

Réduction des clusters singletons dans le protocole LEACH pour les réseaux de capteurs sans fil

Yaye M. Sarr, *Université de Thiès*, Bamba Guèye, *Université Cheikh Anta Diop*

et Cheikh Sarr, *Université de Thiès*

Abstract— LEACH est l'un des protocoles de routage hiérarchique les plus proéminents utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). La formation des clusters dans LEACH étant probabiliste, on retrouve dans le réseau des clusters de taille hétérogène et dans certains cas des clusters singleton i.e. avec un seul capteur. Ces singletons envoient directement leurs informations à la station de base, et par conséquent, ils consomment beaucoup d'énergie du fait de leur distance avec la station de base (BS). Cet article propose un protocole de routage hiérarchique basé sur LEACH appelé LEACH-based-SNCR qui réduit les clusters singleton en s'assurant d'équilibrer la consommation d'énergie entre les capteurs. Les simulations effectuées montrent que le protocole LEACH-based-SNCR prolonge la durée de vie du réseau de 15 % par rapport à LEACH.

Mots clés— LEACH, Protocole hiérarchique, cluster, Réseaux de capteurs, consommation d'énergie, Performances.

I. INTRODUCTION

LES récentes avancées technologiques dans le domaine des systèmes micro-électroniques et des communications sans fil ont permis le développement des capteurs. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) [1] sont considérés comme l'une des plus importantes technologies du 21^e siècle. Elles consistent en une multitude de capteurs répartis de manière aléatoire dans des zones souvent hostiles et/ou inaccessibles à l'homme. Ces capteurs collectent diverses informations sur l'environnement physique ou environnemental et les transmettent à une station de base distante via des communications sans fil. Les réseaux de capteurs trouvent leur application dans la surveillance (feu de forêts, mesures météorologiques, contrôle de la qualité de l'air), les objets connectés etc.

Les capteurs, appelés aussi nœuds dans la suite du document, se caractérisent par leur petite taille, leur énergie limitée et leur faible capacité de calcul. L'épuisement de la batterie entraîne « la mort » du capteur. De ce fait l'un des grands défis dans les RCSF est d'économiser au mieux la batterie afin de prolonger la durée de vie du réseau.

Ainsi, ces dernières années les recherches se sont penchées

sur des protocoles de routage visant à acheminer les informations capturées vers la BS en consommant le moins d'énergie et ainsi prolonger la durée de vie des RCSF. Parmi elles, on peut citer LEACH [2], PEGASIS [3], TEEN [4]. Proposée par Heinzelman et al., LEACH est l'un des plus célèbres protocoles de routage pour RCSF. C'est un protocole de routage hiérarchique basé sur la formation de cluster (groupe). Ce papier propose une amélioration de LEACH avec de meilleures performances en termes de consommation d'énergie et de durée de vie des réseaux de capteurs.

La section 2 présente un état de l'art sur les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs. La section 3 montre l'impact des nœuds singleton sur la consommation d'énergie dans LEACH. La section 4 décrit notre protocole LEACH-based-SNCR et présente les résultats des simulations. Enfin, la section 5 conclut ce travail et présente les travaux futurs.

II. ETAT DE L'ART DU ROUTAGE DANS LES RCSF

L'objectif de tout protocole de routage est d'acheminer des informations d'une source vers une destination de manière efficace [10]. La contrainte majeure dans le routage dans les RCSF est de router les informations capturées en minimisant la consommation d'énergie des nœuds. Plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans la littérature.

A. Les protocoles de routage hiérarchiques dans les RCSF

L'approche utilisée par les protocoles hiérarchiques basés sur les clusters est de regrouper les nœuds du réseau en clusters. Un nœud est élu cluster-head ou chef de groupe. Son rôle est de collecter les informations capturées par ses membres et les acheminer à la station de base (Fig. 1). LEACH, TEEN sont des exemples de protocoles hiérarchiques basés sur les clusters.

