. La sur-utilisation du module radio est due à la redondance des données captées mais aussi à l'envoi séparé de ces données. Chaque fois qu'une donnée est envoyée, un surcoût est engendré par les couches d'encapsulation (ajout des bits supplémentaires des différentes couches nécessaires à la transmission).

La majorité des applications n'ont besoin de connaître que les changements des grandeurs physiques auxquelles elles s'intéressent. Il n'est pas nécessaire de transmettre ces grandeurs si elles ne changent pas de valeur durant une période donnée. Par ailleurs dans des situations qui ne sont pas critiques, il n'est pas indispensable de transmettre immédiatement une grandeur captée. Il est possible de garder dans un buffer un ensemble de valeurs et de les envoyer à la fois dans un même paquet, ce qui réduit le surcoût engendré par les encapsulations.

Notre solution repose sur l'élimination des données redondantes et le groupement de valeurs affinées en vue de leur transmission dans un minimum de paquets assurant ainsi un gain en énergie et en bande passante. L'implémentation matérielle de la solution permet de soulager la CPU qui réservera toute sa puissance pour d'autres traitements.

Soit un buffer de taille N au niveau d'un nœud. N_t représente les données redondantes à l'instant t . Le taux d'occupation du buffer de ce nœud est de $(N-N_t)/N$ (avec élimination de la redondance à la volée) et donc le taux d'occupation de la bande passante par ce nœud est de $(N-N_t)/N$. Le gain d'énergie obtenu au niveau de ce nœud est de N_t/N .

Si on considère un réseau de capteurs sans fil à K nœuds, le gain total en bande passante

est de : $\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^K \frac{N - N_t^i}{N}$, avec t étant les différentes tranches de temps de captage, i est le

numéro du nœud. Le gain en énergie du réseau de capteur sans fil à K nœud est de

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^K \frac{N_t^i}{N}$$

La figure Fig.III.1 donne la position du circuit dans le module Capteur. L'algorithme du circuit est donné dans la section suivante.

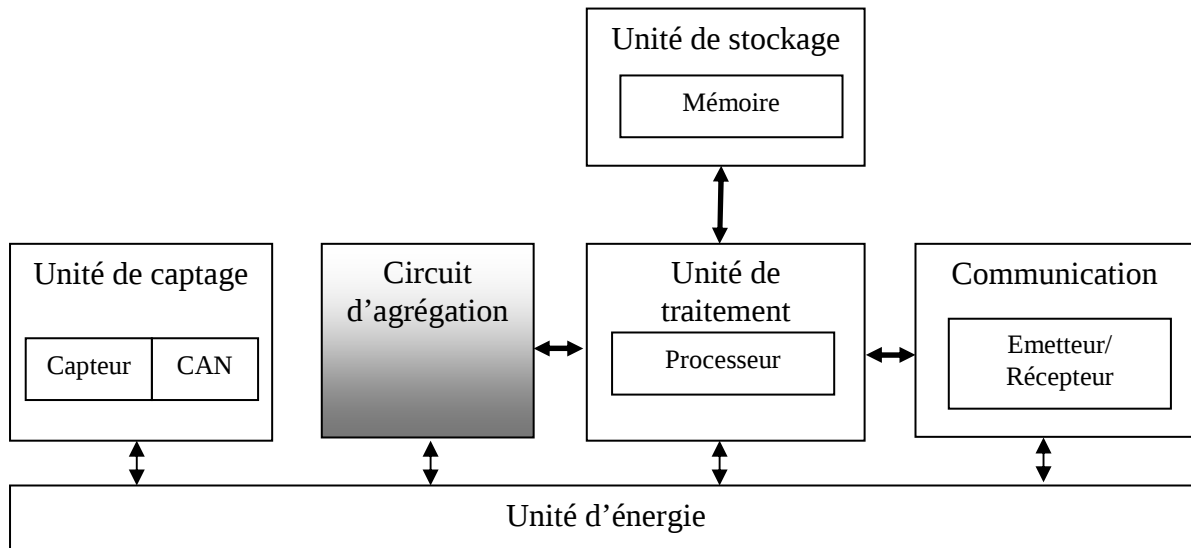


Fig.III. 1 Position du circuit d'agrégation dans un capteur sans fil

II. Algorithme d'agrégation de données à la volée dans un WSN

Cet algorithme consiste à présenter les différentes étapes de l'agrégation de données. Il est constitué de 3 processus qui sont : le processus d'agrégation, le processus de remplissage et le processus de vidage.

- **Le processus d'agrégation**

On utilise soit le processus de remplissage ou le processus du vidage et cela on adaptant la méthode du Flip/Flop.

Le principe de ce processus est le remplissage du tampon tant qu'il n'est pas plein et tant que l'ordre de transmission n'est pas arrivé et cela pour la sauvegarde des informations (événements) sinon on bascule au prochain tampon et on vide le tampon précédent (processus de vidage)

- **Le processus de remplissage**

Lorsqu'un capteur capte un événement on le compare par rapport à l'élément précédent enregistré dans le tampon et s'ils sont différents on va mettre l'événement capté dans le tampon et on incrémente le pointeur du tampon.

- **Processus du vidage**

Dès que le tampon est rempli on lance en parallèle le processus d'agrégation et on le vide.

Algorithme

Processus agrégation

Phase initialisation ($j := 0$, $L := 0$ et pointeurs de Tampons au début);

Début processus

Tant qu'il ya des événements à capter

Faire

 Tant que le Tampon n° j n'est pas plein et ordre de transmission n'est pas arrivé

 Faire

 Processus de remplissage (enregistrement des événements) du Tampon n° j

$L := L + 1$

 Fin Faire

 /* basculer sur Tampon $j+1$ (modulo 2)*/

 Processus de vidage du Tampon n° j

$j \leftarrow j + 1$ (modulo 2)

Fin Faire

Fin processus

Processus de remplissage

Début processus

 Capter événement (octet)

 Si événement capté n'est pas le même que le précédent enregistré dans le Tampon n° j

 alors

 Mettre événement capté dans le Tampon n° j

 Incrémenter le pointeur du Tampon n° j

 Fin si

Fin processus

Processus de vidage

Début processus

 Vider le tampon n° j

 /* durée de vidage = $L \times$ durée de transfert d'un octet*/

 /*lancer en parallèle processus agrégation*/

$j \leftarrow j + 1$ (modulo 2)

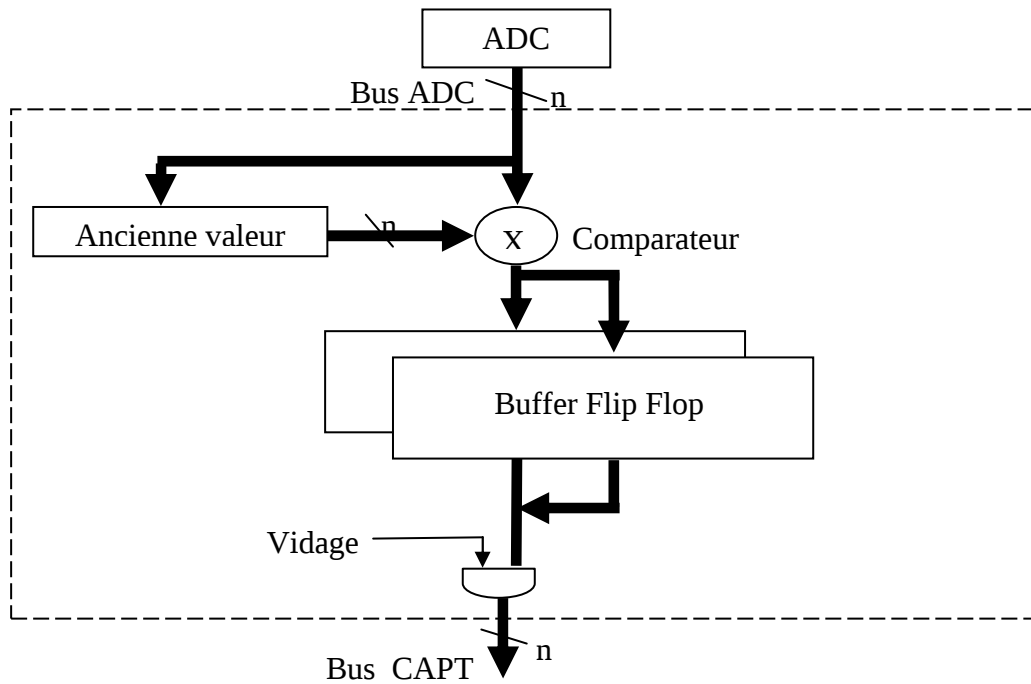
$L := 1$;

Fin processus

III. Description du circuit d'agrégation

Le circuit synoptique présenté dans la Figure III.2 est composé d'un contrôleur et de deux tampons fonctionnant en mode en Flip Flop. Les données de captage arrivent via le bus ADC. La donnée est synchronisée par le module de captage sur le front montant du signal ECH. En sortie, le circuit vide le contenu agrégé se trouvant dans l'un des tampons sur le

bus CAPT dès la réception d'un signal de transfert sur la ligne TR ou quand un des deux tampons est plein.



Sortie du circuit d'agrégation

Fig. III.2 schéma synoptique du circuit d'agrégation de données

IV. Description des modules du circuit d'agrégation de données.

IV.1 Schéma de bloc du circuit d'agrégation de données.

Après avoir décrit le schéma synoptique de notre solution on commencera la réalisation de notre circuit en présentant ces différents blocs.

On commencera par donner le schéma des blocs du circuit qui sont les deux buffers et l'organe de contrôle. La figure Fig.III.6 illustre ce schéma.

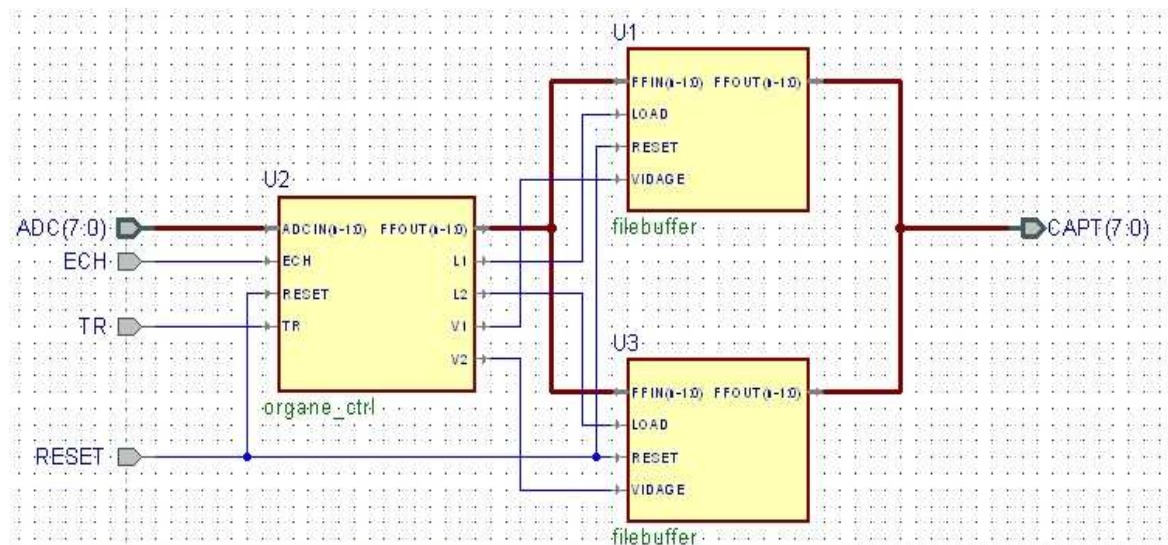


Fig.III.3 Schéma de bloc du circuit

IV.2. Les deux tampons en mode flip flop

Les deux tampons sont organisés de façon à ce qu'on puisse y lire et écrire en parallèle. Pendant que l'un des tampons vide son contenu (lecture FIFO des éléments qui se trouvent dans ce dernier), le deuxième tampon enregistre les données issues du convertisseur. Cette organisation nous permet de ne pas perdre d'éventuelles données pendant le transfert sur le réseau.

Le schéma de bloc des tampons est indiqué dans la figure Fig.III.4

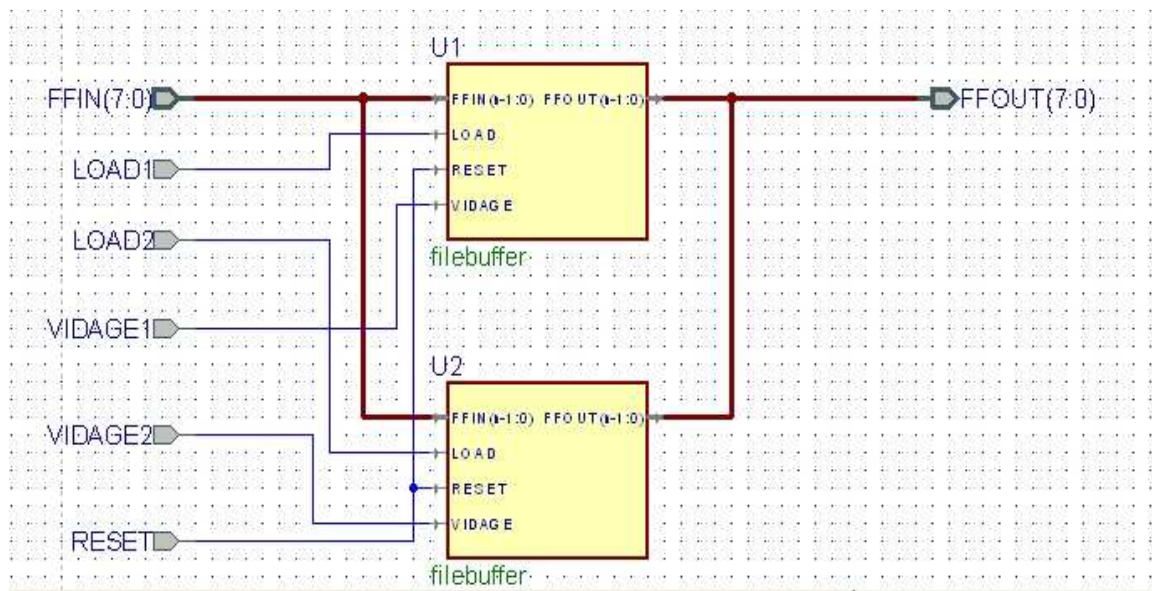


Fig.III.4 Schéma de bloc de deux tampons en mode flip flop

IV.3 L'organe de contrôle

L'organe de contrôle est responsable de la génération des signaux de commandes pour la lecture, l'enregistrement, l'agrégation et le vidage des tampons. Il reçoit en entrée la donnée captée sur le bus ADC synchronisée par le signal ECH. Il reçoit également une commande de transfert du réseau via le signal TR. En sortie, il fournit au tampon en cours de réception la donnée à enregistrer via le bus FFOUT synchronisée par le signal L1 ou L2 en fonction du tampon actuel en mode de remplissage. Cette donnée n'est fournie que si elle est différente de l'ancienne valeur captée précédemment et enregistrée dans un registre interne de l'organe de contrôle. Il fournit également un signal de commande de vidage du tampon sur la ligne V1 ou V2 quand ce dernier est plein ou quand un signal de transfert arrive de l'unité de traitement.

