

## Étude aérodynamique des voyelles nasales du français (Voyelles réalisées par des natifs et des apprenants jordaniens)

Ahmad Nawafleh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département des langues européennes-Université Mutah-Jordanie

<sup>1</sup>Corresponding author, E-mail: anawafleh@yahoo.com

### RÉSUMÉ

Cette étude aboutit à mettre en relief l'application de la phonétique expérimentale à la didactique de la prononciation des voyelles dans le cadre du français langue étrangère. Une prononciation correcte des voyelles nasales du français nécessite une bonne maîtrise des comportements vélaire et une manipulation convenable des articulateurs buccaux permettant de différencier les voyelles entre elles. Notre étude compare les caractéristiques aérodynamiques des voyelles nasales françaises /ã ã õ/ réalisées par 4 locuteurs français et 4 apprenants jordaniens.

Le corpus est constitué de mots contenant les voyelles placées dans des phrases faisant sens. Les contextes consonantiques concernés dans cette étude sont /t k b d/ pour les contextes précédant les voyelles nasales, et /p t k b f s ʃ ʒ l/ suivant les voyelles. Les données aérodynamiques et le signal acoustique ont été recueillis simultanément au moyen du poste Eva2.

Les résultats portant sur les mesures temporelles du débit d'air nasal indiquent que les apprenants jordaniens synchronisent différemment l'arrivée et la propagation du débit nasal par rapport au début et à la fin acoustiques des voyelles. Les mesures quantitatives démontrent une variabilité dans la réalisation des natifs et une instabilité certaine dans la performance des apprenants.

**Mots clés :** étude aérodynamique, voyelles nasales, apprenants jordaniens, apprentissage phonétique, didactique de la prononciation, nasalité en français.

### 1. Introduction

Le système phonologique français se marque par la présence de la nasalité vocalique qui y joue un rôle distinctif permettant de contraster entre voyelles nasales et voyelles orales. Cette fonction distinctive n'est pas si courante dans les langues du monde. Beaucoup de langues en sont dépourvues ; c'est, par exemple, le cas de la langue arabe. Jakobson [22] renvoie cette rareté à l'articulation complexe des voyelles nasales. Il explique que la réalisation des voyelles nasales exige une double ouverture du conduit vocal (oral et nasal) permettant de modifier la qualité vocalique alors que les consonnes nasales sont articulées avec une ouverture simple (conduit nasal) et par conséquent sont plus fréquentes dans les langues.

Les difficultés de produire la nasalité vocalique pourraient se multiplier quand il s'agit des voyelles nasales du français standard. La réalisation de ces voyelles nécessite une grande maîtrise de la synchronisation entre les mouvements de la langue et celle du voile du palais (Fouché [19], Straka [29], Amelot [1]). D'après ces auteurs cette synchronisation est primordiale afin de produire des voyelles pures, non diphtonguées, non suivies d'un segment nasal consonantique audible. La nasalité vocalique en français standard pourrait, ainsi, la rendre difficilement maîtrisable par les apprenants souhaitant avoir une bonne prononciation de cette langue (Montagu [25], Detey et al. [17], Brkan et al. [10]).

Ainsi, nous pouvons nous attendre à ce que les locuteurs arabophones, éventuellement jordaniens, apprenant le français rencontrent des sérieuses difficultés à reproduire convenablement les voyelles nasales françaises. Ces difficultés attendues des apprenants jordaniens ne seraient pas dues uniquement à l'absence de la nasalité vocalique de leur inventaire phonétique mais également à la spécificité de l'articulation de voyelles nasales du français. Celle-ci requiert une bonne manipulation et une synchronisation convenable des différents articulateurs (langue, lèvres, voile du palais) afin de différencier les voyelles nasales entre elles. En tant que phonéticien et enseignant du français à un public arabophone jordanien, il importe alors de nous interroger sur la capacité des apprenants jordaniens à articuler les voyelles nasales du français de manière semblable à celle des natifs.

Nous allons examiner dans cette présente étude la production des voyelles nasales du français par des apprenants de niveau avancé suivant leurs études supérieures en France, et cela en comparaison avec la production des mêmes voyelles par des locuteurs français natifs. Nous allons vérifier si les apprenants ont vraiment des difficultés à réaliser les voyelles nasales et voir, dans l'affirmative, la voyelle qui persiste à leur poser des problèmes.

Nous nous attacherons, tout d'abord, à analyser les données aérodynamiques, recueillies au moyen du système d'Évaluation Vocale Assistée EVA2 (Ghio et Teston [20]), portant sur les mesures temporelles. Ensuite, nous exposerons les résultats de l'analyse de la quantité des débits d'air nasal et oral.

Enfin, il est à noter que dans une recherche précédente portant sur la nasalité vocalique contextuelle (corpus des phrases) publiée en 2013 (Nawafleh [27]), nous avons exposé les résultats des voyelles dans tous les contextes consonantiques pris ensemble sans pouvoir, faute de temps, exposer ni détailler l'effet de différents groupes consonantiques de manière séparée. Dans cet article, nous avons opté pour une exploitation fine des mesures temporelles et quantitatives des voyelles nasales au contexte des occlusives, notamment les occlusives sourdes /t k/ et les occlusives sonores /b d/. Nous avons exclu les occlusives /p/ et /g/ car /p/ pourrait tendre vers l'occlusive voisée /b/: chez certains locuteurs jordaniens et l'occlusive /g/ pourrait, parfois, être produite en tant que l'occlusive dévoisée /q/ ou être pharyngalisée.

## 2. Protocole Expérimental

### 2.1. Corpus

Le corpus de cette recherche est constitué de mots contenant les voyelles nasales /ã ã ã/ et insérés dans des phrases porteuses de sens. Il s'agit de 10 répétitions de la voyelle /ã/, 8 répétitions de la voyelle /ã/ et 14 répétitions de la voyelle /ã/ pour chaque locuteur, soit 254 occurrences analysées pour les huit locuteurs. Nous avons exclu deux occurrences d'un locuteur jordanien parce qu'il n'y avait pas de retour du débit d'air nasal à la ligne de base. Le mot cible de chaque phrase contient une seule voyelle nasale précédée et suivie d'au moins deux segments oraux afin d'éviter le phénomène d'harmonie vocalique ou une importante propagation régressive ou progressive du débit d'air nasal. Les phrases du corpus ont été lues deux fois à débit normal par chaque locuteur.

### 2.2. Locuteurs

Nous avons enregistré 4 locuteurs français natifs (2 hommes et 2 femmes) parlant un français standard et ayant tous reçu de bonne formation en phonétique et en phonologie françaises, et 4 apprenants jordaniens de niveau avancé (3 hommes et une

femme). Les apprenants jordaniens avaient étudié le français pendant quatre années dans des universités jordaniennes et suivaient, lors des enregistrements, leurs études supérieures (master et doctorat) dans des universitaires françaises. Pour faciliter la reconnaissance des locuteurs nous avons choisi certaines abréviations composées : FR pour les locuteurs français et JR pour les locuteurs jordaniens, LM pour locuteur masculin et LF pour locuteur féminin, accompagnés de chiffres correspondant à l'ordre du locuteur. Par conséquent, LM-FR1 correspondra au premier locuteur français masculin et LF-FR3 correspondra au troisième locuteur français de sexe féminin.

### 2.3. Enregistrements

Les données des huit locuteurs ont été enregistrées dans la chambre sourde du laboratoire de phonétique et phonologie (LPP) de la Sorbonne Nouvelle (Paris3) et dans des conditions identiques pour les différents locuteurs. Pour recueillir les données aérodynamiques nous avons utilisé le système d'Évaluation Vocale Assistée (EVA2). Il est un poste non-invasif permettant de recueillir, à la fois, le débit d'air nasal (DAN) au moyen des tubes insérés au bout des narines, et le débit d'air buccal (DAB). Celui-ci est récupéré grâce à un masque en silicone souple dont nous pouvons choisir la taille pour l'adapter à l'anatomie du locuteur. Quant au signal acoustique (les sons sonores), il est enregistré au moyen d'un microphone intégré au système (Figure 1).

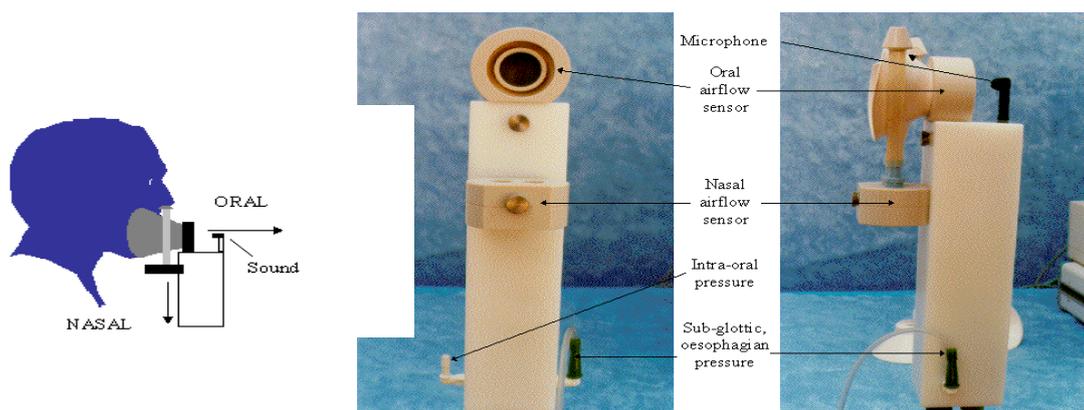


Figure 1 : illustration d'EVA2 à droite et position du sujet pendant l'enregistrement à gauche. Les flèches indiquent les capteurs des débits d'air (nasal et oral), de pression d'air et de signal acoustique (microphone). Empruntée au site : <http://www.sqlab.fr/evaSensFR.htm>.