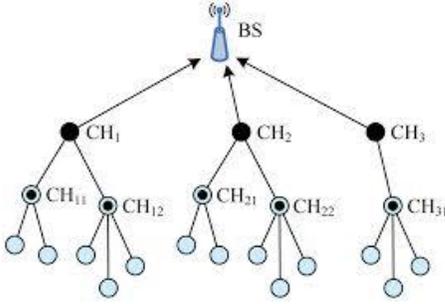


Fig. 1 : Protocoles de routage hiérarchiques

L'avantage de ce type de protocole est qu'ils acheminent plus rapidement les données réduisant ainsi le temps de latence par rapport à une approche multi-saut [2].

B. Le protocole LEACH et ses protocoles dérivés

LEACH choisit aléatoirement des nœuds dans le réseau et leur attribue le rôle de cluster-head. Par la suite d'autres nœuds rejoignent les cluster-heads et forment ainsi les clusters. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les cluster-heads agrègent les données capturées par les autres nœuds du cluster en un seul paquet et l'envoient à la station de base.

LEACH s'exécute en deux grandes phases : la phase de configuration, « set-up phase » et la phase de transmission « steady-phase ». Lors de la phase de configuration, les nœuds cluster-head sont élus et les clusters sont formés. L'élection des cluster-heads se déroule comme suit : chaque nœud choisit un nombre de manière aléatoire entre 0 et 1. Si cette valeur est inférieure à un seuil $T(n)$ le nœud devient cluster-head. Le seuil est défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times r \bmod \left(\frac{1}{p}\right)} & \text{sin } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où p est le pourcentage de clusters souhaité, r est le round courant, G représente l'ensemble des nœuds qui n'ont pas encore élu cluster-head sur les $\frac{1}{p}$ derniers rounds.

Une fois les cluster-heads élus et les clusters formés, on passe à la phase de transmission.

Lors de la phase de transmission les nœuds envoient leurs données au cluster-head du cluster auquel ils appartiennent, ensuite le cluster-head agrège toutes les données et envoie le paquet de données à la station de base. Au début de la « steady phase », un ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access) permet d'assigner à chaque nœud un slot de temps pour la transmission de ses données. Dans le souci d'économiser l'énergie, les nœuds simples i.e. qui ne sont pas cluster-head sont actifs uniquement durant leur temps de transmission, le reste du temps ils mettent leur radio en veille.

Le cluster-head par contre est tout le temps actif pour recevoir les données des autres membres du cluster. A la fin du round (tour), on démarre un autre round avec une nouvelle « set-up phase ». Les nœuds qui étaient cluster-head durant le round précédent ne peuvent pas être réélus de nouveau.

Nous utilisons le même modèle de consommation d'énergie pour les transmissions dans fil que celle décrite dans [10]. Considérons un nœud qui souhaite transmettre un message de k -bit sur une distance d , le modèle de consommation est le suivant :

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec}(k) + E_{TX-amp}(k, d) = \begin{cases} k * E_{elec} + k * \epsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ k * E_{elec} + k * \epsilon_{amp} * d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

Pour le nœud qui reçoit le k -bit message, la consommation d'énergie est :

$$E_{RX}(k) = k * E_{elec} \quad (2)$$

E_{elec} étant l'énergie consommé par le circuit émetteur et récepteur. Dans l'équation 1 si la distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur est inférieur au seuil d_0 on utilise le modèle free space sinon on utilise le modèle multi-path. ϵ_{fs} et ϵ_{amp} représentent les amplificateurs de transmission.

Par la suite, plusieurs améliorations de LEACH ont été proposées notamment LEACH-C [5], LEACH-V [6], LEACH-R [7], LEACH-M [8] etc. Cependant un problème commun à tous ces protocoles demeure : l'hétérogénéité des clusters. En effet, comme l'algorithme de formation de cluster est probabiliste, on a des clusters de taille différente. Il peut y avoir dans le même réseau des « gros » et des « petits » clusters. Dans certains cas, il peut y avoir des clusters singletons i.e. composés d'un seul nœud qui est le cluster-head. Les singletons envoient directement leurs données à la station de base ce qui peut épuiser rapidement la batterie.