Le schéma de bloc de l'organe de contrôle est indiqué dans la figure Fig.III.5

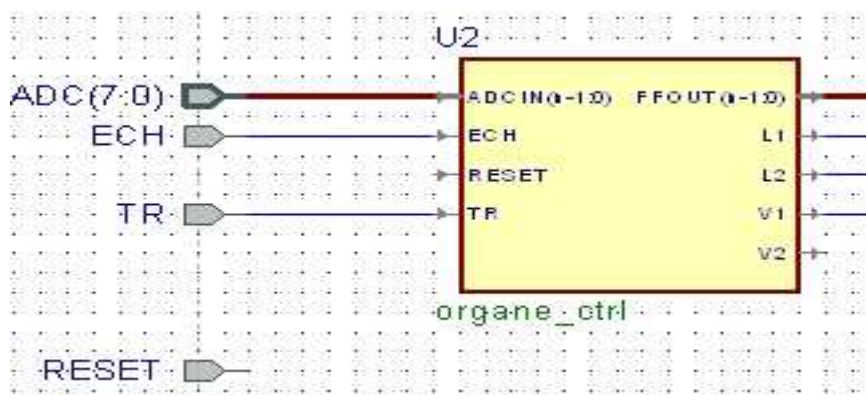


Fig.III.5 schéma de bloc de l'organe de contrôle

V. Outils de Simulation VHDL

V.1. Langage VHDL [30]

VHDL (VHSIC Hardware Description Language) est un langage de programmation conçu et optimisé pour la description du comportement des circuits numériques. Ce langage est devenu rapidement l'outil le plus populaire de description des circuits numériques complexes, de leur simulation et de leur synthèse. Les circuits numériques décrits en VHDL peuvent être simulés facilement, et synthétisés dans des technologies multiples (ASIC, FPGA, ...etc.). Ces mêmes descriptions peuvent être archivées et réutilisées dans plusieurs projets.

VHDL a été initié au début des années 80 par le département de la défense des états unis (DoD) dans le cadre du programme de recherche sur les circuits à très haute vitesse d'intégration VHSIC (Very High-speed Integrated Circuit). Durant ce programme, les chercheurs ont été confrontés au problème de description des circuits à grande échelle, et à la gestion de projets très complexes impliquant plusieurs équipes d'ingénieurs. Pour cela le DoD a fait appel à trois compagnies : IBM, Texas Instruments et Intermetrics pour la mise au point d'une nouvelle méthode de conception de circuits basée sur un langage de description matériel, et le VHDL fut créé. La première version du langage (VHDL version 7.2) fut publiée en 1985. En 1987, le langage VHDL a été proposé comme

standard IEEE après enrichissement et modification du langage de base. Le langage résultant, identifié sous la norme IEEE 1076-1987 est la base des outils VHDL actuels. Une version mise à jour, IEEE 1076-1993 à été publiée en 1994. Cette version est supportée par la plupart des outils VHDL vendus actuellement.

La forte popularité de VHDL est due aux multiples fonctionnalités qu'il offre et à son intervention dans les diverses phases de la conception. Parmi les fonctionnalités offertes, nous citons :

- **La modélisation et la simulation**

Le VHDL permet de décrire, à plusieurs niveaux d'abstraction et à un grand niveau de détail, le comportement de composants électroniques allant des portes logiques aux microprocesseurs et les circuits spécifiques. Ce comportement touche plusieurs aspects électriques des circuits tels que: les temps de remonté et de chute des signaux, Les délais de traversée des portes logiques qui peuvent être décrits précisément. VHDL offre un ensemble riche de contrôles et de types de données pour permettre une conception structurée. Il fournit aussi des mécanismes permettant de décrire des événements concurrents. Cela est très important car le fonctionnement du matériel est fondamentalement concurrent.. Le VHDL permet la simulation des composants décrits grâce à un ensemble d'instructions dédiées spécialement à la simulation.

- **La synthèse**

Même si la vocation initiale de VHDL était la description et la simulation, ce langage est devenu un outil de synthèse de matériels. Plusieurs constructeurs fournissent des bibliothèques décrivant leurs composants de base (portes logiques, unités fonctionnelles, ...etc.) et de nombreux outils de synthèse permettent de transformer une description VHDL en un ensemble de ces composant de base avec les interconnexions nécessaires. Dans ce domaine, la puissance de description du langage constitue un inconvénient car il est possible de décrire un matériel non synthétisable. Pour cela, la plupart des outils de synthèse VHDL restreignent les constructions synthétisables à un sous ensemble du langage VHDL. Ce sous ensemble est généralement différent d'un outil à un autre. Ce qui affecte quelque peu le caractère de la portabilité de VHDL. Toutefois, des efforts de standardisation de ce sous ensemble sont en cours.

- **Le test**

L'une des propriétés les plus importantes (et sous utilisées) de VHDL est sa capacité à tester les performances des circuits décrits. Une description particulière dite entité de test "Test benche" permet de fournir au circuit testé des stimulus en entrée et d'examiner les sorties de ce dernier, et les comparer aux résultats attendus. Les entités de test doivent être une partie intégrante d'un projet VHDL et doivent être créées en parallèle à toute autre description du circuit.

- **La probabilité**

Le VHDL est maintenant adopté par la communauté des concepteurs de circuits comme un langage standard de description de circuits. L'utilisation de VHDL garantie la

portabilité de la description sur la plupart des outils CAO et facilité la communication entre les concepteurs.

- **La documentation**

Le caractère structuré des descriptions VHDL, associé à sa gestion des configurations le place comme un excellent outil de documentation de circuits grands et complexes. Cette caractéristique à incité le DoD à exiger de ces sous-traitants d'utiliser le VHDL comme format standard pour communiquer les performances et les exigences de leurs matériel.

- **La preuve formelle :**

Le langage permet de prouver formellement que 2 descriptions sont parfaitement identiques au niveau de leur fonctionnalité.

La démarche de conception des circuits numériques complexes est conforme à l'organigramme ci-dessous

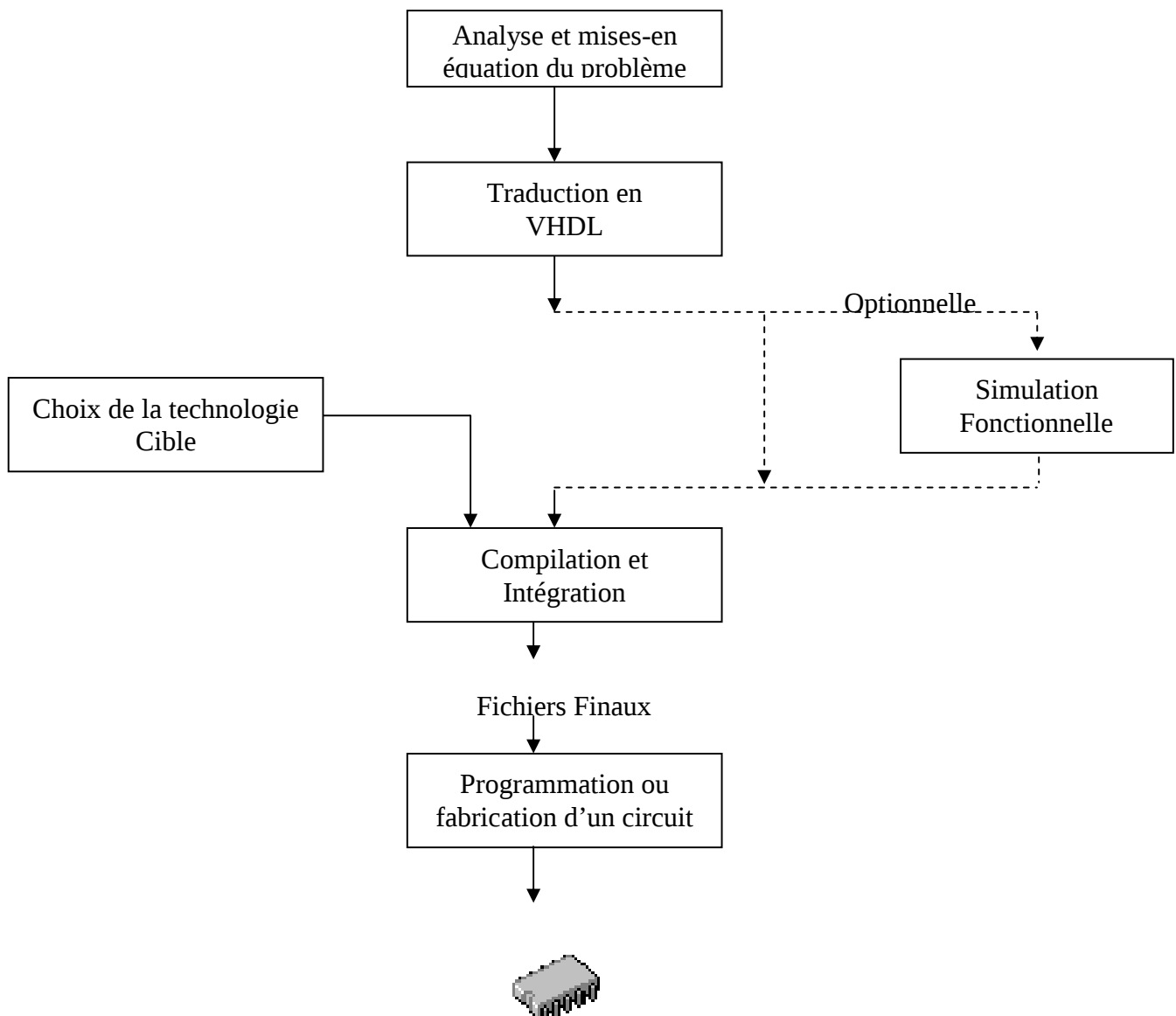


Fig.III.6 Organigramme de conception de circuit numérique en VHDL

V.2. Le logiciel Active-HDL

Active-HDL est un environnement intégré destiné au développement de projets en utilisant les langages de description matériels. Cet outil repose sur les langages VHDL, VERILOG et EDIF. Cet outil intègre plusieurs outils de compilation, de débogage, de simulation ainsi que des outils graphiques et textuels de visualisation des résultats de simulation. La figure Fig.III.7 illustre les composants de cet outil.

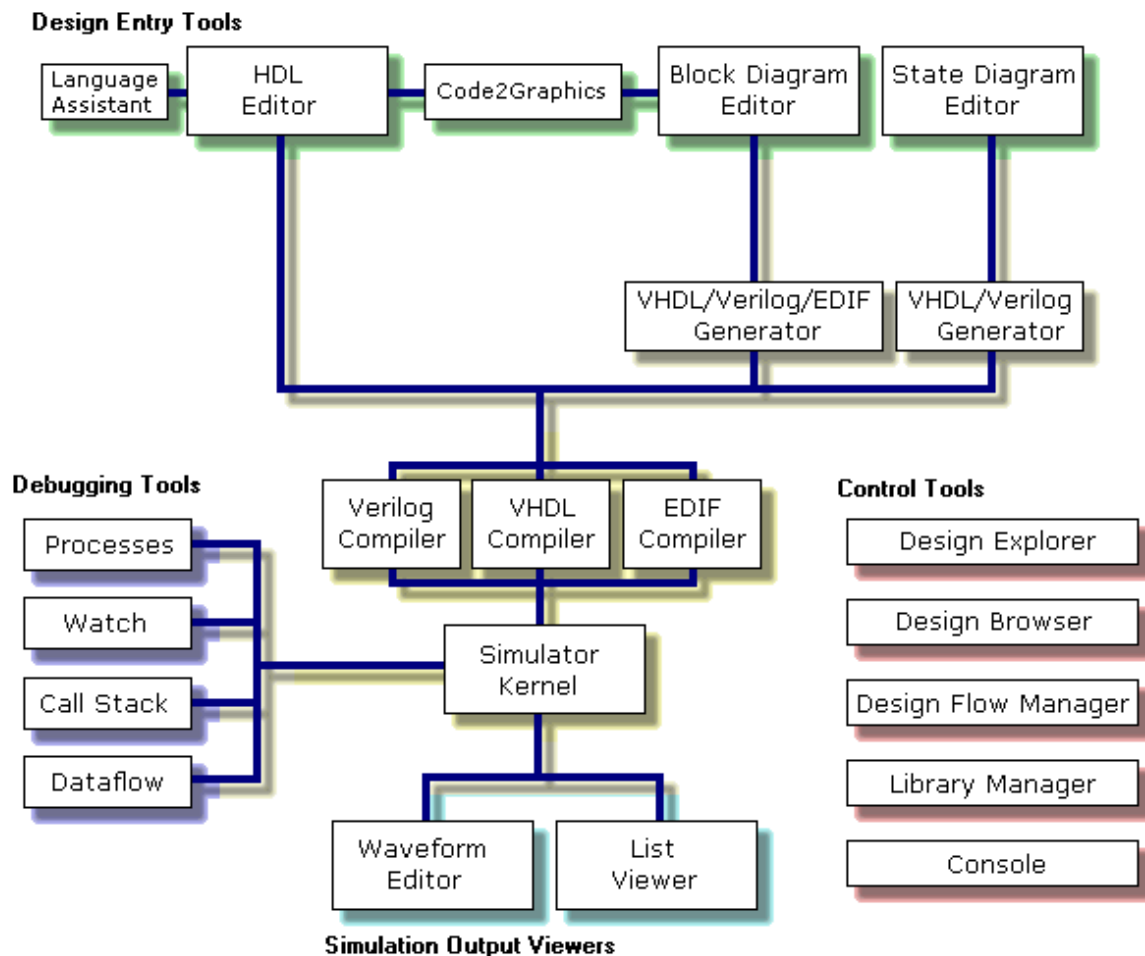
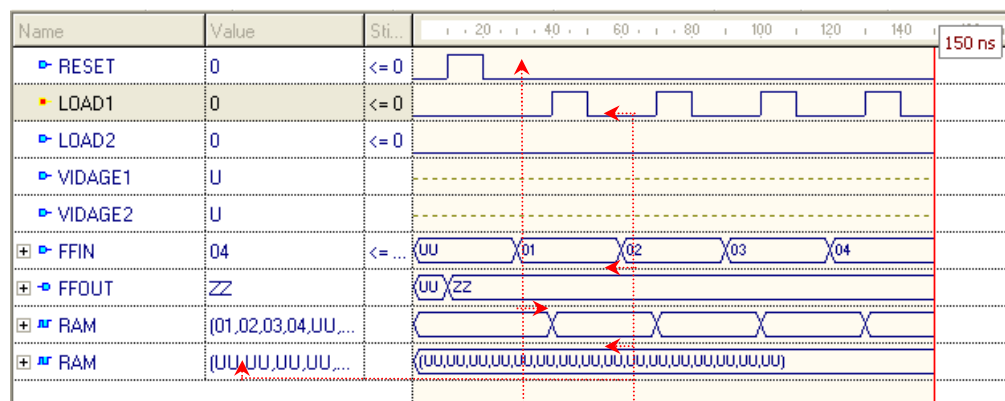


Fig.III.7 Les différents composants de Active-HDL

VI. La simulation VHDL

VI.1 La simulation de la phase de remplissage

La simulation VHDL de la phase de remplissage est donnée dans la figure Fig. III.8. Après l'activation du signal RESET, les bus des deux tampons se mettent en haute impédance pour éviter les conflits de bus. Les deux tampons sont ensuite initialisés. Toutes les valeurs captées sont enregistrées dans l'un des deux tampons en fonction du signal LOAD activé (Buffer 1 si LOAD1 est activé). L'enregistrement s'effectue en lisant le contenu du bus FFIN synchronisé sur le front montant du signal LOAD et en l'enregistrant dans le tampon en cours de réception.