### 2.4. Enregistrements du corpus et traitement des données

Le corpus a été segmenté de façon semi-automatique sous Praat (Boersma et Weenink [9]) via EasyAlign (une extension de Praat), puis vérifié manuellement en appuyant sur le signal acoustique et le spectrogramme des segments pour identifier le début et la fin acoustique des phonèmes.

### 2.5. Mesures

Nous avons eu recours au logiciel Matlab et à ses scripts pour visualiser les courbes aérodynamiques et pour effectuer des mesures temporelles et quantitatives portant sur les quantités des débits d'air. Pour effectuer des calculs statistiques et vérifier le degré de significativité des différents paramètres sur les résultats des locuteurs nous avons utilisé le logiciel Statview.

## 3. Résultats

Plusieurs mesures ont été effectuées, notamment d'ordre temporel et quantitatif pour souligner et décrire tout éventuel décalage dans la performance des apprenants par rapport à celle des locuteurs natifs. Nous commençons l'analyse des données par une exposition des mesures temporelles qui portent éventuellement sur le débit de la phonation, le décalage du débit d'air nasal et la propagation (*carry over*) du débit d'air nasal. Ensuite, nous nous pencherons sur l'analyse des données quantitatives qui concernent dans cette présente recherche les quantités des débits d'air nasal et oral recueillis pendant le production des voyelles nasales.

### 3.1. Mesures temporelles

#### 3.1.1. Débit de la phonation

Cette mesure aboutit à souligner la vitesse d'élocution (débit de la phonation) chez les différents locuteurs. Il s'agit des durées comprises entre le début et la fin acoustiques de chaque phrase.

Les résultats de cette mesure démontrent que le débit de la phonation varie significativement d'un locuteur à l'autre notamment chez les locuteurs natifs ( $P = 0,0130 < 0,05$ ). Chez les apprenants la différence ne se concrétise qu'entre le troisième locuteur (LM- JR3) et les trois autres. En effet, la performance du troisième locuteur se rapproche considérablement de la performance des locuteurs natifs alors que les autres apprenants (LM-JR1, LM-JR2 et LM-JR4) introduisent un débit très lent par rapport au débit enregistré pour les locuteurs natifs. La comparaison des résultats des natifs avec ceux des apprenants (Figure2) montre que les durées de phonation offertes par les locuteurs jordaniens sont plus longues que celles marquées par les natifs ( $F(1, 252) = 39,799$  ;  $P < 0,0001$ ). Chacun des locuteurs français présente une stratégie personnelle consistant à équilibrer temporairement les groupes rythmiques ce qui permettrait de présenter une meilleure expression. Le débit relativement lent des apprenants pourrait être dû à une hésitation ou à des soucis relatifs à la prononciation, c'est-à-dire, qu'ils prennent plus de temps afin de bien articuler les phrases proposées.

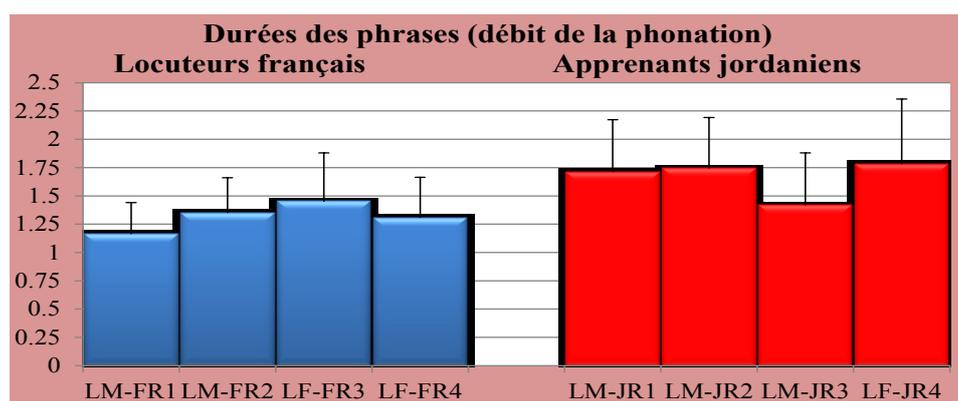


Figure 2 : représentations graphiques des durées et des écarts-types du débit de la phonation enregistrés pour les locuteurs natifs à gauche (en bleu) et les apprenants à droite (en rouge.).

Le débit de la phonation influence certainement les durées des phonèmes dont les voyelles nasales cibles. La comparaison des durées acoustiques des voyelles nasales réalisées par les deux groupes indiquent que celles prononcées par les apprenants sont significativement plus longues que celles produites par les locuteurs français ( $F(1,252) = 129,885$  ;  $P < 0,0001$ ). Les durées moyennes des voyelles sont de 0,136

ms dans la performance des locuteurs natifs contre 0,263 ms dans la réalisation des apprenants. Il en est de même pour la durée du débit d'air nasal ((F(1,252) = 49,897 ; P < 0,0001). Il s'agit de 0,202 ms chez les locuteurs français contre 0,258 ms chez les apprenants.

Il convient alors de nous interroger sur la localisation et la répartition du DAN par rapport au début et à la fin acoustique des voyelles.

**3.1.2. Décalage du débit d'air nasal**

Le décalage du DAN concerne ici le retard ou l'anticipation de l'arrivée du DAN par rapport au début acoustique des voyelles (Figure 3). Les données sont censées démontrer l'abaissement du voile du palais afin de synchroniser l'apparition du DAN avec le début acoustique des voyelles.

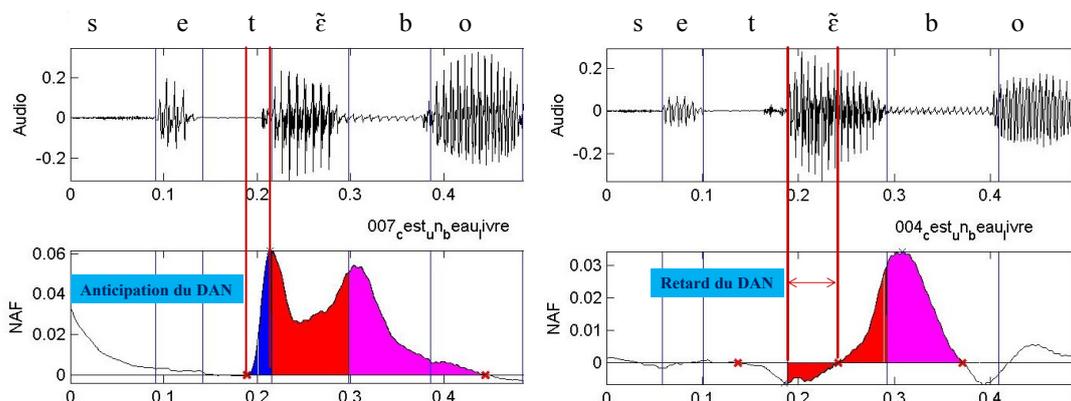


Figure 3 : illustration de la réalisation de la phrase « c'est un beau livre » prononcée par les locuteurs LM-FR1 à gauche et LM-JR3 à droite. La figure à gauche démontre l'anticipation du DAN (portion en bleu) et la figure de droite illustre le délai de l'arrivée du DAN.

Les résultats des apprenants jordaniens comparés à ceux marqués par les locuteurs natifs (Figure 4) indiquent que les apprenants introduisent un taux de retard significativement plus important que celui introduit par les natifs (F(1,252) = 8,351 ; P = 0,0042 < 0,05).

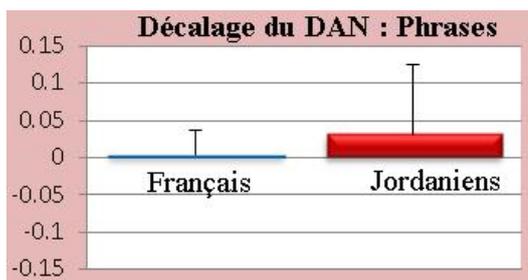


Tableau de moyennes pour Décalage du DAN  
Effet : Langue-maternelle

	Nombre	Moyenne	Dév. Std.	Err. Std.
Français	128	.004	.034	.003
Jordanien	126	.030	.095	.008

Figure 4 : Taux du décalage du DAN par rapport au début acoustique des voyelles nasales réalisées par 4 locuteurs français et 4 apprenants jordaniens.

Malgré une certaine variabilité que nous avons observée, les données aérodynamiques globales portant sur le décalage du DAN démontrent que l'articulation des locuteurs natifs consiste à synchroniser maximale l'arrivée du débit d'air nasal avec le début acoustique des voyelles. Dans leur réalisation, la production de la voyelle /ɔ̃/ favorise une légère anticipation du DAN par rapport aux deux autres voyelles /ã/ et /ẽ/. Cette tendance (Figure 5) a été décelée chez les 4 locuteurs natifs et pourrait être due à l'articulation postérieure de la voyelle /ɔ̃/.