III. IMPACT DES NŒUDS SINGLETON SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DE LEACH

Durant la « set up phase » de LEACH, les nœuds sont regroupés en clusters de manière aléatoire. Dans certains cas il peut y avoir des clusters avec un seul nœud ce sont des clusters singletons. Les singletons sont contraints d'envoyer directement leurs informations à la station de base durant tout le round. Plus la station de base est distante plus la consommation en énergie du nœud est élevé. Pour avoir une idée de la consommation moyenne d'énergie des singletons nous avons simulé un réseau de capteur et avons exécuté le protocole LEACH. Nous avons recueilli la consommation d'énergie de tous les nœuds et établi une comparaison entre la consommation d'énergie des cluster-heads, des singletons et des nœuds simples qui sont les membres des clusters. Le modèle de consommation d'énergie utilisé est le même que dans le protocole LEACH.

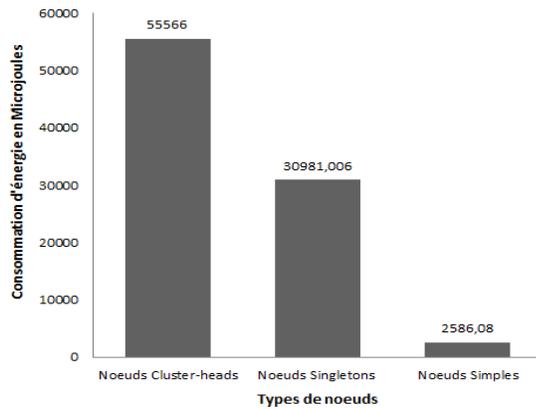
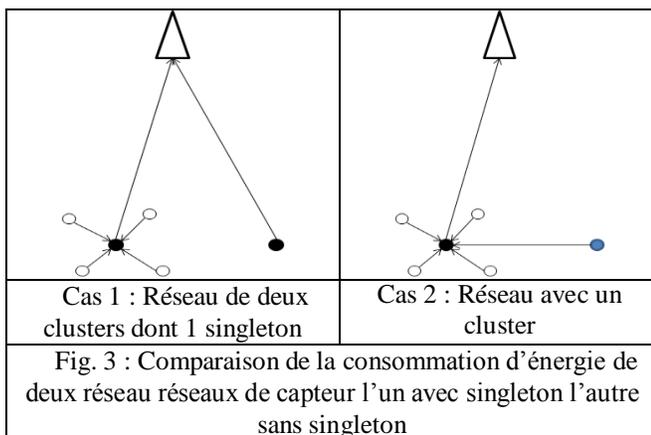


Fig.2 : Comparaison de la consommation d'énergie moyenne des cluster-heads, des singletons et des noeuds simples

La Fig.2 présente la consommation d'énergie moyenne des noeuds singletons par rapport aux cluster-heads et aux noeuds simples. Les résultats de simulations montrent que le noeud singleton consomme en moyenne 10 fois plus que le noeud simple car ils envoient directement leurs données à la station de base, restent tout le temps éveillé tandis que les noeuds simples envoient sur des distances plus réduites (au cluster-head), ne sont éveillés que lors de leur temps de transmission alloué et se mettent en veille le reste du temps. Les CHs (Cluster-Heads) par contre consomment 1,7% fois plus que les noeuds singletons à cause de la collecte des informations des membres du cluster et de leur agrégation qui consomment de l'énergie en plus.

Pour illustrer les résultats précédents, considérons le réseau simplifié suivant composé de 6 noeuds. Le modèle de consommation d'énergie est le même que dans LEACH [2]. Dans un des rounds, le réseau contient deux clusters, un cluster composé de 5 noeuds et un cluster singleton comme indiqué sur la Fig.3. On calcule la consommation d'énergie globale du réseau dans le cas où le cluster envoie directement à la station de base et dans le cas où le singleton est intégré dans le cluster existant et on compare analytiquement la consommation d'énergie.