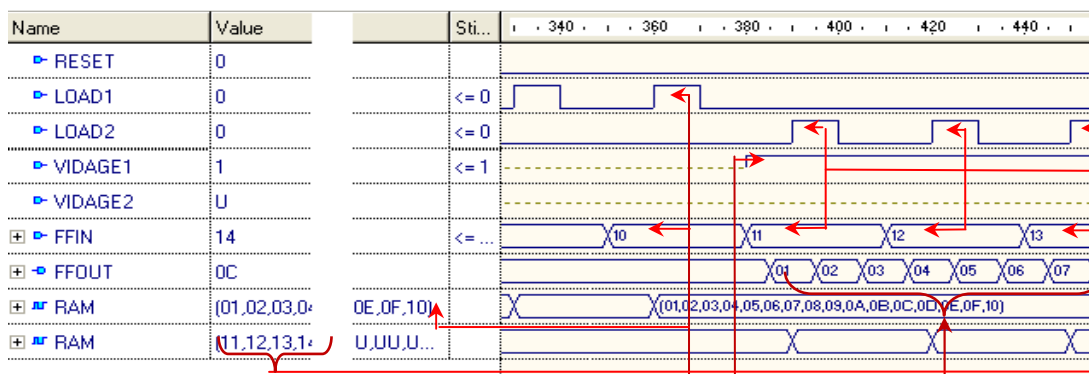
Après un RESET, le bus de sortie est en haute impédance

A chaque front montant sur la ligne LOAD 1, le contenu du bus FFIN est enregistré dans la RAM du premier buffer

Fig.III.8 Simulation VHDL des enregistrements dans le tampon

VI.2 La simulation de la phase de vidage.

La simulation de la phase de vidage est donnée par la figure Fig.III.9. Quand le premier tampon est plein, un signal de vidage (VIDAGE1) est activé par le contrôleur pour le vider sur le bus FFOUT. Les nouvelles valeurs issues du capteur continuent à être enregistrées sur le deuxième tampon pendant que le premier se vide.



Dernière valeur avant que le premier buffer ne soit rempli

Vidage du premier Buffer

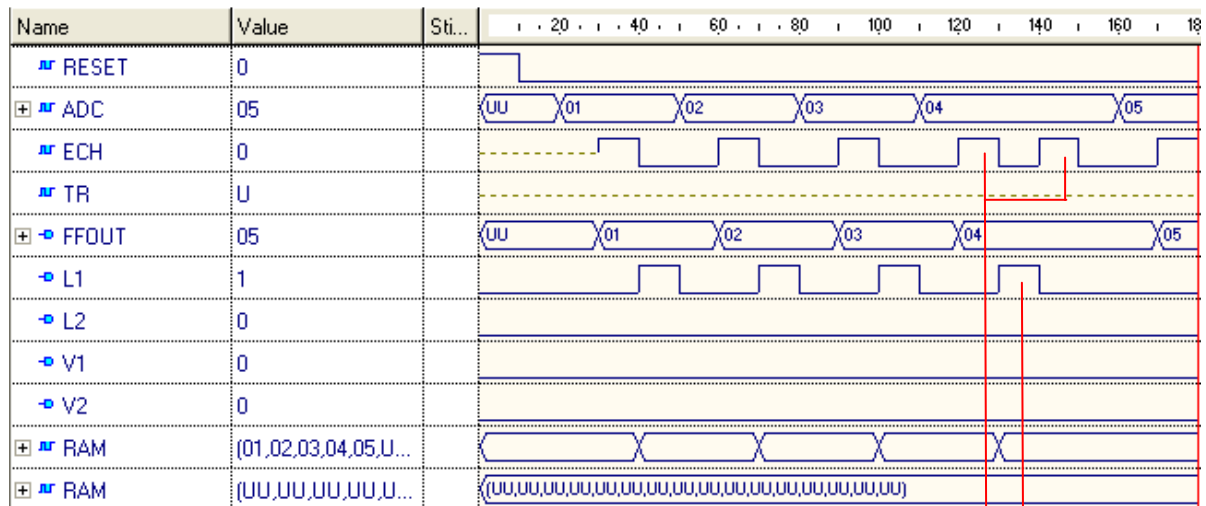
Les nouvelles valeurs captées sont enregistrées dans le deuxième Buffer

Fig. III.9 Simulation VHDL de la phase de vidage du tampon

VI.3. La simulation du contrôleur.

L'organe de contrôle est responsable de la génération des signaux de commandes pour la lecture, l'enregistrement, l'agrégation et le vidage des tampons. Il reçoit en entrée la donnée captée sur le bus ADC synchronisée par le signal ECH. Il reçoit également une commande de transfert du réseau via le signal TR. En sortie, il fournit au tampon en cours de réception la donnée à enregistrer via le bus FFOUT synchronisée par le signal L1 ou L2 en fonction du tampon actuel. Cette donnée n'est fournie que si elle est différente de l'ancienne valeur captée précédemment et enregistrée dans un registre interne de l'organe de contrôle. Il fournit également un signal de commande de vidage du tampon sur la ligne V1 ou V2 quand ce dernier est plein ou quand un signal de transfert arrive de l'unité de traitement.

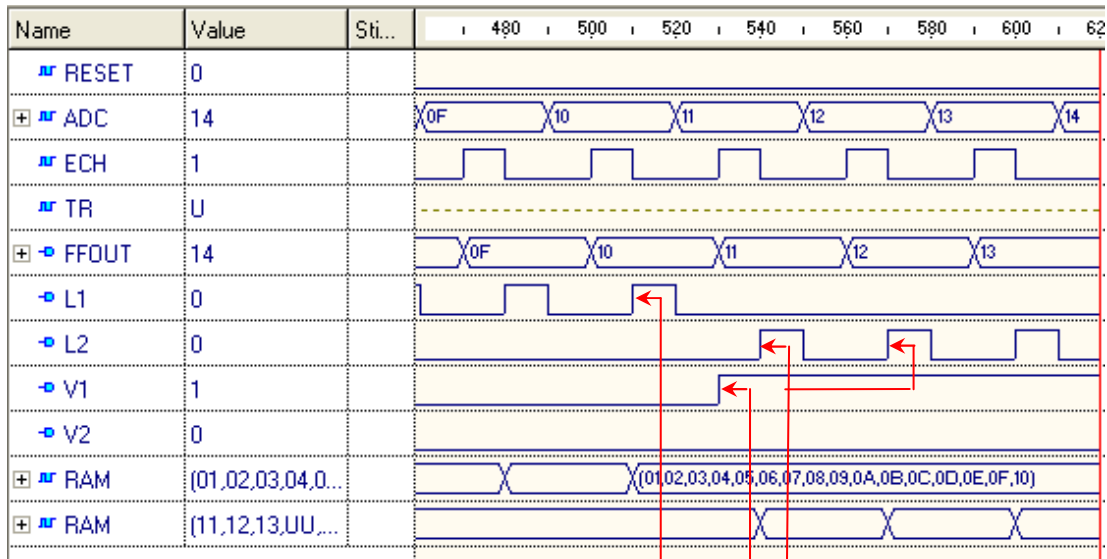
La figure Fig.III.10 montre la première phase de captage et les signaux générés par l'organe de contrôle. A chaque fois que l'ADC fournit une donnée synchronisée par le signal ECH, le contrôleur génère un signal de chargement sur L1 pour l'enregistrer sur le tampon 1 (RAM1). La fonction d'agrégation est montrée dans le tableau Tab. 3 d'une durée de simulation entre 120 et 160 ns. Bien que l'ADC ait fourni deux fois la même valeur (04), le contrôleur ne génère qu'une seule impulsion sur le signal L1 permettant d'éviter d'enregistrer deux fois la même donnée dans le tampon.



La valeur 04 est fournit à deux reprises par l'ADC
 La valeur 04 est enregistrée une seule fois dans le Buffer

Fug.III.10 Signaux du contrôleur lors de la première phase de captage et fonction d'agrégation de données

La figure Fig. III.11 montre les signaux générés par le contrôleur quand le premier tampon est plein. Le contrôleur active le signal de vidage du premier buffer (V1) et continue à enregistrer les prochaines valeurs sur le deuxième tampon en activant à chaque nouvelle valeur le signal L2.



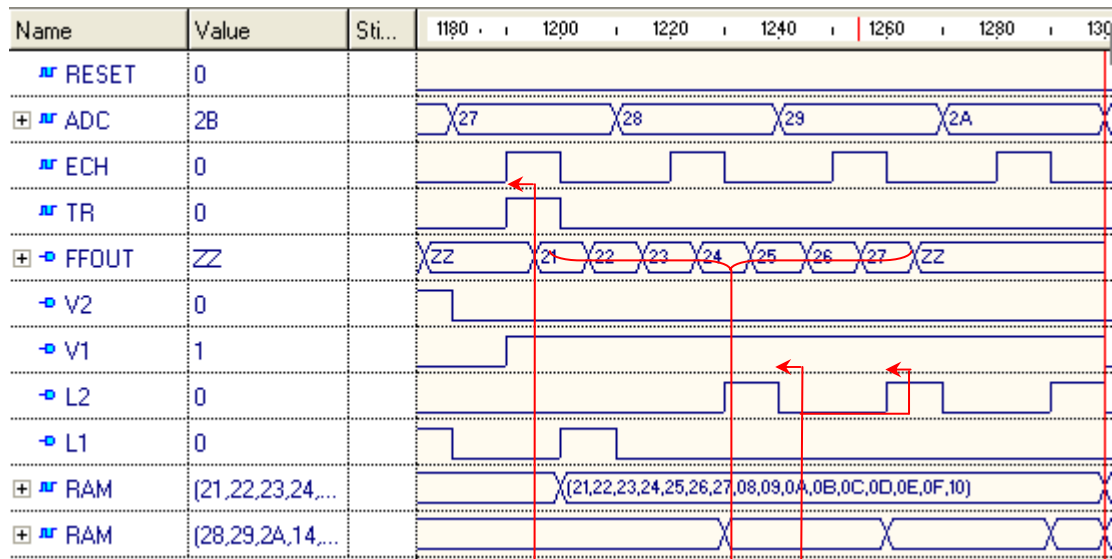
Dernier enregistrement sur le buffer 1 avant remplissage

Vidage du buffer 1 plein

Prochains enregistrements dans le buffer 2

Fig.III.11 Signaux du contrôleur lors de du basculement des tampons

La figure III.12 montre les signaux générés par le contrôleur lorsqu'un signal de transfert arrive de l'unité de traitement du capteur. Le contrôleur vide le buffer actuel et continue à enregistrer les nouvelles valeurs sur l'autre tampon.



Signal de transfert du réseau

Vidage du buffer actuel

Enregistrement sur l'autre buffer

Fig. III.12 Signaux du contrôleur lors de la demande de transfert venant de l'unité de traitement

VII. L'implémentation en un circuit FPGA

VII.1 Le circuit FPGA

a) Définition d'un circuit programmable

Un circuit programmable est un assemblage d'opérateurs logiques combinatoires et de bascules dans lequel la fonction réalisée n'est pas fixée lors de la fabrication. Il contient potentiellement la possibilité de réaliser toute une classe de fonctions, plus ou moins large suivant son architecture.

La programmation du circuit consiste à définir une fonction parmi toutes celles qui sont potentiellement réalisables. Comme dans toute réalisation en logique câblée, une fonction logique est définie par les interconnexions entre des opérateurs combinatoires et des bascules (synchrone, cela va presque sans dire), et par les équations des opérateurs combinatoires. Il est important de relever que ce qui est programmable dans un circuit concerne donc les interconnexions et les opérateurs combinatoires. Les bascules sont le plus souvent de simples bascules D, ou des bascules configurables en bascules D ou T.

b) Définition FPGA

Lancé sur le marché en 1984, par la firme **XILINX**, le FPGA (Field Programmable Gate Array) est un circuit pré-diffusé programmable. Les blocs logiques sont plus nombreux et plus réduits, néanmoins avec les interconnexions entre les blocs logiques décentralisées. Le passage d'un bloc logique à un autre se fait par un nombre de point de connexion (responsables des temps de propagation) fonction de la position relative des deux blocs logiques et de l'état d'encombrement de la matrice.

De la phase de placement des blocs logiques et de routage des connexions dépendront, donc, considérablement les performances du circuit en termes de vitesse.