En ce qui concerne les résultats des apprenants (Figure 5), nous avons noté une variabilité importante dans leurs données ( $P = 0,0207 > 0,05$ ) qui se matérialise par des écarts types très élevés. En effet, il en est de même pour la répartition du DAN en fonction des voyelles ( $P = 0,3939 > 0,05$ ). Mais, la comparaison de la répartition du décalage entre les deux publics, pour l'ensemble des voyelles permet de noter une certaine similarité. En effet, le test Anova à deux facteurs : langue/voyelles ne marque pas de différence significative entre les deux groupes ( $F(2,248) = 0,587$  ;  $P 0,5566 > 0,05$ ). La similarité se révèle par un ordre consistant, pour l'ensemble des données, à attribuer l'anticipation à la voyelle / $\tilde{\text{ɔ}}$ / puis à la voyelle / $\tilde{\text{ɑ}}$ / et ensuite à / $\tilde{\text{ɛ}}$ /. Cependant, Nous rappelons que les valeurs marquées par les apprenants se caractérisent par des écarts types assez élevés. Cela dévoile une variabilité dans la réalisation de certains apprenants.

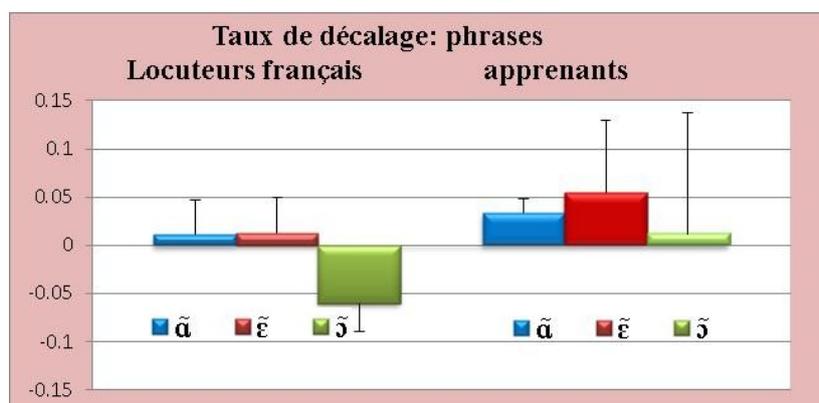


Figure 5 : représentations graphiques du décalage de DAN enregistrées pour les locuteurs français sur la figure de gauche et les apprenants jordaniens sur la figure de droite.

Or, le décalage du DAN est souvent considéré comme étant dépendant du facteur contexte précédant les voyelles nasales. À titre d'exemple, Ohala [28] suggère que la nasalisation des voyelles est moins compatible avec les fricatives voisées et les occlusives, notamment les sourdes. Il explique que la réalisation de ces segments nécessite une augmentation de la pression intra-orale, surtout pour les occlusives sourdes, afin d'arrêter le voisement en empêchant l'air d'échapper par la cavité nasale. L'augmentation de la pression intra-orale serait également indispensable au relâchement des occlusives.

Contrairement aux prédictions d'Ohala [28], les résultats (Figure 6) démontrent que chez les deux publics le contexte des occlusives sonores sollicite plus de retard que celui des occlusives sourdes et cela chez les deux publics. Ils sont, en revanche, en harmonie avec des résultats notés par Montagu [26] selon lesquels les occlusives sonores sont moins compatibles avec la nasalité et entraînent souvent du retard de l'arrivée du débit d'air nasal.

Enfin, les données des locuteurs natifs pour les deux contextes sont proches dans la mesure où le test Anova à deux facteurs langue/contextes consonantiques) ne démontre pas de différence significative ( $P = 0,1175 > 0,05$ ) tandis que les valeurs introduites par les apprenants révèlent une différence importante ( $F(1,124) = 7,962$  ;  $P = 0,0056 < 0,05$ ).

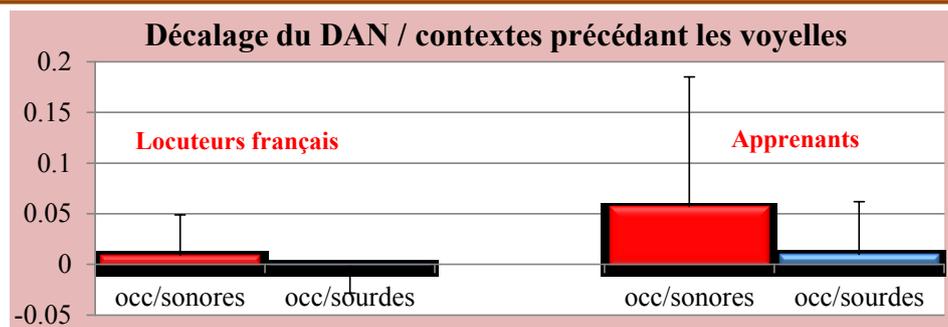


Figure 6 : Valeurs et écarts-types du taux du décalage enregistré, en fonction des contextes précédant les voyelles nasales, pour les locuteurs français à gauche et les apprenants jordaniens à droite.

### 3.1.3. Propagation du DAN

Cette mesure consiste à calculer l'étendue du DAN au-delà des voyelles nasales (Figure7). Normalement, le levator palatini, le principal muscle des mouvements du voile du palais, met plus de temps à s'abaisser qu'à se relever (Benguerel [7]). Par conséquent nous pouvons nous attendre à ce que les deux groupes de locuteurs introduisent un taux important de propagation.

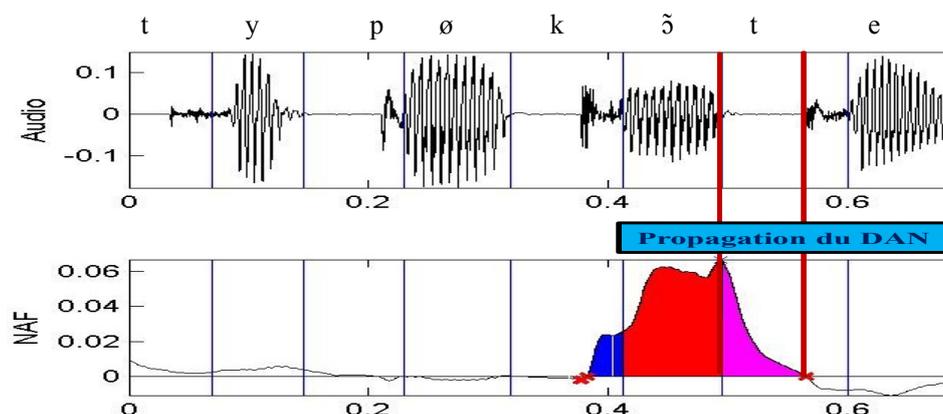


Figure 7 : extrait de la phrase « tu peux compter sur moi » prononcée par le locuteur LM-FR1 et illustrant éventuellement la propagation du DAN (la portion en violet), délimitée par les deux barres en rouge, par rapport au début acoustique de la voyelle /ã/.

Les résultats indiquent que le taux de propagation est effectivement plus important que celui d'anticipation. Les données des apprenants jordaniens comparées à celles des locuteurs français exposent que la propagation est significativement plus ample ( $P < 0,0001$ ), plus importante chez les apprenants jordaniens. Il s'agit de 0,127 ms dans les données des apprenants contre 0,98 ms chez les locuteurs natifs.

La répartition du taux de propagation, en fonction des voyelles, souligne que, pour l'ensemble des données, les deux publics introduisent le même schéma (Figure 8) où la voyelle /ẽ/ s'approprie le taux de propagation le plus élevé suivie de la voyelle /ã/ puis de la voyelle /õ/. Cet ordre est inverse de celui constaté dans la mesure précédente (le décalage du DAN), c'est-à-dire, la voyelle pour laquelle nous avons relevé un taux important du retard de l'arrivée du DAN se trouve éventuellement avec une durée importante de propagation. Aussi, importe-il d'examiner l'effet des contextes suivant les voyelles nasales sur la propagation de la nasalité.

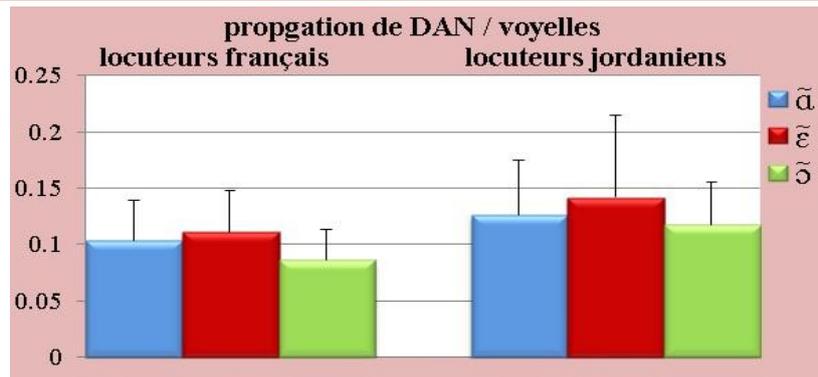


Figure 8 : valeurs et écarts-types de la propagation du DAN marqués pour les trois voyelles nasales par les 4 locuteurs français à gauche et le 4 apprenants jordaniens à droite.