Soient NRG1 et NRG2 la consommation globale d'énergie du réseau dans les cas 1 et 2 de la Fig.3, l la longueur des paquets:

$$NRG1 = NRG_{cluster} + NRG_{singleton}$$

$$NRG1 = NRG_{simple} + NRG_{ch} + NRG_{singleton}$$

$$NRG2 = NRG_{simple} + NRG_{ch2}$$

Posons $diff$, la différence entre NRG1 et NRG2

$$diff = NRG1 - NRG2 \quad (1)$$

En développant et réduisant l'équation 1 et en supposant que la taille l'énergie consommé par les cluster-heads dans les deux cas est quasiment la même on obtient l'expression suivante :

$$diff = l(\epsilon_{amp} d_{toBS}^4 - E_{elec} + E_{DA})$$

Où E_{elec} est l'énergie dissipé par unité d'information transmise ou reçu, $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ E_{DA} est l'énergie dissipé par le cluster-head pour agréger les données et ϵ_{amp} est l'énergie dissipé par unité d'information et de longueur $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$. d_{toBS} est la distance du cluster-head à la BS.

Quelque soit la distance d_{toBS} supérieure à 10m $diff$ est positif d'où NRG1 est plus grand que NRG2 par conséquent le protocole LEACH consomme moins d'énergie lorsqu'on élimine les clusters singletons. Cette condition est toujours vraie puisqu'on suppose que la distance entre la BS et les capteurs est d'au moins 75m.

Les résultats de la section précédente montrent que les clusters singletons consomment inutilement de l'énergie en envoyant directement leurs informations à la BS. LEACH-based-SNCR résout ce problème en intégrant le noeud singleton dans un autre cluster et réduit ainsi la consommation d'énergie. Lorsque le singleton rejoint un cluster, il devient un noeud simple et sa consommation diminue puisqu'il envoie ses informations sur une distance plus réduite.

Ainsi nous avons mis en place le protocole LEACH-based-SNCR qui utilise le mécanisme SNCR (Single Node Cluster Reduction) [15]. L'idée est de détecter au début de chaque round tous les clusters singletons et de les intégrer dans d'autres clusters en veillant à une répartition équilibrée de l'énergie.

A. Aperçu du mécanisme Single-Node Cluster Reduction (SNCR)

Le SNCR décrit dans [9] permet de réduire les noeuds singletons dans les réseaux de capteur sans fil. L'algorithme fonctionne comme suit : les cluster-head initialisent une minuterie appelé WT (Wait Time) qui est inversement proportionnel à son degré de connectivité. À l'expiration de la minuterie WT, le cluster-head informe son voisinage en leur envoyant un message «CH_INFORM_MSG». Ensuite les noeuds simples qui reçoivent le message choisissent le destinataire du message comme cluster-head tandis que les cluster-heads le stockent dans une liste « SRC_INFORM_MSG ». Enfin un singleton se reconnaît par

le fait que son message «CH_INFORM_MSG» n'est pas transmis. Une telle cluster-head inspecte alors sa liste «SRC_INFORM_MSG». Si la liste n'est pas vide, il choisit le premier nœud de la liste comme CH.

Après l'exécution de ces étapes, les singletons rejoignent d'autres clusters. Nous nous sommes inspirés de cette méthode pour améliorer le protocole de LEACH afin d'augmenter la durée de vie des capteurs dans le réseau. Le nouveau protocole LEACH-based-SNCR est décrit à la section suivante.

IV. LEACH-BASED-SNCR

Nous faisons les mêmes suppositions que dans [7] à savoir que :

- Les nœuds sont uniformément répartis sur la zone de captage.
- Les nœuds et la station de base sont fixes.
- Tous les nœuds peuvent communiquer directement avec la station de base.
- Les capteurs envoient à des débits fixes et ont toujours des données à transmettre à la BS.
- La communication est symétrique.

Nous utilisons la technique décrite par le SNCR pour réduire les clusters singletons dans LEACH. Nous travaillons avec la version centralisée de LEACH appelé LEACH-C où la BS s'occupe de créer les clusters et informer les capteurs de leur statut. Ce choix se justifie par le fait que la BS a une plus grande puissance de calcul, cela évite l'émission de paquets de contrôle.

Dans le protocole LEACH-C, chaque nœud envoie ses informations : position et niveau d'énergie, à la BS. Cette dernière se charge de former les clusters en suivant les mêmes étapes que dans la version LEACH distribué. Une fois les clusters déterminés, la BS envoie à chaque nœud son statut et le cluster auquel il appartient.