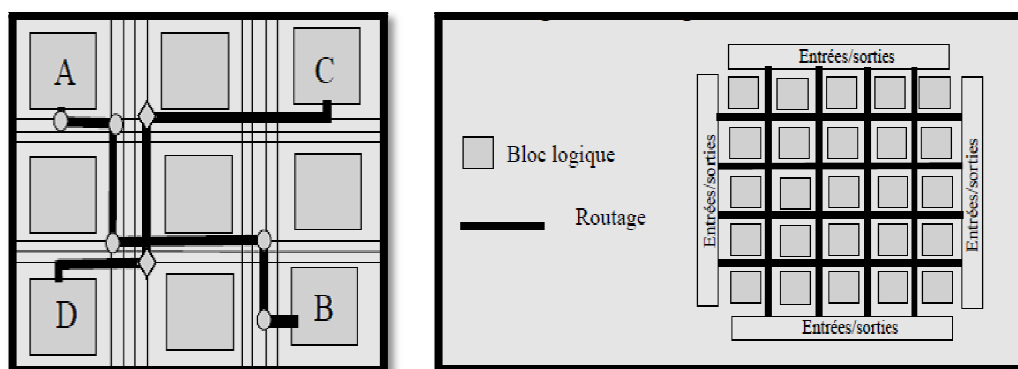


Fig. III.13 Circuit FPGA

c) La carte DE2

La carte DE2 est construite autour d'un FPGA ALTERA Cyclone II (35000 Logic Elements ou LEs), comporte de la mémoire FLASH, SRAM et SDRAM, et de nombreux périphériques d'affichage (LEDs, LCD, VGA, TV), sonores et de communication (Ethernet, USB, IrDA..)

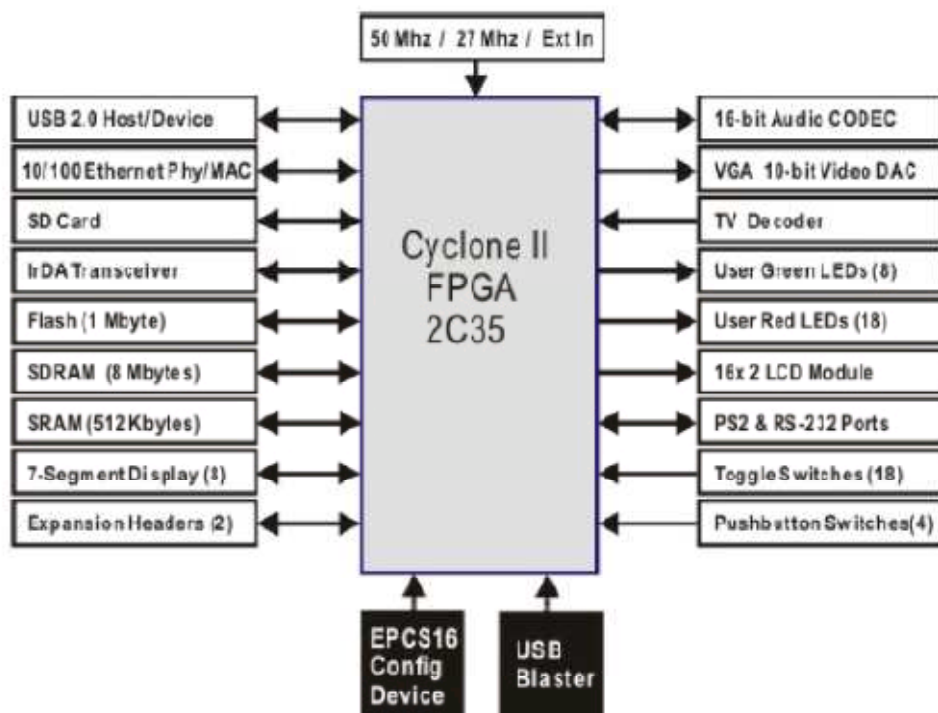


Fig.III.14 Description de la carte DE2

VII.2 Les étapes d'implémentation

VII.2.1. Synthèse

La synthèse est l'outil qui permet de transformer une description VHDL d'un circuit en un répertoire constituée d'une liste d'équations booléennes et d'informations portant sur les entrées/sorties du circuit. Plus communément désigné par le mot Netlist de portes logiques ayant le même comportement que le circuit de départ.

VII .2.2. Mapping

La netlist du circuit est ensuite adaptée aux primitives logiques du FPGA cible. Cette étape de ciblage technologique permet ainsi de passer d'une description structurelle générique à une description spécialisée pour une architecture précise¹. Les éléments de base ne sont pas alors des portes logiques mais des cellules programmables qui sont dans le FPGA sélectionné.

VII .2.3. Placement routage

La phase de mapping ayant identifié les ressources logiques nécessaires à l'implémentation d'un circuit, la tâche de placement/routage consiste, alors, à disposer et à connecter ces ressources sur la surface du FPGA. Il est possible de donner au placeur routeur des contraintes spatiales au temporelles, pour fixer par exemple la position des ports d'entrée/sortie du circuit ou bien une période d'horloge maximale².

A l'issue de l'étape de placement/routage, le circuit obtenu est tel qu'il sera programmé sur le FPGA.

VII.2.4 Configuration

Enfin, la dernière étape avant la programmation effective du FPGA consiste à générer un bitstream. Ce dernier est en fait un fichier contenant tous les bits de configuration du FPGA construit pour correspondre parfaitement au circuit décrit lors du placement/routage.

Une fois le bitstream créé, il ne reste plus qu'à le télécharger dans le FPGA grâce à une interface dédiée.

Conclusion

La conception d'un algorithme d'agrégation de données pour un WSN est un gros challenge. Notre solution est une bonne candidate à une technique d'agrégation de données. La solution originale présentée est la possibilité d'une conception hardware et non logicielle d'une technique simple d'agrégation de données à embarquer sur une architecture de type FPGA dotant un nœud de capteur, un clusterhead ou un puits (sink). Le circuit qui en résulte permet d'agréger de manière significative les flots de données environnementales brutes de tout le réseau et de les transmettre affinés à une unité de traitement distante (Station de base). Cette agrégation engendrera un gain énorme en énergie, en bande passante et le circuit fonctionnera en parallèle avec le microcontrôleur du nœud senseur.

Conclusion générale
Et perspectives

La réalisation de ce projet a permis de mettre en place une méthode d'agrégation de données à la volée dans les réseaux de capteurs sans fil.

Afin de réaliser notre circuit nous avons poursuivi une démarche de simulation VHDL pour bien tester notre algorithme d'agrégation.

La réalisation de ce travail nous a permis d'élargir aussi bien nos connaissances théoriques que pratiques et d'acquérir de nouvelles connaissances sur le langage VHDL et les circuits FPGA.

Cette agrégation engendrera un gain énorme en énergie, en bande passante et le circuit fonctionnera en parallèle avec le microcontrôleur du nœud senseur. La prochaine étape de notre travail consiste à transformer le code VHDL de l'algorithme d'agrégation de données en un circuit FPGA en utilisant la carte DE2.

Références Bibliographiques

Bibliographie et Webliographie :

- [1] Mémoire Master II recherche « La consommation d'énergie dans les RCSF » réalisé par S.MOAD année universitaire 2007/2008.
- [2] Mémoire Master I « Configuration et test de connectivité IP » réalisé par LABORDE.C et DELGADO.F Mai 2010
- [3] « Compression de données avec pertes » Réalisé par S.SAADI et Y.PENEVEYRE.
- [4] Mémoire Master II « Conception d'une architecture hiérarchique de réseau de capteurs pour le stockage et la compression de données », L'UFR des Science et Technique de l'université de FRANCHECOMTÉ, Mars 2010
- [5] "A survey on sensor networks" réalisé par Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam Aout 2002.
- [6] Conférence " La sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil" réalisé par B. Khalifa Université de Béchar 2006
- [7] The Sensor Museum. <http://www.btnode.ethz.ch/Projects/SensorNetworkMuseum/>
- [8]] (2008) The Crossbow website. [Online]. Available <http://www.xbow.com>
- [9] 1995-2009 The Texas Instruments website. <http://focus.ti.com/>
- [10] « Traitement du Signal pour Réseaux de Capteurs : Échantillonnage et Communications» réalisé par François INGELREST, Olivier ROY, Martin VETTERLI, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse
- [11] « Les réseaux de capteurs : état de l'art » réalisé par Lyes KHELLAD, Nadjib BADACHE N° LSI-TR0304, Université USTHB. Février 2004.
- [12] « Energy-aware wireless microsensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, » réalisé par Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B. Srivastava. Mars 2002
- [13] « Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie », réalisé par Cristian Duran-Faundez 2009
- [14] <http://www.businessweek.com/datedtoc/1999/9935.htm>. 21 ideas for the 21st century.
- [15] " Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems", réalisé par M. Ilyas and I. Mahgoub 2005.
- [16] « A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks» réalisé par Arampatzis, Th., J. Lygeros et S. Manesis 2005
- [17] "A line in the sand: A wireless sensor network for target detection, classification, and tracking. IEEE Computer Networks" réalisé par Arora, A., P. Dutta, S. Bapat, V. Kulathumani, H. Zhang, V. Naik, V. Mittal, H. Cao, M. Demirbas, M. Gouda, Y. Choi, T. Herman, S. Kulkarni, U. Arumugam, M. Nesterenko, A. Vora et M. Miyashita 2005 .

- [18] “Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: 2002 ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. WSNA '02. Atlanta GA” réalisé par Joseph Polastre, Robert Szewczyk, David Culler et John Anderson 2002.
- [19] “Autonomous monitoring of vulnerable habitats using a wireless sensor network. In: Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, REALWSN'08. Glasgow, Scotland.” réalisé par Naumowicz, Tomasz, Robin Freeman, Andreas Heil, Martin Calsyn, Eric Hellmich, Alexander Brandle, Tim Guilford et Jochen Schiller (2008).
- [20] « The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species. International Journal of High Performance Computing Applications. » réalisé par Biagioni, Edoardo S. et K. W. Bridges 2002.
- [21] “Low cost system for detecting leakages along artificial dikes with wireless sensor networks. In: Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, REALWSN'08. Glasgow, Scotland. “ réalisé par Schulz, Jens, Frank Reichenbach, Jan Blumenthal et Dirk Timmermann 2008.
- [22] « Wireless sensors for wildfire monitoring. In: Proceedings of SPIE Symposium on Smart Structures & Materials/ NDE 2005. San Diego, California » réalisé par Doolin, David M. et Nicholas Sitar (2005).
- [23] “Performance study of IEEE 802.15.4 for industrial maintenance applications. In: IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT2008. Chengdu, China.” réalisé par Salles, Nicolas, Nicolas Krommenacker et Vincent Lecuire (2008).
- [24] «Measurements of a wireless link in an industrial environment using an ieee 802.11-compliant physical layer. IEEE Transaction on Industrial Electronics. » réalisé par Willig, A., M. Kubisch, C. Hoene et A. Wolisz (2002).
- [25] Thèse de Doctorat « Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique. » réalisé par LEHSAINI Mohamed
- [26] « Algorithme pour l'estimation de données dans les RCSF » réalisé par ALIA GHADDAR. Université LILLE 1 .
- [27] « La fusion d'informations » réalisé par MARTIN.A Janvier 2005.
- [28] Rapport final « Agrégation de données dans les réseaux de capteurs » réalisé par XUE Yong ,AGUILAR Andres, GONZALEZ Andres BARROUX Mickaël 2010
- [29] « Une proposition d'agrégation de MAC pour les réseaux de capteurs utilisant des fonctions de hachage universelles » réalisé par Wassim Znaidi et Marine Minier et Cédric Lauradoux.
- [30] Rapport Projet VHDL « Systèmes parallèles et distribués » réalisé par M.LALAM Avril 2008.

Annexe

ISSN 1726-5479

SENSORS & TRANSDUCERS

7^{vol. 142}
/12



Sensor Networks and Wireless Sensor Networks

International Frequency Sensor Association Publishing





Sensors & Transducers

Volume 142, Issue 7,
July 2012

www.sensorsportal.com

ISSN 1726-5479

Editors-in-Chief: professor Sergey Y. Yurish, tel.: +34 696067716, e-mail: editor@sensorsportal.com

Editors for Western Europe

Meijer, Gerard C.M., Delft University of Technology, The Netherlands
Ferrari, Vittorio, Università di Brescia, Italy

Editors for North America

Datskos, Panos G., Oak Ridge National Laboratory, USA
Fabien, J. Josse, Marquette University, USA
Katz, Evgeny, Clarkson University, USA

Editor South America

Costa-Felix, Rodrigo, Inmetro, Brazil

Editor for Eastern Europe

Sachenko, Anatoly, Ternopil State Economic University, Ukraine

Editor for Asia

Ohyama, Shinji, Tokyo Institute of Technology, Japan

Editor for Africa

Maki K.Habib, American University in Cairo, Egypt

Editor for Asia-Pacific

Mukhopadhyay, Subhas, Massey University, New Zealand

Editorial Advisory Board

Abdul Rahim, Ruzairi, Universiti Teknologi, Malaysia
Ahmad, Mohd Noor, Nothern University of Engineering, Malaysia
Annamalai, Karthigeyan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan
Arcega, Francisco, University of Zaragoza, Spain
Arguel, Philippe, CNRS, France
Ahn, Jae-Pyoung, Korea Institute of Science and Technology, Korea
Arndt, Michael, Robert Bosch GmbH, Germany
Ascoli, Giorgio, George Mason University, USA
Atalay, Selcuk, Inonu University, Turkey
Atghiaee, Ahmad, University of Tehran, Iran
Augutis, Vygtantas, Kaunas University of Technology, Lithuania
Avachit, Patil Lalchand, North Maharashtra University, India
Ayesh, Aladdin, De Montfort University, UK
Azamimi, Azian binti Abdullah, Universiti Malaysia Perlis, Malaysia
Bahreyni, Behraad, University of Manitoba, Canada
Baliga, Shankar, B., General Motors Transnational, USA
Baolian, Ye, Zhengzhou University, China
Barford, Lee, Agilent Laboratories, USA
Barlingay, Ravindra, RF Arrays Systems, India
Basu, Sukumar, Jadavpur University, India
Beck, Stephen, University of Sheffield, UK
Ben Bouzid, Sihem, Institut National de Recherche Scientifique, Tunisia
Benachaiha, Chellali, Universitaire de Bechar, Algeria
Binnie, T. David, Napier University, UK
Bischoff, Gerlinde, Inst. Analytical Chemistry, Germany
Bodas, Dhananjay, IMTEK, Germany
Borges Carval, Nuno, Universidade de Aveiro, Portugal
Bouchikhi, Benachir, University Moulay Ismail, Morocco
Bousbia-Salah, Mounir, University of Annaba, Algeria
Bouvet, Marcel, CNRS – UPMC, France
Brudzewski, Kazimierz, Warsaw University of Technology, Poland
Cai, Chenxin, Nanjing Normal University, China
Cai, Qingyun, Hunan University, China
Calvo-Gallego, Jaime, Universidad de Salamanca, Spain
Campanella, Luigi, University La Sapienza, Italy
Carvalho, Vitor, Minho University, Portugal
Cecelja, Franjo, Brunel University, London, UK
Cerde Belmonte, Judith, Imperial College London, UK
Chakrabarty, Chandan Kumar, Universiti Tenaga Nasional, Malaysia
Chakravorty, Dipankar, Association for the Cultivation of Science, India
Changhai, Ru, Harbin Engineering University, China
Chaudhari, Gajanan, Shri Shivaji Science College, India
Chavali, Murthy, N.I. Center for Higher Education, (N.I. University), India
Chen, Jiming, Zhejiang University, China
Chen, Rongshun, National Tsing Hua University, Taiwan
Cheng, Kuo-Sheng, National Cheng Kung University, Taiwan
Chiang, Jeffrey (Cheng-Ta), Industrial Technol. Research Institute, Taiwan
Chiriac, Horia, National Institute of Research and Development, Romania
Chowdhuri, Arijit, University of Delhi, India
Chung, Wen-Yaw, Chung Yuan Christian University, Taiwan
Corres, Jesus, Universidad Publica de Navarra, Spain
Cortes, Camilo A., Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Courtois, Christian, Universite de Valenciennes, France
Cusano, Andrea, University of Sannio, Italy
D'Amico, Arnaldo, Università di Tor Vergata, Italy
De Stefano, Luca, Institute for Microelectronics and Microsystem, Italy
Deshmukh, Kiran, Shri Shivaji Mahavidyalaya, Barshi, India
Dickert, Franz L., Vienna University, Austria
Diegue, Angel, University of Barcelona, Spain
Dighavkar, C. G., M.G. Vidyamandir's L. V.H. College, India
Dimitropoulos, Panos, University of Thessaly, Greece
Ding, Jianning, Jiangsu Polytechnic University, China