L'effet des contextes consonantiques (Figure 9) sur l'étendue du DAN se révèle non significatif chez les apprenants ( $P = 0,1451 > 0,05$ ), tandis qu'il se montre très important selon les données des natifs ( $P = 0,0009 > 0,05$ ). En effet, chez les natifs, la durée de la propagation la plus longue est lorsque les voyelles sont suivies de la latérale /l/. Celle-ci est alors la plus transparente à la nasalité parmi les contextes. En revanche, les occlusives sourdes se révèlent les plus résistantes à la propagation du DAN. Chez les apprenants, la durée la plus importante se marque au contexte des occlusives sourdes et la durée la plus faible est enregistrée pour les voyelles au contexte des fricatives sonores. Il est à noter que les contextes qui ont présenté auparavant un retard de l'arrivée du DAN des voyelles nasales, présentent ici une propagation plus importante. Cela concerne, effectivement, le contexte des occlusives étant les seules précédant et suivant les voyelles cibles dans ce présent corpus.

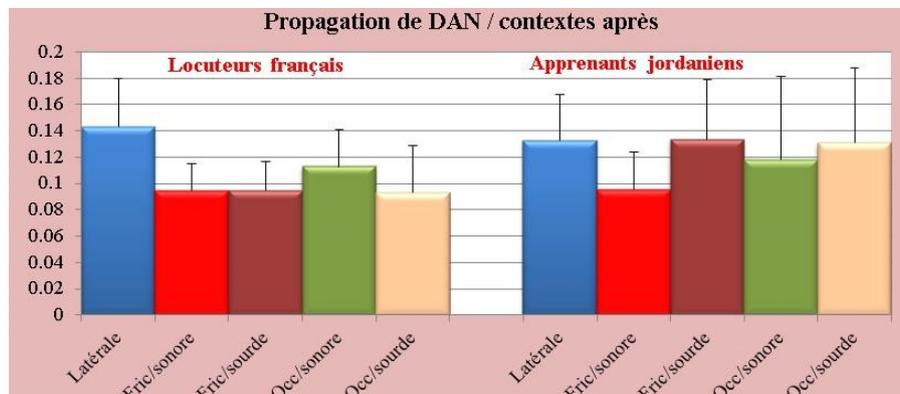


Figure 9 : Les valeurs et les écarts-types des durées de la propagation du DAN marqués par les deux groupes en fonction des contextes consonantiques.

Il convient de souligner que chez trois locuteurs français les contextes des sonores (occlusives et fricatives) motivent la propagation du DAN plus que les contextes des sourdes (occlusives et fricatives). Dans une étude aérodynamique précédente (Nawafleh [27]) nous avons noté que pour les voyelles à l'isolée l'arrivée du DAN n'implique pas un taux plus important de propagation. Mais, pour les voyelles nasales réalisées dans des logatomes dissyllabiques de type CVnCVn où les voyelles étaient immédiatement suivies des consonnes, les fricatives et occlusives sonores étaient plus transparentes à la propagation de la nasalité que les sourdes et, par conséquent, acquéraient une durée plus importante de DAN.

Les résultats des locuteurs natifs du français, concernant la propagation du DAN, confrontés à l'échelle de nasalité (Clements et Osu [11]), démontrent que les deux sont

généralement en parfaite synchronie sauf, éventuellement, pour le contexte des fricatives sourdes qui se montrent aussi transparent à la nasalité que celui des fricatives sonores.

Les résultats sont également en harmonie avec les recherches de Benguerel [6], Cohn [12] et Delvaux [14] qui ont expliqué que les occlusives sourdes seraient plus résistantes, plus opaques à la propagation de la nasalité que dans les autres contextes. À titre d'exemple, Benguerel [6] a noté que la fermeture du port vélopharyngal était plus rapide pour les voyelles nasales suivies des occlusives et relativement plus lent pour les voyelles suivies des fricatives. Cela serait nécessaire afin de maintenir une forte pression intra-orale durant l'occlusion et de préparer le relâchement.

En ce qui concerne les données des apprenants, la différence par rapport aux données des locuteurs natifs nous a amené à calculer les durées des phonèmes suivant les voyelles nasales. En effet, il est possible que le port vélopharyngal reste ouvert quand la durée de la consonne suivant la voyelle nasale est importante ou quand il y a une légère pause insérée après les voyelles nasales et remonte, après une certaine durée, pour préparer la réalisation de la consonne suivant les voyelles (Bell-Berti [5], Benguerel [8] et Vaissière [31]).

Les résultats portant sur les durée moyennes des phonèmes suivant les voyelles nasales (Figure 10) démontrent que, chez les apprenants, les durées moyennes des contextes suivant les voyelles nasales pourront avoir une influence sur la propagation du DAN dans la mesure où plus la durée des phonèmes suivant les voyelles nasales est importante plus le taux de propagation est susceptible de s'amplifier. Cela est flagrant notamment dans les contextes des occlusives et des fricatives, alors que le contexte de la latérale qui présente une faible durée de la propagation se montre plus ample. Les données des locuteurs natifs, quant à elles, présentent des durées significativement plus courtes que celles offertes par les apprenants ( $P < 0,0001$ ). Chez les natifs, les occlusives sonores et sourdes présentent des durées similaires mais la propagation est plus ample au contexte des occlusives sonores. Au contexte des fricatives, les fricatives sourdes se présentent avec des durées plus importantes que le contexte des fricatives sonores, mais le taux de propagation offre des valeurs similaires. Enfin, le contexte de la latérale qui présente la durée la plus faible se trouve avec un taux important de propagation du DAN. Ces données-là suggèrent que la durée des phonèmes suivant les voyelles nasales n'est pas le seul facteur dominant la propagation du DAN. Le mode d'articulation (latéral, fricatif, occlusif, voisé ou non voisé...etc) devrait intervenir pour motiver ou restreindre la propagation de DAN.

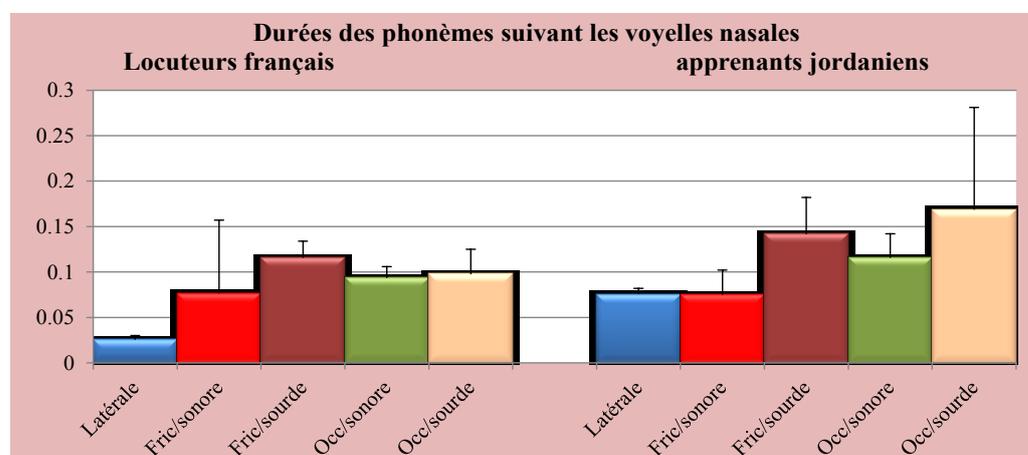


Figure 10 : Durées des contextes consonantiques suivant les voyelles nasales enregistrés pour les locuteurs natifs à gauche et les apprenants jordaniens à droite.

*En resumé, les mesures temporelles indiquent que les apprenants jordaniens ne maîtrisent pas suffisamment les activités du voile du palais au même titre que les locuteurs natifs. Les apprenants présentent des taux de retard et de propagation plus importants que ceux enregistrés pour les locuteurs natifs. Ils introduisent également des durées plus importantes pour les voyelles nasales et pour le débit de la phonation que les natifs.*

Après avoir analysé les mesures temporelles, il importe éventuellement de démontrer comment les différents locuteurs distribuent la quantité du DAN sur les voyelles nasales.

### 3.2. Quantité du Débit d'Air Nasal Proportionnel

Cette mesure consiste à calculer la quantité du débit d'air nasal positif par rapport à l'ensemble des débits d'air nasal et buccal émis pour la réalisation des voyelles nasales (Figure 11). Ainsi, nous adoptons, pour cette étude, la formule :  $DAN / (DAN + DAB)$  suivant, entre autres, les propositions de Dalston [13] et de Krakow et Huffman [23]. Nous allons désormais utiliser l'abréviation DANP (Débit d'Air Nasal Proportionnel) pour exprimer la quantité proportionnelle de débit d'air nasal (DAN) par rapport à l'ensemble des débits d'air. Cette formule permet de contrôler l'effet de modifications potentielles sur l'ensemble des débits d'air durant la production des voyelles nasales. Toutefois, la quantité du DAN pourrait généralement s'affecter par le degré d'ouverture du port vélopharyngal et par les configurations du conduit oral telles que la position de la langue et celle des lèvres (Krakow et Huffman [23] et Baken [3]).