L'idée principale est de transformer les clusters singletons en nœuds simples en les intégrant dans un cluster existant. Dans le protocole LEACH-based-SNCR, la BS vérifie le nombre de capteurs par cluster et s'il détecte un cluster singleton il l'affecte au cluster le plus proche. Ensuite il envoie les informations aux capteurs. Ainsi les clusters singletons sont éliminés. LEACH centralisé permet de mieux maîtriser les topologies et la formation des clusters dans les réseaux de capteurs.

V. EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus avec LEACH et LEACH-based-SNCR.

A. Conditions de simulations

Les simulations sont effectuées sous Omnet++. Le réseau contient 100 nœuds répartis sur une surface de 100 m x 100 m. Les nœuds ont une énergie initiale de 0.5J. La distance minimale entre un nœud et la station de base est de 75m. On exécute la simulation 1000 fois pour avoir des résultats

fiables. La Table 1 résume les conditions de simulations.

Simulateur	Omnet++
Nombre de nœuds	100
Surface	100m x100m
% de cluster par rapport au nombre de nœuds	5%
Energie initiale des nœuds	0,5 J
Nombre de simulation	1000
Distance minimale entre BS et les nœuds	75m

Table 1 : Conditions de simulations

B. Comparaison de LEACH-based-SNCR et LEACH

Les conditions de simulations sont les mêmes que celles décrites plus haut dans le Table 1. Dans cette section nous faisons une comparaison détaillée de LEACH et LEACH-based-SNCR. On utilise la moyenne de simulations effectuées pour produire ces résultats.

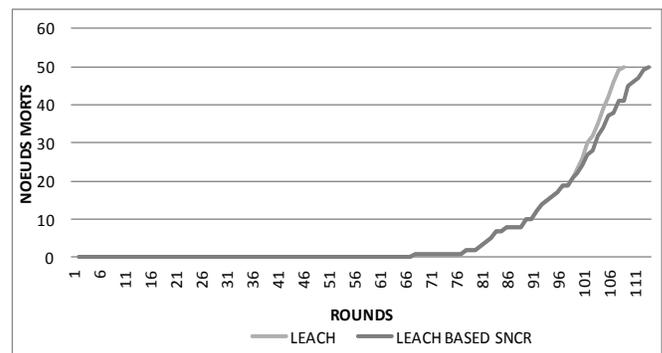


Fig 4 : Nombre de nœuds morts en fonction des rounds

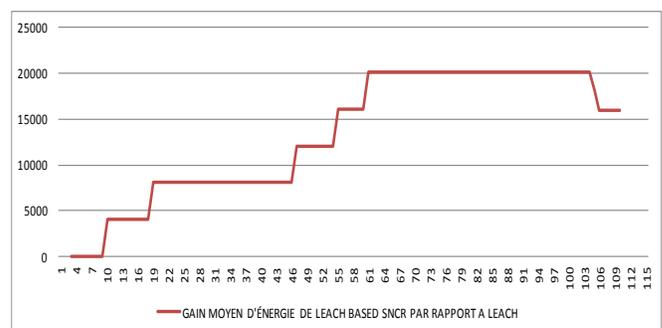


Fig 5 : Gain d'énergie de LEACH-based-SNCR par rapport à LEACH en fonction des rounds

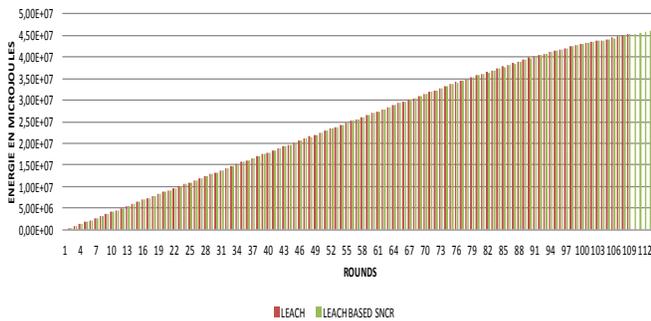


Fig 6 : Consommation d'énergie en fonction des rounds

La Fig.4 représente le nombre total de nœuds « morts » dans le réseau avec les protocoles LEACH et LEACH-based-SNCR. Cette figure montre que dans les deux protocoles, les capteurs s'épuisent au même rythme jusqu'au round 90. Vers le 100ème round, on remarque que le nombre de nœuds morts dans LEACH est supérieur à celui de LEACH-based-SNCR et que la simulation s'arrête en moyenne au round 109 pour LEACH et 117 pour LEACH-based-SNCR soit une prolongation de durée de vie de 15%. On suppose que la simulation s'arrête lorsque plus de 50% des capteurs meurent.