Djordjevic, Alexandar, City University of Hong Kong, Hong Kong
Donato, Nicola, University of Messina, Italy
Donato, Patricio, Universidad de Mar del Plata, Argentina
Dong, Feng, Tianjin University, China
Drljaca, Predrag, Intersema Sensoric SA, Switzerland
Dubey, Venketesh, Bournemouth University, UK
Enderle, Stefan, Univ. of Ulm and KTB Mechatronics GmbH, Germany
Erdem, Gursan K. Arzum, Ege University, Turkey
Erkmen, Aydan M., Middle East Technical University, Turkey
Estelle, Patrice, Insa Rennes, France
Estrada, Horacio, University of North Carolina, USA
Faiz, Adil, INSA Lyon, France
Fericean, Sorin, Balluff GmbH, Germany
Fernandes, Joana M., University of Porto, Portugal
Francioso, Luca, CNR-IMM Institute for Microelectronics and Microsystems, Italy
Francis, Laurent, University Catholique de Louvain, Belgium
Fu, Weiling, South-Western Hospital, Chongqing, China
Gaura, Elena, Coventry University, UK
Geng, Yanfeng, China University of Petroleum, China
Gole, James, Georgia Institute of Technology, USA
Gong, Hao, National University of Singapore, Singapore
Gonzalez de la Rosa, Juan Jose, University of Cadiz, Spain
Granel, Annette, Goteborg University, Sweden
Graff, Mason, The University of Texas at Arlington, USA
Guan, Shan, Eastman Kodak, USA
Guillet, Bruno, University of Caen, France
Guo, Zhen, New Jersey Institute of Technology, USA
Gupta, Narendra Kumar, Napier University, UK
Hadjiloucas, Sillas, The University of Reading, UK
Haider, Mohammad R., Sonoma State University, USA
Hashsham, Syed, Michigan State University, USA
Hasni, Abdelhafid, Bechar University, Algeria
Hernandez, Alvaro, University of Alcalá, Spain
Hernandez, Wilmar, Universidad Politecnica de Madrid, Spain
Homontcovschi, Dorel, SUNY Binghamton, USA
Horstman, Tom, U.S. Automation Group, LLC, USA
Hsiai, Tzung (John), University of Southern California, USA
Huang, Jeng-Sheng, Chung Yuan Christian University, Taiwan
Huang, Star, National Tsing Hua University, Taiwan
Huang, Wei, PSG Design Center, USA
Hui, David, University of New Orleans, USA
Jaffrezic-Renault, Nicole, Ecole Centrale de Lyon, France
James, Daniel, Griffith University, Australia
Janting, Jakob, DELTA Danish Electronics, Denmark
Jiang, Liudi, University of Southampton, UK
Jiang, Wei, University of Virginia, USA
Jiao, Zheng, Shanghai University, China
John, Joachim, IMEC, Belgium
Kalach, Andrew, Voronezh Institute of Ministry of Interior, Russia
Kang, Moonho, Sunmoon University, Korea South
Kaniusas, Eugenijus, Vienna University of Technology, Austria
Katake, Anup, Texas A&M University, USA
Kausel, Wilfried, University of Music, Vienna, Austria
Kavasoglu, Nese, Mugla University, Turkey
Ke, Cathy, Tyndall National Institute, Ireland
Khelfaoui, Rachid, Université de Bechar, Algeria
Khan, Asif, Aligarh Muslim University, Aligarh, India
Kim, Min Young, Kyungpook National University, Korea South
Ko, Sang Choon, Electronics. and Telecom. Research Inst., Korea South
Kotulski, Malgorzata, Wroclaw University of Technology, Poland
Kockar, Hakan, Balikesir University, Turkey
Kong, Ing, RMIT University, Australia
Kratz, Henrik, Uppsala University, Sweden

Krishnamoorthy, Ganesh, University of Texas at Austin, USA
Kumar, Arun, University of Delaware, Newark, USA
Kumar, Subodh, National Physical Laboratory, India
Kung, Chih-Hsien, Chang-Jung Christian University, Taiwan
Lacnjevac, Caslav, University of Belgrade, Serbia
Lay-Ekuakille, Aime, University of Lecce, Italy
Lee, Jang Myung, Pusan National University, Korea South
Lee, Jun Su, Amkor Technology, Inc. South Korea
Lei, Hua, National Starch and Chemical Company, USA
Li, Fengyuan (Thomas), Purdue University, USA
Li, Genxi, Nanjing University, China
Li, Hui, Shanghai Jiaotong University, China
Li, Sihua, Agiltron, Inc., USA
Li, Xian-Fang, Central South University, China
Li, Yuefa, Wayne State University, USA
Liang, Yuanchang, University of Washington, USA
Liawruangrath, Saisunee, Chiang Mai University, Thailand
Liew, Kim Meow, City University of Hong Kong, Hong Kong
Lin, Hermann, National Kaohsiung University, Taiwan
Lin, Paul, Cleveland State University, USA
Linderholm, Pontus, EPFL - Microsystems Laboratory, Switzerland
Liu, Aihua, University of Oklahoma, USA
Liu Changgeng, Louisiana State University, USA
Liu, Cheng-Hsien, National Tsing Hua University, Taiwan
Liu, Songqin, Southeast University, China
Lodeiro, Carlos, University of Vigo, Spain
Lorenzo, Maria Encarnacio, Universidad Autonoma de Madrid, Spain
Lukaszewicz, Jerzy Pawel, Nicholas Copernicus University, Poland
Ma, Zhanfang, Northeast Normal University, China
Majstorovic, Vidosav, University of Belgrade, Serbia
Malyshev, V.V., National Research Centre 'Kurchatov Institute', Russia
Marquez, Alfredo, Centro de Investigacion en Materiales Avanzados, Mexico
Matay, Ladislav, Slovak Academy of Sciences, Slovakia
Mathur, Prafull, National Physical Laboratory, India
Maurya, D.K., Institute of Materials Research and Engineering, Singapore
Mekid, Samir, University of Manchester, UK
Melnyk, Ivan, Photon Control Inc., Canada
Mendes, Paulo, University of Minho, Portugal
Mennell, Julie, Northumbria University, UK
Mi, Bin, Boston Scientific Corporation, USA
Minas, Graca, University of Minho, Portugal
Mishra, Vivekanand, National Institute of Technology, India
Moghavvemi, Mahmoud, University of Malaya, Malaysia
Mohammadi, Mohammad-Reza, University of Cambridge, UK
Molina Flores, Esteban, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico
Moradi, Majid, University of Kerman, Iran
Morello, Rosario, University "Mediterranea" of Reggio Calabria, Italy
Mounir, Ben Ali, University of Sousse, Tunisia
Mrad, Nezh, Defence R&D, Canada
Mulla, Imtiaz Sirajuddin, National Chemical Laboratory, Pune, India
Nabok, Aleksey, Sheffield Hallam University, UK
Neelamegam, Periasamy, Sastra Deemed University, India
Neshkova, Milka, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria
Oberhammer, Joachim, Royal Institute of Technology, Sweden
Ould Lahoucine, Cherif, University of Guelma, Algeria
Pamidighanta, Sayanu, Bharat Electronics Limited (BEL), India
Pan, Jisheng, Institute of Materials Research & Engineering, Singapore
Park, Joon-Shik, Korea Electronics Technology Institute, Korea South
Passaro, Vittorio M. N., Politecnico di Bari, Italy
Penza, Michele, ENEA C.R., Italy
Pereira, Jose Miguel, Instituto Politecnico de Seteбал, Portugal
Petsev, Dimitar, University of New Mexico, USA
Pogacnik, Lea, University of Ljubljana, Slovenia
Post, Michael, National Research Council, Canada
Prance, Robert, University of Sussex, UK
Prasad, Ambika, Gulbarga University, India
Prateepasen, Asa, Kingmoungut's University of Technology, Thailand
Pugno, Nicola M., Politecnico di Torino, Italy
Pullini, Daniele, Centro Ricerche FIAT, Italy
Pumera, Martin, National Institute for Materials Science, Japan
Radhakrishnan, S., National Chemical Laboratory, Pune, India
Rajanna, K., Indian Institute of Science, India
Ramadan, Qasem, Institute of Microelectronics, Singapore
Rao, Basuthkar, Tata Inst. of Fundamental Research, India
Raoof, Kosai, Joseph Fourier University of Grenoble, France
Rastogi Shiva, K., University of Idaho, USA
Reig, Candid, University of Valencia, Spain
Restivo, Maria Teresa, University of Porto, Portugal
Robert, Michel, University Henri Poincare, France
Rezazadeh, Ghader, Urmia University, Iran
Royo, Santiago, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain
Rodriguez, Angel, Universidad Politécnica de Catalunya, Spain
Rothberg, Steve, Loughborough University, UK
Sadana, Ajit, University of Mississippi, USA
Sadeghian Marnani, Hamed, TU Delft, The Netherlands
Sapozhnikova, Ksenia, D.I.Mendeleyev Institute for Metrology, Russia
Sandacci, Serghei, Sensor Technology Ltd., UK
Saxena, Vibha, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India
Schneider, John K., Ultra-Scan Corporation, USA
Sengupta, Deepak, Advance Bio-Photonics, India
Seif, Selemeni, Alabama A & M University, USA
Seifter, Achim, Los Alamos National Laboratory, USA
Shah, Kriyang, La Trobe University, Australia
Sankarraj, Anand, Detector Electronics Corp., USA
Silva Girao, Pedro, Technical University of Lisbon, Portugal
Singh, V. R., National Physical Laboratory, India
Slomovitz, Daniel, UTE, Uruguay
Smith, Martin, Open University, UK
Soleimanpour, Amir Masoud, University of Toledo, USA
Soleymanpour, Ahmad, University of Toledo, USA
Somani, Prakash R., Centre for Materials for Electronics Technol., India
Sridharan, M., Sastra University, India
Srinivas, Talabattula, Indian Institute of Science, Bangalore, India
Srivastava, Arvind K., NanoSonix Inc., USA
Stefan-van Staden, Raluca-Ioana, University of Pretoria, South Africa
Stefanescu, Dan Mihai, Romanian Measurement Society, Romania
Sumriddetchka, Sarun, National Electronics and Comp. Technol. Center, Thailand
Sun, Chengliang, Polytechnic University, Hong-Kong
Sun, Dongming, Jilin University, China
Sun, Junhua, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, China
Sun, Zhiqiang, Central South University, China
Suri, C. Raman, Institute of Microbial Technology, India
Sysoev, Victor, Saratov State Technical University, Russia
Szewczyk, Roman, Industr. Research Inst. for Automation and Measurement, Poland
Tan, Ooi Kiang, Nanyang Technological University, Singapore
Tang, Dianping, Southwest University, China
Tang, Jaw-Luen, National Chung Cheng University, Taiwan
Teker, Kasif, Frostburg State University, USA
Thirunavukkarasu, I., Manipal University Karnataka, India
Thumbavanam Pad, Kartik, Carnegie Mellon University, USA
Tian, Gui Yun, University of Newcastle, UK
Tsiantos, Vassilios, Technological Educational Institute of Kaval, Greece
Tsigara, Anna, National Hellenic Research Foundation, Greece
Twomey, Karen, University College Cork, Ireland
Valente, Antonio, University, Vila Real, - U.T.A.D., Portugal
Vanga, Raghav Rao, Summit Technology Services, Inc., USA
Vaseashta, Ashok, Marshall University, USA
Vazquez, Carmen, Carlos III University in Madrid, Spain
Vieira, Manuela, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal
Vigna, Benedetto, STMicroelectronics, Italy
Vrba, Radimir, Brno University of Technology, Czech Republic
Wandelt, Barbara, Technical University of Lodz, Poland
Wang, Jiangping, Xi'an Shiyou University, China
Wang, Kedong, Beihang University, China
Wang, Liang, Pacific Northwest National Laboratory, USA
Wang, Mi, University of Leeds, UK
Wang, Shinn-Fwu, Ching Yun University, Taiwan
Wang, Wei-Chih, University of Washington, USA
Wang, Wensheng, University of Pennsylvania, USA
Watson, Steven, Center for NanoSpace Technologies Inc., USA
Weiping, Yan, Dalian University of Technology, China
Wells, Stephen, Southern Company Services, USA
Wolkenberg, Andrzej, Institute of Electron Technology, Poland
Woods, R. Clive, Louisiana State University, USA
Wu, DerHo, National Pingtung Univ. of Science and Technology, Taiwan
Wu, Zhaoyang, Hunan University, China
Xiu Tao, Ge, Chuzhou University, China
Xu, Lisheng, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong
Xu, Sen, Drexel University, USA
Xu, Tao, University of California, Irvine, USA
Yang, Dongfang, National Research Council, Canada
Yang, Shuang-Hua, Loughborough University, UK
Yang, Wuqiang, The University of Manchester, UK
Yang, Xiaoling, University of Georgia, Athens, GA, USA
Yaping Dan, Harvard University, USA
Ymeti, Aurel, University of Twente, Netherland
Yong Zhao, Northeastern University, China
Yu, Haihu, Wuhan University of Technology, China
Yuan, Yong, Massey University, New Zealand
Yufera Garcia, Alberto, Seville University, Spain
Zakaria, Zulkarnay, University Malaysia Perlis, Malaysia
Zagnoni, Michele, University of Southampton, UK
Zamani, Cyrus, Universitat de Barcelona, Spain
Zeni, Luigi, Second University of Naples, Italy
Zhang, Minglong, Shanghai University, China
Zhang, Qintao, University of California at Berkeley, USA
Zhang, Weiping, Shanghai Jiao Tong University, China
Zhang, Wenming, Shanghai Jiao Tong University, China
Zhang, Xueji, World Precision Instruments, Inc., USA
Zhong, Haoxiang, Henan Normal University, China
Zhu, Qing, Fujifilm Dimatix, Inc., USA
Zorzano, Luis, Universidad de La Rioja, Spain
Zouroh, Mohammed, University of Cambridge, UK