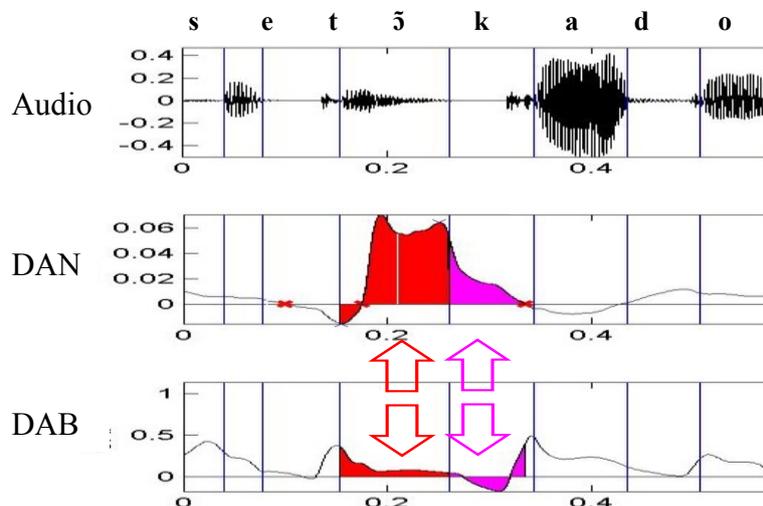


Figure 11 : schéma aérodynamique des débits d'air et du signal acoustique. En haut, le signal acoustique, au milieu le débit d'air nasal et en bas le débit d'air buccal. Les flèches indiquent les portions concernées par la mesure du DANP. Le schéma est extrait de la phrase « c'est ton cadeau d'anniversaire. ».

Les résultats portant sur la quantité du DANP des différents locuteurs, pour les trois voyelles nasales, suggèrent que la quantité du débit nasal diffère considérablement d'un locuteur à l'autre. En effet, cette quantité du DAN qu'on recueille à la sortie des narines est naturellement tributaire de l'anatomie intrinsèque du conduit nasal (longueur du conduit nasal, forme des narines...etc.) qui est fixe chez un sujet, mais qui diffère d'un sujet à l'autre (Fant [18], Lonchamp [24], Demolin [16] et Amelot et

al. [2]). Le débit d'air nasal dépend également du degré d'aperture du port vélopharyngal et de la pression intra-orale qui varie d'un phonème à l'autre chez le même sujet. Il dépend aussi de l'effort respiratoire (Baken [3], Zajac et al. [32]), et de la résistance au niveau du conduit buccal (position de la langue sur les plans horizontal/vertical et position des lèvres. Ainsi, le débit nasal pourrait renseigner indirectement sur la constriction au niveau du conduit oral. Au vu de ce qui précède, la comparaison des données aérodynamiques doit se faire en se focalisant sur la répartition de la quantité du DANP recueillie sur les voyelles nasales en estimant les écarts séparant les voyelles entre elles chez les natifs du français et les apprenants jordaniens.

La répartition du DANP en fonction des voyelles chez les locuteurs natifs (Figure 12) démontre que deux locuteurs notamment les deux locutrices (LF-FR3 et LF-FR4) présentent deux schémas similaires où la voyelle nasale /ɔ̃/ acquiert le maximum du DANP suivie de la voyelle /ɑ̃/ et ensuite de la voyelle /ɛ̃/. Or, les deux locuteurs (LM-FR1 et LM-FR2) offrent un schéma différent où la voyelle /ɔ̃/ s'approprie le maximum du DANP, puis vient /ɛ̃/ et ensuite vient /ɑ̃/. Ces résultats recopient les schémas que nous avons déjà relevés dans un corpus portant sur des logatomes contenant des voyelles nasales. Mais, ils contredisent les résultats d'un corpus de phrases plus large où les voyelles nasales étaient précédées pratiquement de tous les contextes consonantiques du français sauf les consonnes nasales (Nawafleh [27]). Dans ce corpus-ci, et pour l'ensemble de contextes, les 4 locuteurs ont présenté l'ordre suivant : /ɔ̃/ > /ɑ̃/ > /ɛ̃/.

D'après les résultats, la voyelle /ɔ̃/ est la plus stable dans la performance des locuteurs natifs. Cette voyelle occupe, articulatoirement parlant, une position postérieure et elle est souvent décrite comme étant la voyelle la plus fermée et la plus arrondie parmi les voyelles nasales. Elle serait produite, ainsi, avec un degré d'impédance assez fort dans le conduit buccal chez les différents locuteurs natifs et s'approprie, par conséquent, le maximum du DANP. Les résultats suggèrent également qu'il pourrait y avoir des dispositions articulatoires différentes pour la réalisation de l'une des deux voyelles /ɑ̃/ ou /ɛ̃/.

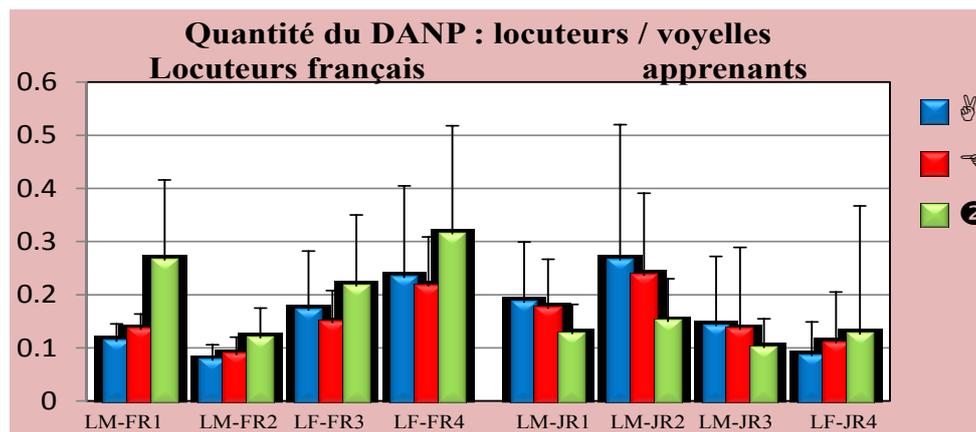


Figure 12 : Représentations graphiques des valeurs du DANP enregistrées pour les 4 locuteurs natifs à gauche et les 4 apprenants jordaniens à droite.

Dans une étude menée par Hansen [21] auprès de 42 locuteurs français de la région parisienne de deux générations, de 15 à 25 ans et de 45 à 60 ans, l'auteur a constaté un changement en chaîne dans la réalisation des voyelles nasales du français. À titre d'exemple, Hansen a noté que la voyelle nasale /ɛ̃/ pouvait se rapprocher de /ɑ̃/. Des résultats similaires à ceux de nos deux locuteurs masculins LM-FR1 et LM-FR2 ont

été soulevés par Delvaux [14]. Dans ses études aérodynamiques portant sur des voyelles du français prononcées par des locuteurs belges. Delvaux a expliqué que chez ses locuteurs, /ã/ était la voyelle la plus «ouverte» des voyelles nasales et présentait, par conséquent, la quantité minimale de DANP. Par contre, Amelot [1] a noté que l'un de ses deux locuteurs francophones devait réaliser la voyelle /ã/ avec un degré d'aperture du conduit oral l'approchant de la voyelle /õ/ et que l'autre locuteur présentait un degré d'aperture approchant, dans sa réalisation, /ã/ de la voyelle /ẽ/, mais dans les deux cas la voyelle /ẽ/ présentait relativement le débit nasal le plus faible. Amelot [1] revoie cette différence à la position postérieure de /ã/ par rapport à /ẽ/.

Ainsi, et tout en admettant qu'il pourrait y avoir deux manières pour l'articulation de l'une des deux voyelles /ã/ ou /ẽ/, l'observation des schémas introduits par les apprenants jordaniens indique qu'un seul locuteur, la locutrice (LF-JR4), réussit à présenter un schéma semblable à celui offert par les deux locuteurs français (LM-FR1 et LM-FR2). Mais, les trois apprenants LM-JR1, LM-JR2 et LM-JR3, quant à eux, introduisent un schéma différent où la voyelle /ã/ s'approprie le maximum du DANP suivie de /ẽ/ et puis de /õ/. Ces résultats soulignent les difficultés des apprenants jordaniens à reproduire convenablement les voyelles nasales et confirment les résultats que nous avons soulevés dans des études perceptives, aérodynamiques et acoustiques précédentes (Nawafleh [27]. Les résultats exposent que les apprenants confondent les voyelles nasales essentiellement entre elles. Cela est net notamment pour la voyelle /õ/ dans cette présente étude.

Enfin, et avant d'exposer l'effet de contextes consonantiques sur la quantité du DANP, nous choisissons d'exposer les résultats du DAN pour les trois voyelles sans tenir compte de la quantité du DAB. Nous suivons ainsi la méthode adoptée par Amelot [1].

Les résultats obtenus, et représentés dans la figure ci-dessous (Figure 13), ne changent guère ceux de la mesure du DANP des locuteurs natifs. En revanche, les résultats des apprenants indiquent que la locutrice LF-JR4, qui a précédemment présenté un schéma similaire à celui des natifs offre dans cette mesure un schéma différent où les trois voyelles nasales se trouvent avec des valeurs quasiment identiques. Un seul apprenant, cette fois-ci, LM-JR2 présente un ordre similaire à celui introduit par les locutrices françaises. Les résultats ainsi exposés indiquent que les apprenants ont du mal à contrôler les comportements du voile du palais et la manipulation des articulateurs oraux tels que la mâchoire, la langue et les lèvres dont les mouvements synchroniques permettant de différencier les voyelles nasales entre elles. Enfin, nous exposons ci-dessous l'effet de l'entourage consonantique sur la quantité du DANP.