La Fig.6 donne la consommation globale du réseau à chaque round. Leur consommation est quasi similaire mais on se rend compte que LEACH-based-SNCR a une durée de vie plus élevée que LEACH.

Afin de mieux souligner la différence de consommation d'énergie la Fig. 5 nous montre la différence de consommation d'énergie entre LEACH et LEACH-based-SNCR en fonction du round. Nous remarquons que ce gain d'énergie est plus notable entre les rounds 64 et 100. Cela est dû au fait qu'à ce stade le nombre de nœuds vivants diminue et la probabilité d'avoir des singletons augmente. En intégrant ces singletons dans des clusters existants, les transformant ainsi en nœud simple, la consommation d'énergie globale du réseau diminue.

L'énergie initiale disponible dans le réseau est de 50J soit 0,5J par nœud. Les capteurs consomment de l'énergie lors des envois et réceptions. Les simulations s'arrêtent lorsque le nombre de nœud morts atteint 50%. L'énergie résiduelle du réseau est l'énergie totale restante des 50% des autres nœuds vivants. Les résultats des montrent que l'énergie résiduelle de LEACH-based-SNCR est inférieur à celle de LEACH de 32 % car LEACH-based-SNCR répartit de manière plus uniforme la consommation d'énergie ce qui montre que LEACH-based-SNCR exploite mieux le réseau ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

LEACH est un protocole probabiliste qui forme aléatoirement des clusters. Dans certains cas, LEACH génère des clusters singletons. Ces singletons envoient directement les informations collectées à la BS distante. Ces transmissions directes vers la BS consomment beaucoup d'énergie.

Le protocole centralisé LEACH-based-SNCR que nous avons proposé, résout le problème des nœuds singletons sans générer de surcharge de paquets de contrôle. La réduction des singletons dans le protocole LEACH prolonge la durée de vie des réseaux et économise l'énergie globale du réseau.

REFERENCES

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, *Wireless sensor networks: a survey*, Computer Networks, Volume 38, Issue 4, 15 March 2002, Pages 393-422, ISSN 1389-1286.
- [2] Heinzelman, W.R.; Chandrakasan, A.; Balakrishnan, H., "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*, vol., no., pp.10 pp. vol.2., 4-7 Jan. 2000.
- [3] Lindsey, S.; Raghavendra, C.S., "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE*, vol.3, no., pp.3-1125,3-1130 vol.3, 2002.
- [4] Manjeshwar, Arati, and Dharma P. Agrawal. "TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks." *Parallel and Distributed Processing Symposium, International*. Vol. 3. IEEE Computer Society, 2001.
- [5] Heinzelman, Wendi B., Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 1.4 (2002): 660-670.
- [6] Ahlwat, Asha, and Vineeta Malik. "An extended vice-cluster selection approach to improve V LEACH protocol in WSN." *Advanced Computing and Communication Technologies (ACCT), 2013 Third International Conference on*. IEEE, 2013.
- [7] Li, Yong-Zhen, Ai-Li Zhang, and Yu-Zhu Liang. "Improvement of Leach Protocol for Wireless Sensor Networks." *Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2013 Third International Conference on*. IEEE, 2013.
- [8] LEACH-M. V. Mhatre and C. Rosenberg, "Homogeneous vs heterogeneous clustered sensor networks: a comparative study", *Communications, International Conference on*, 6, 2004 IEEE,
- [9] Diallo, Cherif, Michel Marot, and Monique Becker. "Single-node cluster reduction in wsn and energy-efficiency during cluster formation." *Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net), 2010 The 9th IFIP Annual Mediterranean*. IEEE, 2010.
- [10] Frey, Hannes, Stefan Rührup, and Ivan Stojmenović. "Routing in wireless sensor networks." *Guide to Wireless Sensor Networks*. Springer London, 2009. 81-111.