Contents

Volume 142
Issue 7
July 2012

www.sensorsportal.com

ISSN 1726-5479

Editorial Book Review

Non-Dispersive Infrared Gas Measurement

Sergey Y. Yurish, International Frequency Sensor Association (IFSA) I

Research Articles

Research in Nanothermometry. Part 6. Metrology of Raman Thermometer with Universal Calibration Artifacts

Bohdan Stadnyk, Svyatoslav Yatsyshyn, Oleh Sehedra 1

A Survey of Power-Efficient Gathering of Sensor Information System Based Routing Protocols of Wireless Sensor Networks

Muktar Hussaini, Farhat Anwar, Aisha Hassan A. H. 10

Comparative Analysis of Energy-efficient Cluster-based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks

Naveen Kumar V and Santhi Prabha I 23

TDMA Based Slotted Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks

Prasan Kumar Sahoo 33

Circuit of Data Aggregation on the Fly for WSN

M. Daoui, M. Lalam, S. Hamrioui B. Djamah and D. Nouali 44

Dynamic Analysis of Wireless Sensor Network Programs Based on Binary Tool and Simulator

Yuxia Sun, Yong Tang 54

Circle Intersection Method Combined with Fuzzy Weighted Centroid Method for Localization in WSNs

Mohan Kumar J, P.R. Venkateswaran, N. Gopalakrishna Kini, Sundaresan C. 61

Development of an Automatic Wireless System Applied for Soil Temperature Measurement

S. Makhoulouf, M. Laghrouche 69

Theoretical Analysis to Capacitance of RF MEMS Clamped-Clamped Capacitive Switch

Tian-Jie, Cao 76

Deployment of Wireless Sensor Network for the Measurement of Exhaled Nitric Oxide in In-home Healthcare

Elango Surendran, Mathivanan Natarajan, Arun Venkatesh Krishna, Vairamani Kanagavel, Karunakaran Chandran, Madasamy Thangamuthu, Pandiaraj Manickam. 87

Wireless Communication Solution for Health Care Equipment

Tiago Faustino Andrade, Manuel Rodrigues Quintas, Carlos Moreira da Silva, Maria Teresa Restivo, Maria de Fátima Chouzal and Teresa Maria Amaral 95

Lateral Control of Aircraft, Considering the Cross-coupling Effect of Yaw and Roll on Each-other Using Fuzzy Logic <i>Vishnu G. Nair, V. I. George, Prahlad K. R.</i>	105
A Parametric Study of S- tube Coriolis Mass Flow Meter <i>Arvind K. Rajput, Satish C. Sharma, Marut Shukla, Souvik Roy.....</i>	118
Calibration Method on Machine for Multi-axis Heavy Force Sensor <i>Wei liu, Zhenyuan jia and Qi li.....</i>	130
TiO₂ Thin Film Capacitive Humidity Sensor Based on Sol-gel Technique <i>Manju Pandey, Debdulal Saha, Kamalendu Sengupta, S. S. Islam.....</i>	143

Authors are encouraged to submit article in MS Word (doc) and Acrobat (pdf) formats by e-mail: editor@sensorsportal.com
Please visit journal's webpage with preparation instructions: <http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/Submission.htm>

International Frequency Sensor Association (IFSA).

Inertial Combo Sensors for Consumer & Automotive

Technology, Applications, Industry & Market Report to 2016

Promoted
by
IFSA

This report is focused on the analysis of the opportunities and the challenges for inertial combo sensors in those high-volume market areas.

http://www.sensorsportal.com/HTML/Inertial_Combo_Sensors_Market.htm



Uncooled Infrared Imaging Market: Commercial & Military applications

Market & Technology Report to 2016

Promoted
by
IFSA

This new 2011 IR report, is an updated and in depth analysis of commercial markets covered in the 2010 report in addition we have included a new analysis of the military markets.

http://www.sensorsportal.com/HTML/Detectors_for_Thermography.htm



Circuit of Data Aggregation on the Fly for WSN

M. DAOUI, M. LALAM, S. HAMRIOUI B. DJAMAH and D. NOUALI

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 15000, Algeria

Tel.: +213553092223

E-mail: mdaouidz@yahoo.fr

Received: 27 May 2012 /Accepted: 23 July 2012 /Published: 31 July 2012

Abstract: This paper describes a simple technique of data aggregation which limits data transfer time of sensors in wireless networks and provides an energy efficient solution for data acquisition and a band-width gain. This solution will be implemented in an FPGA-type embedded architecture for wireless sensors networks. The simplicity of our circuit make it suitable to equip a sensor, a clusterhead or a sink to aggregate the received data at the appropriate time by removing all redundant data collected downstream of the sensing circuit. The aggregated data are less bulky and refined for consumption. *Copyright © 2012 IFSA.*

Keywords: SN, Fusion, Aggregation, VHDL, FPGA.

1. Introduction

WSN is an ad hoc wireless network with a high number of wireless nodes equipped with various sensors [1-4] generally deployed in a hostile environment and able to collect environmental phenomena, compute and communicate. The nodes cooperate with each other for a given task.

The information fusion is a set of resources used to combine multiple input sources to better result than that obtained from individual entries [5-9].

The term 'data aggregation' is widely used in WSN [10-14] as a synonym to information fusion [5, 14]. But if one wants to be rigorous, data aggregation (set of functions) is a technique used in information/data Fusion [5]. Other techniques are also used in fusion such as: Filters – the Bayesian and Dempster-Shafer inference, interval functions of combination, classification methods [5] and neural networks [15, 16]. For Kulik et al. [17] the data aggregation technique overcomes implosion and overlapping problems.

Fig. 1 gives the relation between the terms ‘fusion’ and ‘aggregation’.

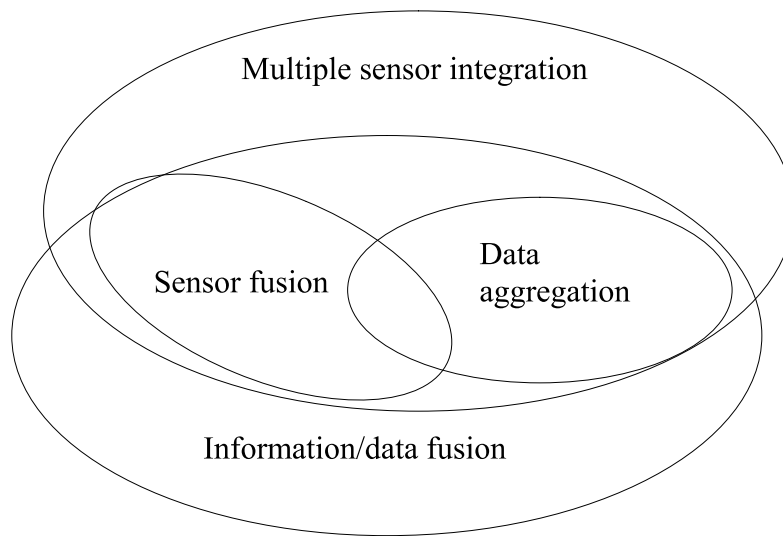


Fig. 1. Relationship between the terms of fusion multi-sensor fusion, multi-sensor integration, data aggregation, data fusion and information fusion [5].

The terminology related to systems, architectures, applications, methods and theories for data fusion is not unified and therefore subject to various definitions [5]. According to Cohen et al. [18], data aggregation is the collection of raw data from ubiquitous data sources, making them less bulky and delivering refined data timely for consumption. Using this definition, we propose a simple algorithm which omits all data redundancies captured from a source and save only the refined data. This algorithm is easy to implement in FPGA-type embedded architecture for wireless sensor networks. The originality consist in the simplicity of the circuit so it can equips a wireless sensor and / or a wireless cluster head and / or sink to aggregate data received at the appropriate time by removing all repetitive data collected on the fly downstream of the sensing circuit. Aggregated data from different sources (sensors, cluster heads, sinks) are less voluminous and refined for consumption. To do so, we first give the data aggregation algorithm, translated to VHDL and simulated. Then the VHDL code can be easily transformed in an FPGA circuit.

2. Problem and Proposed Solution

A wireless sensor is usually equipped with a CPU with limited computing capabilities, powered by battery with life dependent on the use of the sensor. The radio module is the module that consumes the most energy, after come the processor and finally the sensor CAN (see Fig. 2). Limited bandwidth leads to congestion phenomena and transmission errors resulting in excessive energy consumption.

To improve the performance of a wireless sensor, it is clear that we must reduce the use of the radio module and the CPU. Over-utilization of the radio module is due to the captured data redundancy, but also to sending of these data separately. Each time a separated data is sent, an additional cost is generated by the encapsulation layers (adding additional bits for different layers of transmission stack protocol).

Most applications need just to know the changes in physical quantities to which they are interested. It is not necessary to transmit these values if they do not change during a given period. Also in situations

that are not critical, it is not essential to send immediately a captured value. It is possible to keep in a buffer a set of values and send them both in one packet, which reduce the overhead of encapsulations.

Our solution eliminates redundant data and groups the refined data in a buffer in order to transmit them in a minimum packets number. Thus it guarantees consequent energy and bandwidth gain. The hardware implementation of the solution relieves the CPU that holds all its power to other treatments.

Let a buffer of size N at a node. N_t represents the redundant data at time t . The occupation ratio of this buffer is:

$$(N - N_t) / N \quad (1)$$

(with elimination of redundancy on the fly) and therefore the occupation ratio of bandwidth by this node is:

$$(N - N_t) / N \quad (2)$$

The obtained energy gain at this node is:

$$N_t / N. \quad (3)$$

If we consider a wireless sensor network with k nodes, the total bandwidth gain is:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^K \frac{N - N_t^i}{N} \quad (4)$$

With t representing the different time slices of capture, i is the node number. The energy gain of the wireless sensor network with K nodes is:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^K \frac{N_t^i}{N} \quad (5)$$

The Fig. 2 shows the position of the sensor circuit in the module. The algorithm of the circuit is given in the following section.

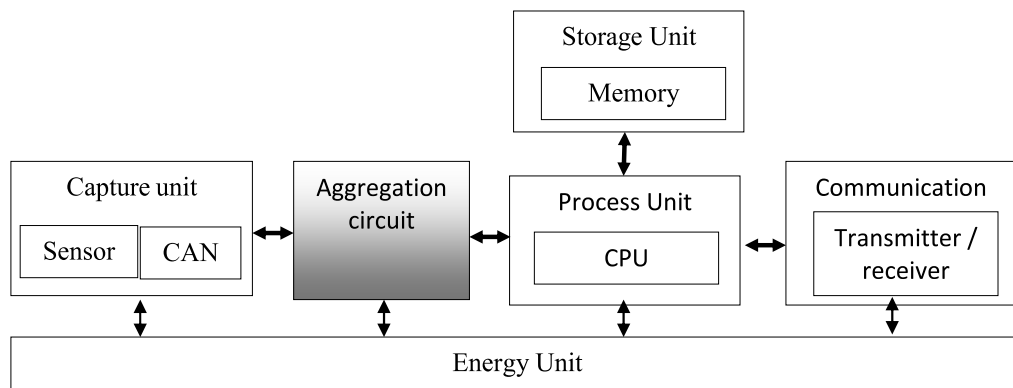


Fig. 2. Position of our circuit in a sensor module.

3. Circuit Algorithm

We present in this section the algorithm of the circuit formed by tree processes. The aggregation process, the filling process and the dumping process. These processes can be executed in parallel under some synchronization constraints.

Aggregation Process

Initialization Phase ($j := 0$ $L := 0$ and pointers at the beginning of buffers) ;

Begin Process

While there are events to capture

Do

while the buffer No. j is not full and transmission order has not arrived

Do

Filling process (event logging) of Buffer No. j

$L := L + 1$

End Do

/* switch to buffer $j + 1$ (modulo 2) */

Dump process for Buffer No. j

$j \leftarrow j + 1$ (modulo 2)

End Do

End process

Filling Process

Begin process

Capture event (values)

If captured event is not the same as the previous stored in buffer No. j then

Put captured event in Buffer No. j

Increment pointer of Buffer No. j

End If

End process

Dump Process

Begin process

Dump buffer j

/* Dump time = number of bytes in the buffer x transfer time of a byte*/

/* run in parallel with aggregation process */

$j := j + 1$ (modulo 2)

$L := 1$;

End process

4. Description of the Data Aggregation Circuit

Fig. 3 gives the synoptic diagram of our circuit. Two buffers operating in flip flop mode receive data from the ADC. When buffer # j ($j \bmod 2$) is filled, it is flushed to the output bus CAPT while the following samples continue to be recorded in buffer # $j+1 \bmod 2$ and so forth.

There are two cases in which the buffer is flushed

- When it is full.
- When a dump signal arrives from the sensor processing unit.

The bloc diagram of the circuit is shown in Fig. 4 composed of a controller and the two Flip Flop buffers. Data captures arrive via ADC bus. The data is synchronized by the capture module on the rising edge of ECH signal. At the outlet, the circuit empties aggregated content located in one of the buffers on the CAPT bus upon receipt of a transfer signal on the line TR or when one of the two buffers is full.