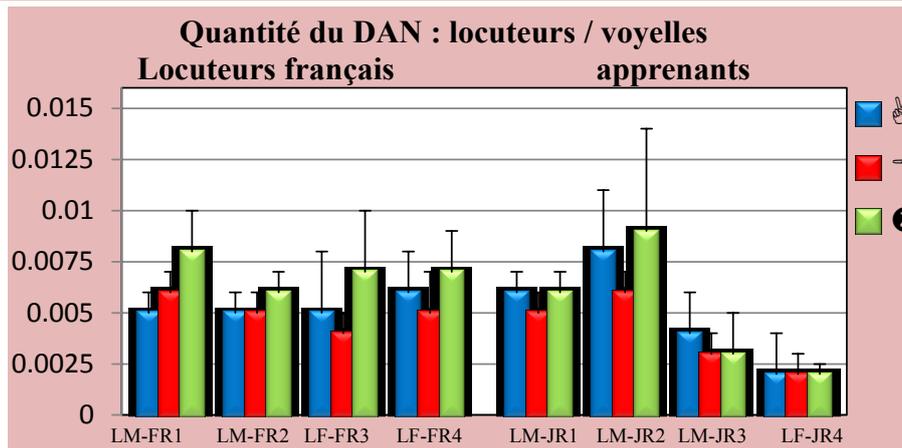


Figure 13 : les valeurs et les écarts-types du DANP marqués par les deux groupes pour les trois voyelles nasales. Les données des 4 natifs sont à gauche et celles des apprenants sont à droite.

Les contextes ont sans doute des effets importants sur la quantité des débits d'air. Des recherches telles que celles de Bell-Berti [5], Benguerel [6], Ushijima et Hirose [30], Cohn [12], Basset et al.[4], Delvaux [14] et Amelot [1] ont démontré que l'abaissement du voile du palais et, consécutivement, l'apparition de débit d'air nasal et sa quantité sont largement influencées par l'entourage consonantique des voyelles nasales.

Les résultats de cette mesure pour les deux contextes précédant les voyelles nasales démontrent que les deux groupes des locuteurs présentent le même schéma (Figure 14) et le test Anova à deux facteurs langue-maternelle/contexte n'indique pas de différence significative entre les deux publics :  $F(1,250) = 0,57$  ;  $P = 0,8114 > 0,05$ .

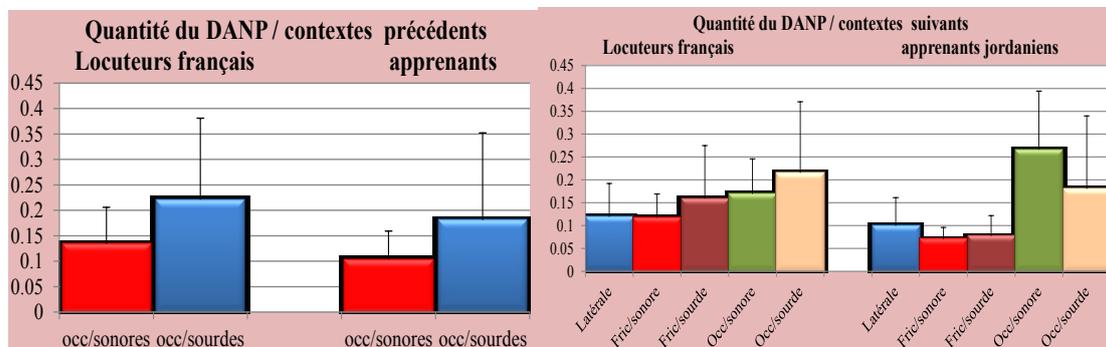


Figure 14 : représentations graphiques des valeurs et des écarts-types du DANP marqués par les 2 publics pour les 3 voyelles nasales en fonction des contextes précédant les voyelles à gauche et les contextes les suivant à droite.

En ce qui concerne l'effet des contextes suivant les voyelles sur la quantité du DAN, les résultats des locuteurs natifs exposent que les contextes consonantiques suivant les voyelles nasales ont un effet significatif ( $F(4,123) = 2,757$  ;  $P = 0,0308 < 0,05$ ) sur la quantité du débit d'air nasal recueillie sur les voyelles nasales. Les voyelles suivant des occlusives se présentent avec la quantité du DANP la plus importante suivie consécutivement des occlusives sonores, des fricatives sourdes, de la latérale et des fricatives sonores. Les contextes suivant les voyelles jouent également un rôle important et indiquent un effet significatif dans les données des apprenants ( $F(4,121) = 6,339$  ;  $P < 0,0001$ ).

La comparaison des résultats marqués par les locuteurs natifs avec ceux enregistrés pour les apprenants ne montre pas de différence significative  $F(4,244) = 1,489$  ;  $P =$

1,489 > 0,05 entre les deux groupes pourtant les deux schémas ne sont pas tout à fait identiques (Figure 14 ci-dessus). La différence principale entre les deux se concrétise au contexte des occlusives. En effet, les voyelles nasales précédées des occlusives sourdes s'approprient, dans les données des natifs, la quantité la plus importante du DANP tandis que chez les apprenants ce sont les voyelles au contexte des occlusives sonores qui acquièrent le maximum du DANP. Cette différence pourrait être due à la durée importante des occlusives sourdes (0,169 avec 0,112 d'écart-types) offerte par les apprenants contre 0,098 (0,027 écart-types) marquée par les locuteurs français (Figure 14, ci-dessus).

Ainsi, chaque contexte consonantique impose ses contraintes aérodynamiques sur les voyelles nasales les avoisinantes. Les consonnes, notamment les occlusives qui nécessitent un port vélopharyngal fermé pour maintenir une pression intra-orale assez élevée, contribuent à augmenter le taux de la nasalité des voyelles nasales environnantes. Le contexte des fricatives vient en deuxième lieu notamment les sourdes. Cela se rapproche des données de la littérature. Benguerel [6] et Ohala [28] ont suggéré que les fricatives sourdes pouvaient se réaliser avec une petite ouverture du port vélopharyngal sans toucher à leur qualité, alors que les sonores, d'après Ohala, sont moins compatibles car la nasalisation les transformerait en approximantes. Des résultats similaires ont été indiqués par Demolin [15]. Il a expliqué que, lorsque les fricatives sonores se nasalisent, elles sonnent comme des approximantes.

*En peu de mot sur la répartition de la quantité des débits d'air, les résultats des locuteurs natifs indiquent une stabilité de la voyelle /ɔ̃/ et une variabilité concernant l'une des deux voyelles /ã/ et /ẽ/. Les données des apprenants dévoilent une instabilité des voyelles nasales dans leur performance. Un seul locuteur semble pouvoir produire les voyelles nasales avec un schéma similaire à celui des natifs. Enfin, les contextes consonantiques imposent leurs contraintes aérodynamiques sur les voyelles nasales les avoisinantes.*

#### 4. Conclusion

Les résultats présentés et discutés au cours de cette étude nous ont permis de souligner qu'il y avait des déviations certaines dans la réalisation des apprenants des voyelles nasales du français par rapport aux locuteurs natifs de cette langue. Le décalage se concrétise tant dans les données aérodynamiques qu'acoustiques. Nous avons noté que les durées acoustiques des voyelles nasales des apprenants sont nettement plus longues que celles marquées par les locuteurs français. Ces durées allongées des voyelles nasales des apprenants pourraient être dues au débit lent de la phonation. En effet, un seul locuteur seulement (LM-JR3) a réussi à présenter des durées de phonation se rapprochant de celles offertes par les locuteurs natifs.

Les locuteurs natifs se soucient de synchroniser maximale l'arrivée du débit d'air nasal avec le début des voyelles nasales. Les apprenants jordaniens n'ont pas, a priori, de difficulté à reproduire de la nasalité vocalique (l'abaissement du voile du palais en maintenant l'ouverture du conduit oral) mais leur problème réside dans la synchronisation des comportements vélaire avec le début et la fin acoustique des voyelles. Le manque de synchronisation temporelle se matérialise selon leurs schémas et données aérodynamiques soit par une anticipation importante du débit d'air nasal, soit par un taux élevé du retard par rapport au début acoustique des voyelles nasales.

En ce qui concerne la propagation du DAN, nous avons observé que le taux de propagation est significativement plus ample dans les données des apprenants. Les résultats des locuteurs natifs et ceux des apprenants ont mis en évidence l'effet des

contextes sur le taux d'anticipation et du retard du débit d'air nasal (DAN) par rapport au début acoustique des voyelles nasales. Le taux de retard maximum de l'apparition du DAN est noté pour les voyelles précédées des occlusives sonores puis des occlusives sourdes, résultats qui vont à l'encontre des prédictions d'Ohala [11] et qui confirment des résultats relevés par Montagu [26]. Les contextes consonantiques influencent également la propagation du DAN dans la mesure où certains contextes se montrent plus transparents à la nasalité que d'autres. À titre d'exemple, les occlusives sonores sont plus transparentes à la propagation du DAN que les occlusives sourdes. Il y a effectivement d'autres facteurs jouant sur le taux de propagations telles que la durée du phonème suivant les voyelles ainsi que l'absence ou la présence d'une pause entre la voyelle nasale et le phonème qui la suit.

Les mesures quantitatives du DANP démontrent un effet important de l'entourage consonantique sur la quantité du débit d'air nasal recueilli sur les voyelles nasales conformément aux résultats déjà relevés par, entre autres, Cohn [12], Basset et *al.* [4], Delvaux [14] et Amelot [1]. La quantité du DANP diffère largement et significativement d'un locuteur à l'autre, différence due à la physiologie du conduit nasal et aux positions des articulateurs oraux pendant la phonation. Dans la réalisation des locuteurs natifs du français, la voyelle /*ɔ̃*/ est la plus stable et s'approprie la quantité la plus importante de DANP, et cela chez les 4 locuteurs français et dans les différents contextes consonantiques étudiés. En revanche, les valeurs sont moins stables pour les deux voyelles /*ɑ̃*/ et /*ɛ̃*/. La deuxième place est attribuée à la voyelle /*ɑ̃*/ chez les deux locutrices (LF-FR3 et LF-FR4) et à la voyelle /*ɛ̃*/ chez les locuteurs (LM-FR1 et LM-FR2).

Les données des apprenants de la quantité du DANP, quant à elles, démontrent qu'un locuteur jordanien (LF-JR4) a réussi à reproduire le même schéma aérodynamique de la répartition du DANP sur les voyelles nasales (/*ɔ̃*/ > /*ɛ̃*/ > /*ɑ̃*/) que les deux locuteurs français. Par contre, trois apprenants ont offert un schéma où /*ɑ̃*/ s'est approprié le maximum du DANP. Cela pourrait dévoiler une confusion potentielle entre les deux voyelles /*ɑ̃*/ et /*ɔ̃*/. La quantité du DAN calculée pendant DAN positif et sans tenir compte de la quantité proportionnelle n'a guère changé les résultats des locuteurs natifs tandis que, chez les apprenants, encore un seul locuteur éventuellement LM-JR2 a reproduit le même ordre noté chez les natifs.

Enfin, devant cette carence constatée chez les apprenants à reproduire les voyelles nasales du français avec des valeurs acoustiques et aérodynamiques semblables à celles des natifs, il est indispensable à l'enseignant du français à un public arabophone jordanien d'en tenir compte et de surveiller la production des apprenants. Il convient également d'avoir recours à des stratégies diverses destinées à améliorer la performance des apprenants. Il est possible, voire indispensable d'avoir recours aux descriptions articulatoires des voyelles du français, éventuellement les nasales, telles que le degré d'aperture du conduit oral ainsi que la position des lèvres permettant de différencier les voyelles. Il importe parallèlement de sensibiliser les oreilles des apprenants aux différences perceptives existantes entre les voyelles nasales. Cela pourra se faire au moyen des paires minimales aboutissant à préparer des exercices d'identification et de discrimination auditives, et par conséquent à la reproduction des voyelles cibles.

## Bibliographie

- [1] AMELOT Angélique. Étude aérodynamique, fibroscopiques, acoustique et perceptive des voyelles nasales du français. Thèse de phonétique, Université Paris 3, pp, 2004.
- [2] AMELOT Angélique, BASSET Patricia, MAEDA Shinji, HONDA et Lise CREVIER-BUCHMAN. Étude simultanée des mouvements du voile du palais et de l'ouverture du port vélopharyngal, *XXVIIèmes Journées d'Études sur la Parole*, Avignon, juin 2008.
- [3] BAKEN Roland J. *Clinical Measurement of Speech and Voice*. San Diego, London: Singular Publishing Group, 1996.
- [4] BASSET Patricia, AMELOT Angélique, VAISSIÈRE Jacqueline et B. Roubeau. Nasal airflow in French spontaneous speech, *Journal of the International Phonetic Association*, 2001, n° 31, p. 87-100.
- [5] BELL-BERTI Fredericka. *An electromyographic study of velopharyngeal function in speech*, *Journal of Speech and Hearing Research*, 1976, vol. 19, pp.225-240.
- [6] BENGUEREL André-Pierre. Nasal Airflow Patterns and Velar Coarticulation in French. In FANT Gunnar (eds), *Speech Wave Processing and Transmission*, Stockholm: Almqvist and Wiksell, 1974, 2, pp. 105-112.
- [7] BENGUEREL André-Pierre, Hajime HIROSE, et al, Velar coarticulation in french: A fiberscopic study, *J. of Phonetics*, 5, 1977b. pp. 149-158.
- [8] BENGUEREL André-Pierre, Hajime HIROSE et al. *Velar height and its timing in french: A fiberscopic study*, *Annual Bulletin*, Research Institute of Logopedics and Phoniatics, 1975, n° 6, p.67-78.
- [9] BOERSMA Paul and David WEENINK. *Praat: doing phonetics by computer (logiciel)*. <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/> (25. 01. 2104).
- [10] BRKAN Altijana, Angélique AMELOT et Claire PILLOT-LOISEAU. Utilisation d'un accéléromètre piézoélectrique pour l'étude de la nasalité du Français Langue Étrangère. *Actes de la conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL 2012, volume 1: JEP*, pp. 689–696, Grenoble, 4 au 8 juin 2012.
- [11] CLEMENTS George N, and Sylvester OSU. Ikwere nasal harmony in typological perspective. In SAUZET Patrick and ZIRIBI-HERTZ Anne (eds), *Typologie des langues d'Afrique et universaux de la grammaire*, Paris: le Harmattan, 2003, vol. II, pp. 70-95.
- [12] COHN Abigail. *Phonetic and Phonological Rules of Nasalization*, UCLA Working Papers in Phonetics, Los Angeles: Dept. of Linguistics, 1990, n° 76.
- [13] DASTON Rodger M. *Using simultaneous photodetection and nasometry to monitor velopharyngeal behavior during speech*, *Journal of speech and Hearing Research*, 1989, n° 32, pp.195-202.
- [14] DELVAUX Véronique. Contrôle et connaissance phonétique : les voyelles nasales du français, 289 p. Thèse : Phonétique : Université Libre de Bruxelles : 2003.
- [15] DEMOLIN Didier. The phonetics and phonology of nasal harmony and nasal segments in Guarani, Colloque "NASAL 2009", Université de Montpellier, [communication du 5 juin 2009].
- [16] DEMOLIN Didier, Véronique DELVAUX et Al. Determination of Velum Opening for French Nasal Vowels by Magnetic Resonance Imaging, *Journal of Voice*, 2003, vol.17, n° 4, pp. 454-467.
- [17] DETEY Sylvain, Isabelle RACINE et al. Evaluation des voyelles nasales en français L2 en production de la nécessité d'un corpus multitâches, *Actes du Congrès Mondial de Linguistique Française*, Paris, 2010, pp.1289 -1301.

- [18] FANT Gunnar. *Acoustic theory of speech production*. The Hague: Mouton, 1960.
- [19] FOUCHÉ pierre. *Phonétique historique du français*. Paris : Klincksieck, 1958.
- [20] GHIO Alain et TESTON Bernard. *Capteurs aérodynamiques (débits d'air, pressions)*. <<http://www.sqlab.fr/evaSensFR.htm>>, (consulté le 25.01. 2014).
- [21] HANSEN Anita B. *Les voyelles nasales du français parisien : aspects linguistiques, sociolinguistiques et perceptuels des changements en cours*. Copenhagen: Museum Tusulanum Press, Études Romanes, 1998.
- [22] JAKOBSON Roman. *Essais de linguistique générale-I: les fondations du langage*. (Traduction de N. Ruwet) Paris: Les éditions de Minuit, 1963/2003.
- [23] KRAKOW Rena A. and HUFFMAN Marie K. Instruments and techniques for investigating nasalization and velopharyngeal function in the laboratory: An introduction. In HUFFMAN Marie K. and KRAKOW Rena A. (eds), *Phonetics and phonology, vol. 5, nasals, nasalization and the velum*, San Diego: Academic Press, 1993, pp. 3-59.
- [24] LONCHAMP François. Études sur la production et la perception de la parole : les indices acoustiques de la nasalité vocalique : la modification du timbre par la fréquence fondamentale, 345 p. Thèse : Phonétique : Nancy 2 : 1988.
- [25] MONTAGU Julie. L'articulation labiale des voyelles nasales postérieures du français, comparaison entre locuteurs francophones et anglo-américains, *XXIVèmes Journées d'Études sur la Parole*, Nancy, 2002, pp. 253-257.
- [26] MONTAGU Julie. Analyse acoustique et perceptive des voyelles nasales et nasalisées du français parisien. Thèse: Phonétique: Paris 3: 2007.
- [27] NAWAFLEH Ahmad. Difficultés de prononciation et de perception de voyelles du français: Apprenants arabophones, Presses Académiques francophones (PAF), OmniScriptum GmbH & Co. KG. pp. 544. 2013.
- [28] OHALA John J. Phonetic explanations for nasal sound patterns. In Ch. A Fergusson, L. Hyman, J. J. Ohala (eds), *Nasàlfest: Papers from a symposium on nasals and nasalization*, Stanford: Language Universal Project, 1975, pp. 289-316.
- [29] STRAKA Goerges. *Remarques sur les voyelles nasales leur origine et leur évolution en français. Les sons et les mots*. Strasbourg : Klincksieck, 1979, pp. 502-531.
- [30] USHIJIMA Tatsujiro and HIROSE Hajime. Electromyographic study of the velum during speech, *Journal of Phonetics*, 1974, vol. 2, n° 4, pp. 315-326.
- [31] VAISSIÈRE Jacqueline. *Nasalité et phonétique*. [conférence invitée], Colloque « le voile pathologique », Lyon, 1995.
- [32] ZAJAC DAVID J, Donald WARREN, and Virginia HINTON. Aerodynamic assessment of motor speech disorders. In McNEIL Malcolm R., *Clinical management of sensorimotor speech disorders*, New York: Thieme, 2009, pp. 64-79.