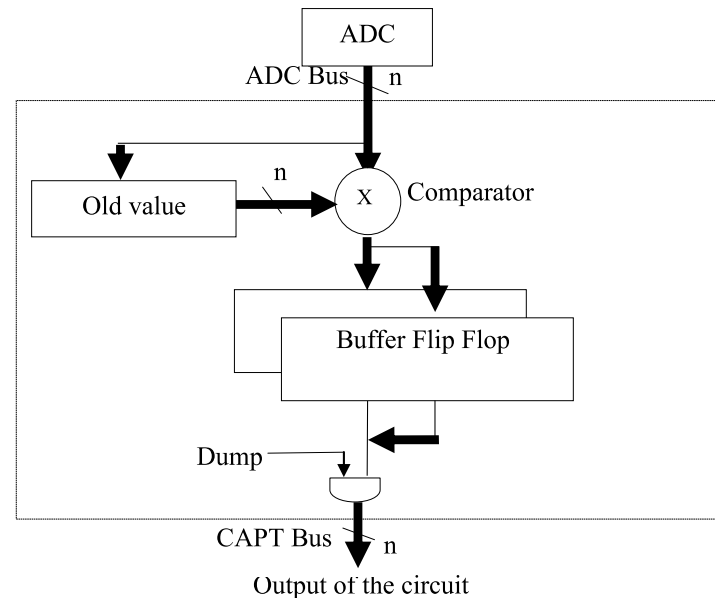


Fig. 3. Synoptic diagram of the data aggregation circuit.

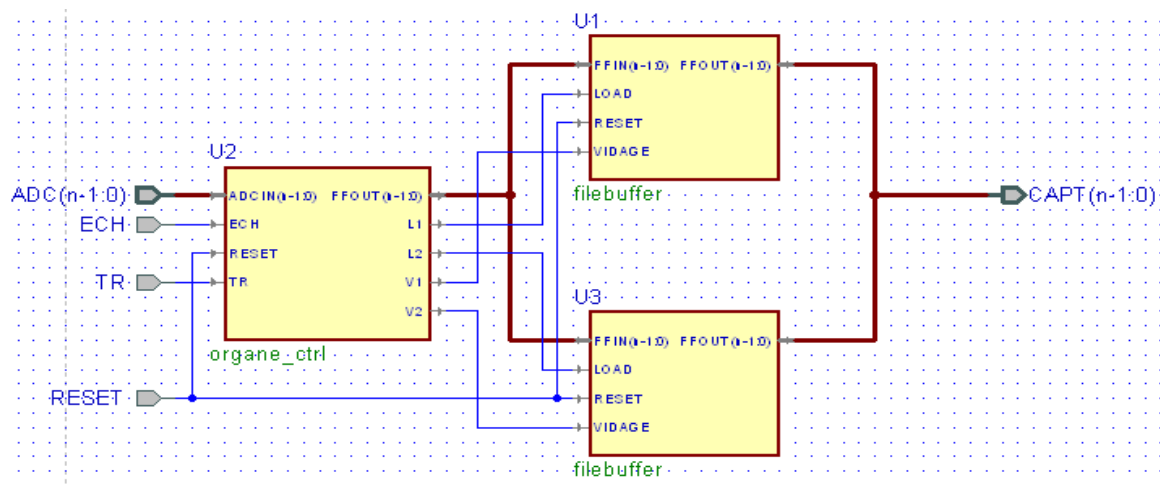


Fig. 4. Block diagram of the data aggregation circuit.

4.1. The Flip-flop Buffer (Filebuffer)

Two buffers are organized so that one can be read and written in parallel. While one of two buffers empties its content (FIFO read of items that are in it), the second buffer stores data from the ADC. This organization enables us not to lose any data during transmission over the network.

The block diagram of the two buffers is shown in Fig. 5.

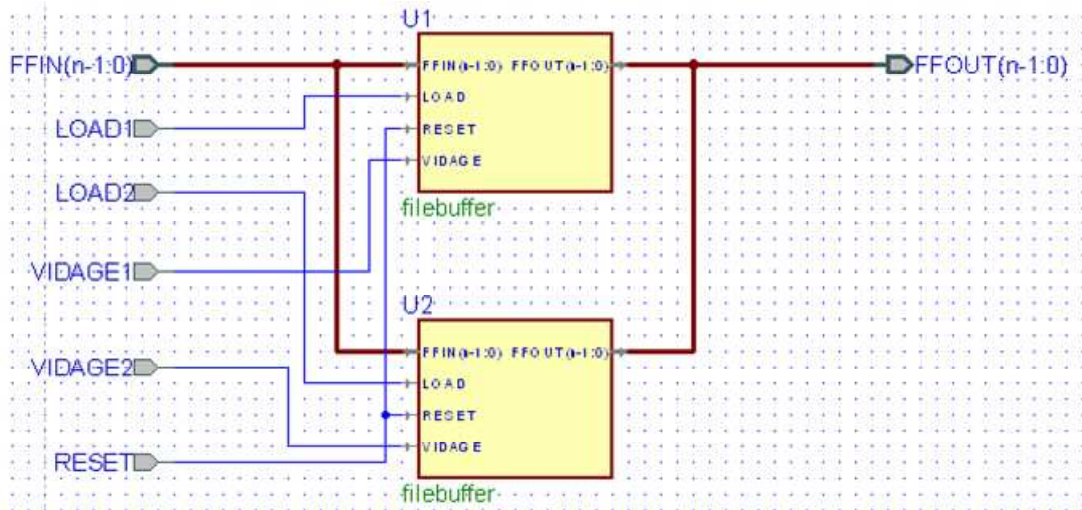


Fig. 5. Block diagram of the two buffers in flip flop mode.

VHDL simulation of the filling phase is given in the Fig.6. After the activation of the RESET signal, the buses of both buffers are putted in high impedance to avoid bus contention. Both buffers are then initialized. All the values received are recorded in one of two buffers depending on the activated signal LOAD (Buffer 1 if LOAD1 is enabled). The recording is done by reading the contents of the bus FFIN synchronized on the rising edge of signal LOAD and saving it in the buffer being received.

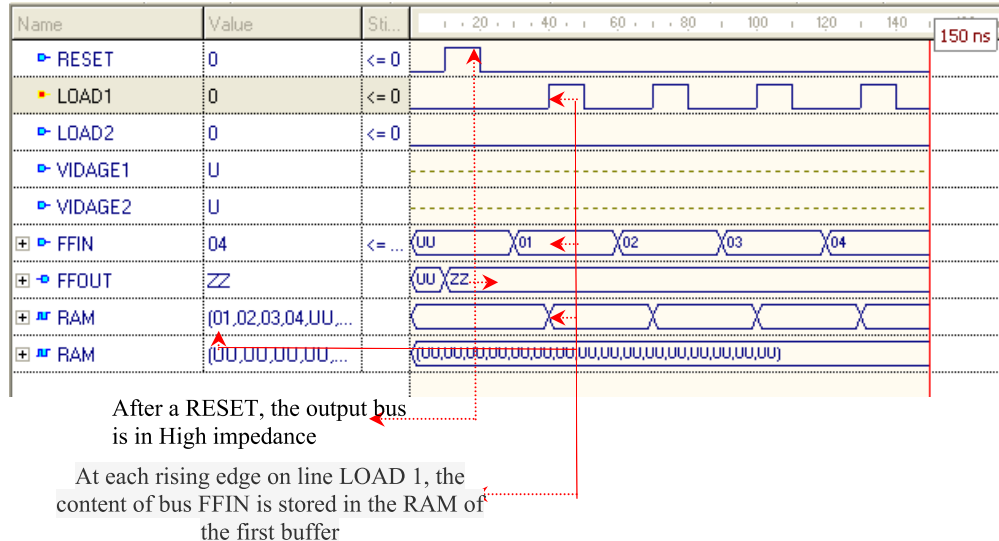


Fig. 6. VHDL simulation of the recording phase.

The simulation of the dumping phase is given in Fig. 7. When the first buffer is full, a dump signal (VIDAGE1) is activated by the controller to empty it on the bus FFOUT. The new values from the sensor continue to be recorded on the second buffer while the first is emptying.

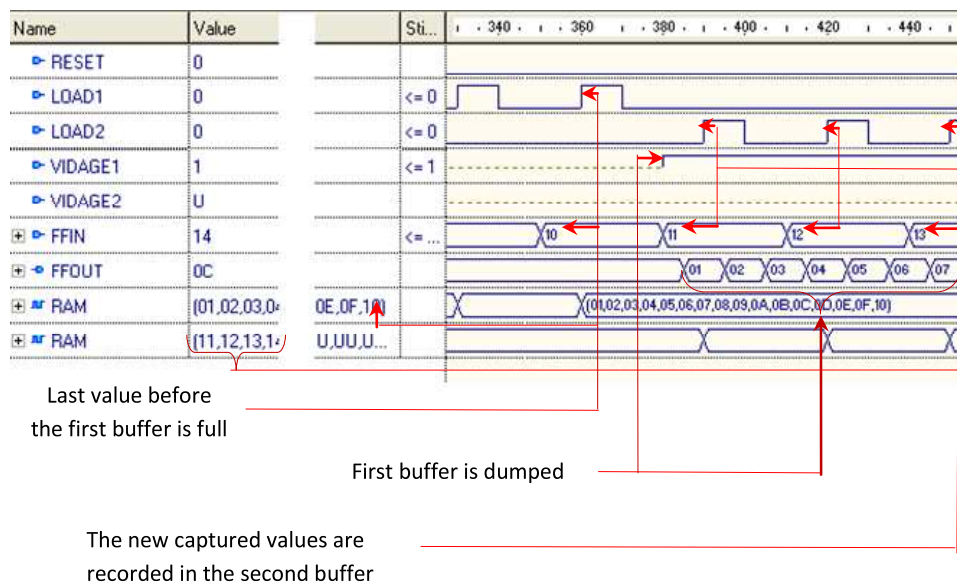


Fig. 7. VHDL Simulation of the dumping phase of the buffers.

4.2. The Controller (organe_ctrl)

The controller is responsible for generating control signals for reading, recording, aggregation and buffer flush. It receives as input the sensed data on ADC bus synchronized by ECH signal. It also receives a transfer command of the network via signal TR. As output, it supplies to the receiving buffer the data to record, via the bus FFOUT synchronized by the signal L1 or L2 according to the current buffer fill mode. This information is provided only if it is different from the old value previously captured and stored in an internal register of the controller. It also provides a control signal for flushing the buffer on line V1 or V2 when it is full or when a transfer signal arrives from the processing unit.

Fig. 8 shows the first phase of capture and the signals generated by the controller. Each time the ADC provides data synchronized by the signal ECH, the controller generates a load signal on L1 in order to save it in the buffer 1 (RAM1). The aggregate function is also shown in the Fig. 8 for simulation duration between 120 and 160 ns. Although the ADC has provided twice the same value (04), the controller generates only one pulse signal on L1 to avoid recording the same data twice in the buffer.

Fig. 9 shows the signals generated by the controller when the first buffer is full. The controller activates the Dump signal for the first buffer (V1) and keeps recording the next values on the second buffer by activating the signal L2 at each new value.

Fig. 10 shows signals generated by the controller when a transfer signal arrives from the sensor's processing unit. The controller flushes the current buffer and continues to record the new values on the other buffer.

5. Conclusion

The design of a data aggregation algorithm for WSN is a big challenge. Our solution is a good candidate for data aggregation technique. The originality of the solution presented in this paper is the possibility of a hardware design of a simple data aggregation to be embedded on an FPGA-type

architecture providing a sensor node, a clusterhead or a sink. The resulting circuit allows to significantly aggregate streams of raw environmental data (CCD, Magneto-resistive, temperature, humidity, ...) of the entire network and to transmit them refined to a remote processing unit (base station). This aggregation will generate a tremendous gain in energy and bandwidth and the circuit will operate in parallel with the CPU of the sensor node. The next stage of our work is to transform the VHDL code in an FPGA-type circuit.

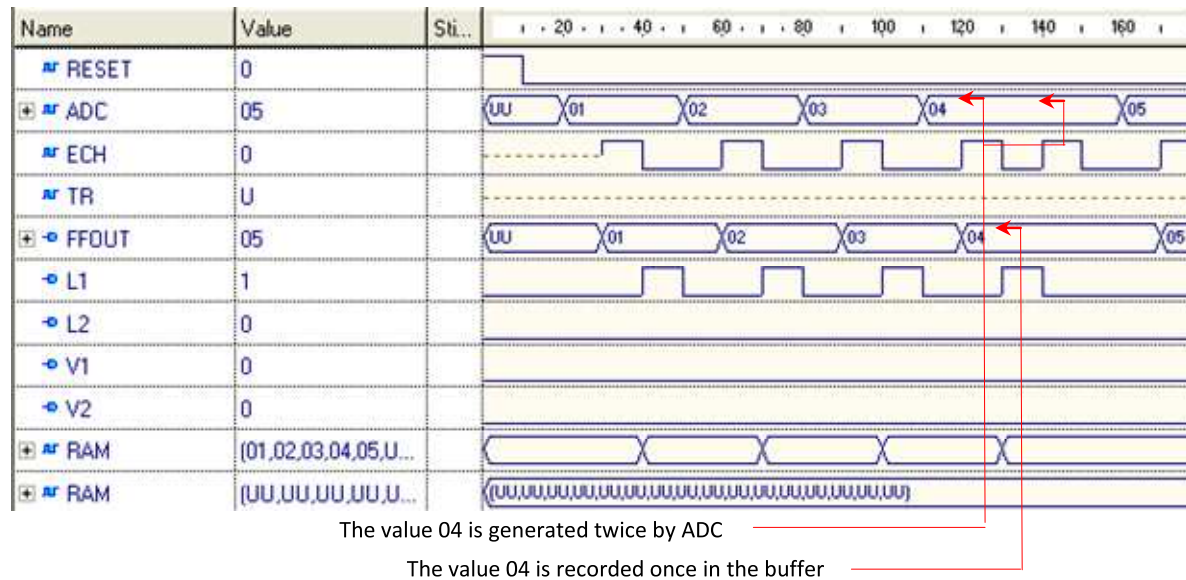


Fig. 8. Signals from the controller at the first phase of capture and data aggregation function.

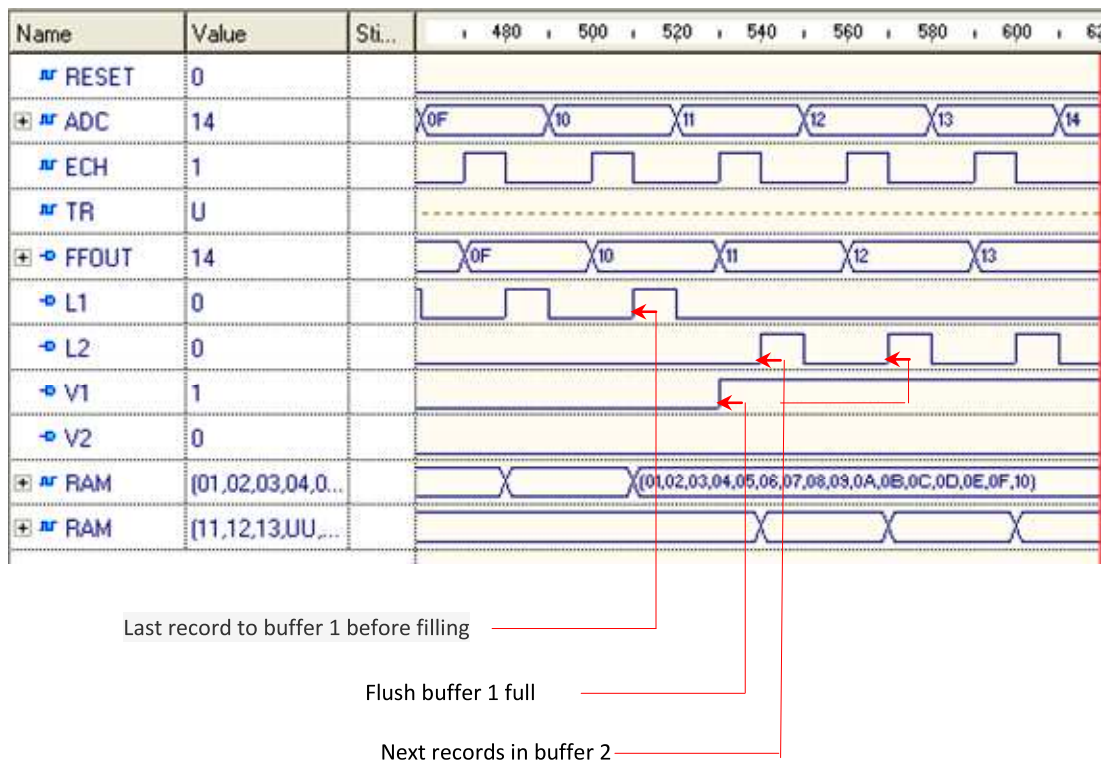


Fig. 9. Controller signals during the switching of buffers.

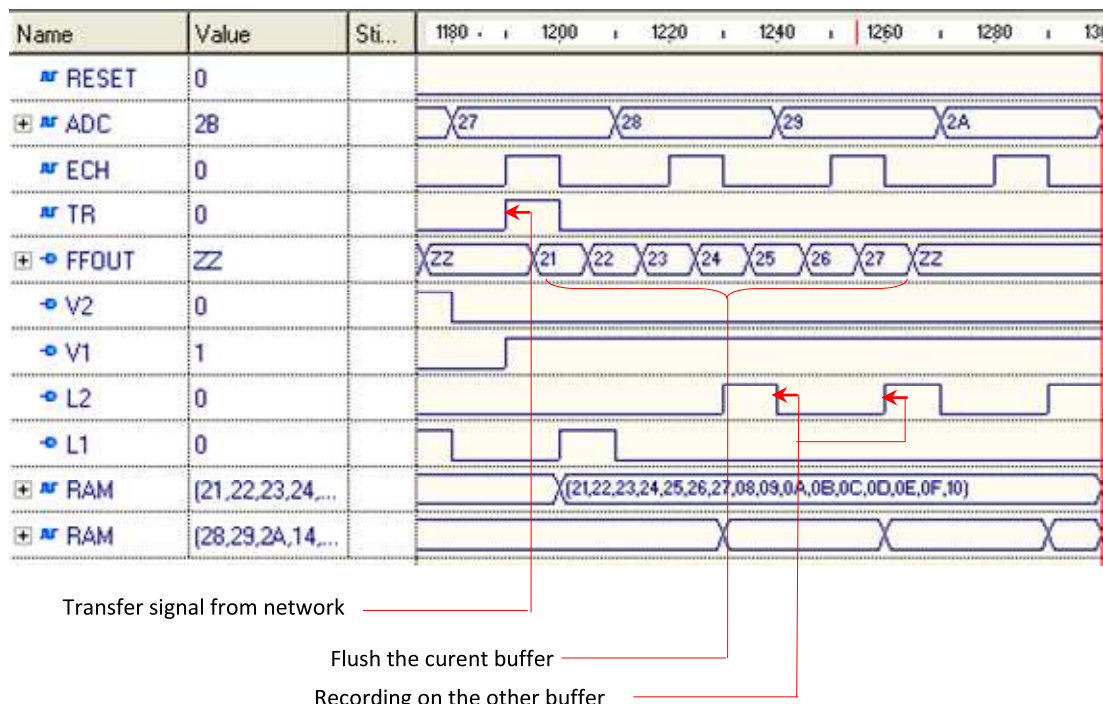


Fig. 10. Signals from the controller during the transfer request from the processing unit.

References

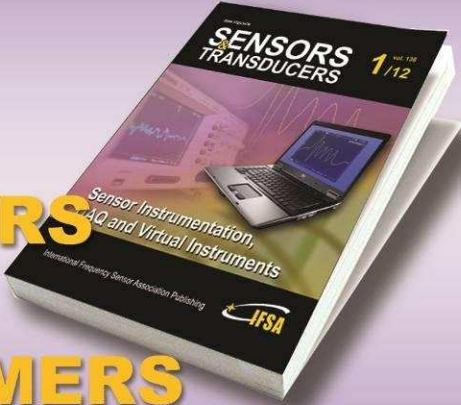
- [1]. G. J. Pottie W. J. Kaiser, Wireless integrated network sensors, *Comm. ACM*, 43, 5, 2000, pp. 51-58.
- [2]. Paul G. Flikkema and Bent W. West, Wireless Sensor Networks: From Laboratory to the Field. Department of Electrical Engineering, *Northern Arizona University*, Flagstaff, AZ 86011-5600 USA.
- [3]. Miloš Sectić, Nikola Zogović, Evaluation of Wireless Sensor Network Simulators, *17th Telecommunications Forum TELFOR*, Serbia, Belgrade, November 24-26, 2009.
- [4]. Iluzaifa Al Nahas, Jitender S. Deogun, Eric D. Manley, Proactive mitigation of impact of wormholes and sinkholes on routing security in energy-efficient wireless sensor networks, *Wireless Netw.*, 15, 4, 2009, pp. 431-441.
- [5]. E. F Nakamura A. A. F Loureiro A. C Frery, Information Fusion for Wireless Sensor Networks : Methods, Models, and Classification, *ACM Computing Surveys*, Vol. 39, No. 3, Article 9, August 2007.
- [6]. Department of Defense, Data fusion lexicon, Published by Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3 (F. E. White, Code 4202, NOSC, San Diego, CA) 1991.
- [7]. D. L. Hall and J. Linas, An Introduction to Multi-sensor Data Fusion, *Proc. IEEE*, 85, 1, 1997, pp. 6-23.
- [8]. G. Brokmann, B. March, D. Romhild and A. Steinke, Integrated multisensors for industrial humidity measurement, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Baden-Baden, Germany, 2001, pp. 201-203.
- [9]. W. Elmenreich, Sensor Fusion in time-triggered systems, PhD. Thesis, Institut für Technische Informatik, *Vienna University of Technology*, Vienna, Austria, 2002.
- [10]. Alexandros G. Dimakis Anand D. Sarwate Martin J. Wainwright, Geographic Gossip: Efficient Aggregation for Sensor networks, *IPSN'06*, Nashville Tennessee USA, April 19-21, 2006.
- [11]. Samuel Madden, Michael J. Franklin and Joseph M. Hellerstein Wei Hong, TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks, in *Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation(OSDI '02)*, Vol. 36, Issue SI, 2002, pp. 131-146.
- [12]. Takafimi Aonishi, Takashi Matsuda, Shinj Mikani, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, Masahiko Yoshimoto et al., Impact of Aggregation Efficiency on GIT Routing for Wireless Sensor Networks, in *Proceedings of the International IEEE Conference on Parallel Processing Workshop (ICPPW '06)*, 2006.
- [13]. K. Kalpatis, K. Dasgupta and P. Namjoshi, Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks, *Comput. Netw.*, 42, 6, August, 2003, pp. 697-716.
- [14]. R. van Renesse, The importance of aggregation. In *Future Directions in Distributed Computing: Research*

and Position Paper, A. Schiper, A. A. Shvartsman, H. Weatherspoon, and B. Y. Zhao, Eds., Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2584, *Springer*, Bologna, Italy, 87-92, 2003.

- [15].Chanchan Zhao Yuxing Wang, A New Classification Method on Information Fusion of Wireless Sensor Networks, in Proceedings of the *International IEEE Conference on Embedded Software and Systems Symposia (ICESC '08)*, 2008.
- [16].Minghu Zhang, Hui Song, Shjun Lu, Youfeng Li, Xiaojuan Yu, Jingyang Bao, Research on the Multi-sensors Information Fusion technique Based on the Neural Networks and its Application, in Proceedings of the *2nd International IEEE Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2009.
- [17].J. Kulik, W. Heinzelman and H. Balakrishnan, Negotiation-based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks, *Wireless Networks*, 8, 2/3, 2002, pp. 169-185.
- [18].N. H. Cohen A. Purakayastha, A. Turek J. L. Wong and D. Yeh, Challenges in flexible aggregation of pervasive data, IBM Research Report RC 21942 (98646), *IBM Division*, Yorktown Heights, NY January 2004.

2012 Copyright ©, International Frequency Sensor Association (IFSA). All rights reserved.
(<http://www.sensorsportal.com>)

Advertise in Sensors & Transducers Journal and Sensors Web Portal



TURN OUR VISITORS INTO YOUR CUSTOMERS BY THE SHORTEST WAY

http://www.sensorsportal.com/DOWNLOADS/Media_Kit_2012.pdf
sales@sensorsportal.com

Guide for Contributors

Aims and Scope

Sensors & Transducers Journal (ISSN 1726-5479) provides an advanced forum for the science and technology of physical, chemical sensors and biosensors. It publishes state-of-the-art reviews, regular research and application specific papers, short notes, letters to Editor and sensors related books reviews as well as academic, practical and commercial information of interest to its readership. Because of it is a peer reviewed international journal, papers rapidly published in *Sensors & Transducers Journal* will receive a very high publicity. The journal is published monthly as twelve issues per year by International Frequency Sensor Association (IFSA). In addition, some special sponsored and conference issues published annually. *Sensors & Transducers Journal* is indexed and abstracted very quickly by Chemical Abstracts, IndexCopernicus Journals Master List, Open J-Gate, Google Scholar, etc. Since 2011 the journal is covered and indexed (including a Scopus, Embase, Engineering Village and Reaxys) in Elsevier products.

Topics Covered

Contributions are invited on all aspects of research, development and application of the science and technology of sensors, transducers and sensor instrumentations. Topics include, but are not restricted to:

- Physical, chemical and biosensors;
- Digital, frequency, period, duty-cycle, time interval, PWM, pulse number output sensors and transducers;
- Theory, principles, effects, design, standardization and modeling;
- Smart sensors and systems;
- Sensor instrumentation;
- Virtual instruments;
- Sensors interfaces, buses and networks;
- Signal processing;
- Frequency (period, duty-cycle)-to-digital converters, ADC;
- Technologies and materials;
- Nanosensors;
- Microsystems;
- Applications.

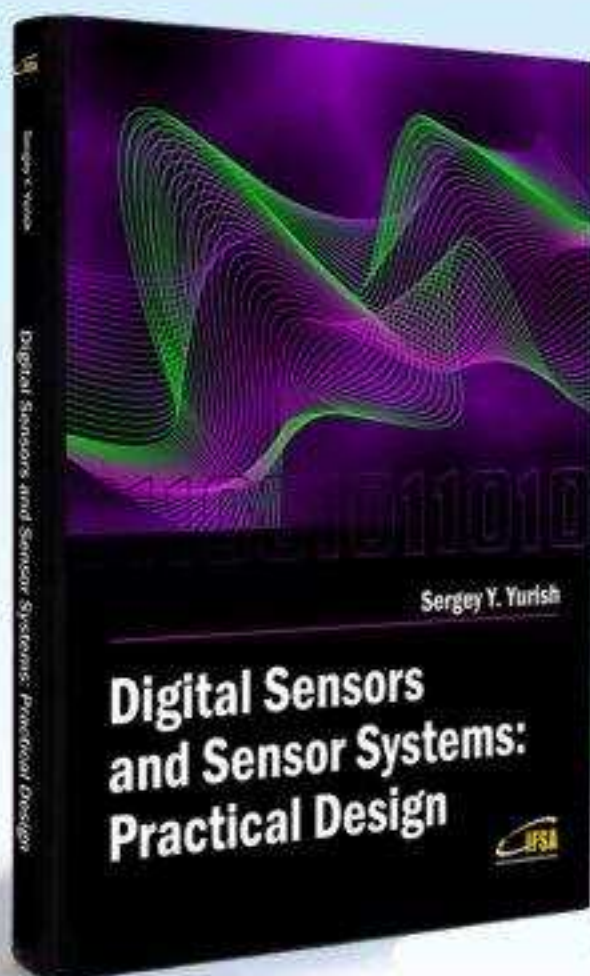
Submission of papers

Articles should be written in English. Authors are invited to submit by e-mail editor@sensorsportal.com 8-14 pages article (including abstract, illustrations (color or grayscale), photos and references) in both: MS Word (doc) and Acrobat (pdf) formats. Detailed preparation instructions, paper example and template of manuscript are available from the journal's webpage: <http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/Submission.htm> Authors must follow the instructions strictly when submitting their manuscripts.

Advertising Information

Advertising orders and enquires may be sent to sales@sensorsportal.com Please download also our media kit: http://www.sensorsportal.com/DOWNLOADS/Media_Kit_2012.pdf

Digital Sensors and Sensor Systems: Practical Design will greatly benefit undergraduate and at PhD students, engineers, scientists and researchers in both industry and academia. It is especially suited as a reference guide for practitioners, working for Original Equipment Manufacturers (OEM) electronics market (electronics/hardware), sensor industry, and using commercial-off-the-shelf components, as well as anyone facing new challenges in technologies, and those involved in the design and creation of new digital sensors and sensor systems, including smart and/or intelligent sensors for physical or chemical, electrical or non-electrical quantities.



"It is an outstanding and most completed practical guide about how to deal with frequency, period, duty-cycle, time interval, pulse width modulated, phase-shift and pulse number output sensors and transducers and quickly create various low-cost digital sensors and sensor systems ..." (from a review)

Order online:

http://www.sensorsportal.com/HTML/BOOKSTORE/Digital_Sensors.htm



www.sensorsportal.com