## Cross-Layer Data-Gathering Protocol for Wireless Sensor Networks

Mohammed A. Abuhelaleh<sup>1</sup>, Khaled Almi'ani<sup>1,2</sup>, Bassam A. Alqaralleh<sup>1</sup>, Moha'med Al-jaafereh<sup>1</sup>, and Tahseen A. Al-Ramadin<sup>1</sup>

<sup>1,2</sup> [College of Information Technology](#), Al-Hussein Bin Talal University P.O. Box (20), Ma'an - Jordan

<sup>2</sup>Corresponding author: E-mail: k.almiani@gmail.com

### ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSNs) are normally deployed in hostile environments (hard-to-access). This introduce reducing the energy consumption as a major challenge, since recharging the sensors batteries is impractical. In this paper, we further reduce the energy consumption, we present an extended version of the RMC [1] protocol. The goal of RMC is to contribute towards avoiding the overhead caused by obtaining the transmission schedule. RMC introduce a dependency relationship between the behavior of the forwarding and each node. Thus, each node can locally determine its schedule and forwarding path. We evaluate the performance of our approach through simulations and the results show that our approach achieves significant performance gains over other approaches.

**Keywords:** Wireless sensor networks, Cross-Layer Data-Gathering Protocol

### 2- INTRODUCTION

Sensor nodes are usually battery- powered and the environment in which these nodes are deployed may be hostile. In hostile environments, recharging the nodes is generally impossible. Even in a friendly environment, the sheer size of a network can make recharging impractical. Therefore, the most important metric affecting network performance is the node's residual energy. A node may run out of energy prematurely, thereby leaving an unobserved area.

Current research has focused on energy consumption as a primary concern in WSNs. Numerous factors have been identified as potential causes of energy wastage. These include, idle- listening, collision, control packets overhead, and unnecessarily high transmission range. Many approaches have been proposed to conserve energy. Some approaches target the performance of a single layer whilst others adopt a cross-layer approach in an attempt to achieve better performance.

Considerable attention has been devoted to the data-link and routing protocols to address the above issue. Towards this end, multi-hop transmission and clustering are important design criteria. As the cost of transmitting one bit is higher than the processing cost [3], organizing the network into clusters is vital from an energy conservation perspective. Cluster heads (CHs) collect data from their cluster to estimate data correlations mainly related to spatial proximity and subsequently aim to remove redundant transmission and lower cost.

Various clustering algorithms have been proposed in the literature, and a survey of these algorithms can be found in [5]. The role of these algorithms is to select CHs in order to distribute the load and increase the network lifetime. Some algorithms use

probability-based strategies to elect the CHs, where a node is selected as CH based on certain probability distribution. One possible drawback of this election strategy in a multi-hop environment is, the resultant network instability due to the regular election process that changes the topology. This forces the routing protocol to continuously adapt to such topological changes.

Normally, WSN applications is either event-driven, periodic-monitoring and object tracking [5]. In an event-driven application, a node will not send data until it senses a specific event. In periodic-monitoring, transmission occurs based on interval of time determined by the user In object tracking, the network monitors the movement of an object within the monitored area.

In periodic-monitoring applications, the number of packets that each node sends is an order of magnitude higher than in any other application domain. Thus, clustering and in-network processing for such applications has the best possibility of increasing the lifetime of the network. However, in multi-hop communication paradigm, the use of traditional routing protocols that aim to establish a routing path to the sink may be impractical. Moreover, under some circumstances where clustering is also used, the clustering setup triggered periodically further compounds the cost of re-establishing such routes. Eliminating this routing protocol overhead may be achieved by using geographic routing protocols which are known to be scalable.

In periodic-monitoring applications, the probability of having collision in the network is mainly affected by the traffic and the topology of the network. To reduce the possibility of collision, integrating the MAC and routing layers has emerged as promising approach. This integration involves the performing of the scheduling during the establishment of the routing paths. Several proposals have adopted this approach. For instance, the scheduling algorithm in [5] allows each node to include the available scheduling time interval inside the routing request message. Such an approach seems to be appropriate for sensor nodes as they are generally considered to be stationary.

Another scheduling technique is to use a centralized node to schedule the transmission. For instance, in [7], the authors proposed dividing the nodes based on their distance to the base station(sink). Nodes have the same number of hops to the base station is assigned to the same group. Even though scheduling network transmissions by a single node is a performance bottleneck, its benefits may be realised if a smaller scope scheduling is adopted. This is where node clustering could be useful. Clustering and in-network processing have important design implications on transmission scheduling. The use of clustering affects the scheduling process in two ways. Firstly, it reduces the scheduling scope; CHs handle the intra- cluster communication. Secondly, dynamic clustering however alters the network topology and therefore increases the overhead of managing the inter-cluster communication.

In this paper, we present an extended version of the cross-layer protocol RMC [1]. This extension include additional scheduling steps to further extend the lifetime of the network.

The rest of the paper is organised as follows. In Section 2, we discuss the related work. In Section 3, the details of the extension is presented. In Section 4, the performance of the presented protocol is evaluated. We conclude the paper in Section

### 3- RELATED WORK

There has been significant research aimed at increasing the lifetime of the network by integrating the network functionalities. In [9], a routing architecture known as Sensor-Supernode-Sink (3S) is presented. The network consists predominantly of sensors with power and memory limitations. The remainder of the network consist of supernodes. Supernodes are more powerful devices than sensors and deliver sensor data to the sink. The routing paths are established between supernodes using a minimum spanning tree. Each supernode's zone is divided into sub-zones, where a master node is elected to gather sub-zone data. Each master node schedules the transmission of nodes that must respond to a specific query. A staggered active/sleep schedule is used to avoid the data-forwarding interruption problem. In each round, the node receives a packet from its master to determine whether it is in the active mode or not. However, performance is impaired as the percentage of nodes participating in the processing task increases.

A random scheduling approach to increase network efficiency is proposed in [10]. The model takes energy usage into consideration. By using Extended Power Aware Random Scheduling (EPARS), this model tries to resolve the collision problem. EPARS uses node ID to generate a sequence of intervals. A node state in each interval alternates between sleep, idle, send and receive. By knowing the neighbor IDs, each node can know the sequence of its neighbors' intervals. Each node performs passive sensing to resolve synchronization conflicts. The hidden terminal problem is resolved by letting the destination node broadcast the send schedule to its neighbors. To avoid problems such as latency and congestion, the routing layer mechanism is performed based on the EPARS' schedules. However, its performance is highly dependent on the topology stability, as frequent changes to the topology causes significant overhead in managing the schedules.

By taking into account the response order for the application query, the authors in [11] attempt to improve the MAC scheduling. Based on this order, the schedule of the transmission are established to avoid the possibility of collision. The proposed approach uses heuristic method to eliminate sub-optimal solutions. In addition, the proposed approach uses randomized algorithm to search for least cost solutions. Deploying multiple queries simultaneously may reduces the efficiency of this approach. The techniques behind the above proposals may be classified into two categories. The first category aims to provide the routing protocol with the MAC knowledge to reduce interference and avoid congestion. The second category aims to enhance the MAC protocol performance by considering the routing protocol knowledge. In a typical WSN, the deployed nodes typically contain redundancy to ensure connectivity. As a result, many nodes' data may be highly correlated. Exploiting such correlations underlines the importance of network clustering to reduce the number of transmitted packets. However, by altering the network topology, the adoption of a dynamic clustering scheme penalises the performance by increasing the overhead in controlling the transmission schedules and re-establishing the routing paths. In this work, each node determines its transmission schedule based on its location. Network lifetime is considered here as the primary objective.

We further simplify the routing mechanism to adopt a number of forwarding paths. Without explicit path discovery, different paths are used to enhance the load distribution.

### 3. THE RMC CROSS-LAYER SCHEME

RMC is designed to prolong the network lifetime, and is able to offer good scalability as well as to provide a time-bound on data gathering. By addressing the periodic-monitoring application characteristics, RMC aims to encompass the routing, MAC and clustering functionalities. To achieve its design goal, RMC consists of two main components, namely clustering and scheduling.

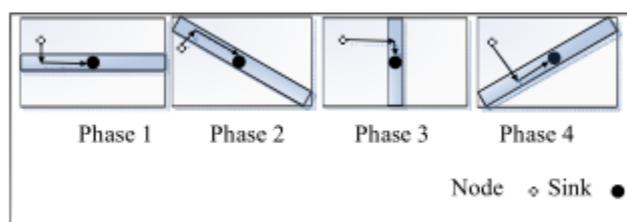
**Clustering:** takes place periodically. Node clustering is performed in a semi-static fashion across two levels, namely horizontal and diagonal. It is termed semi-static because the CH order is rotated based the ascending order of their node id. It is neither fully dynamic where CH selection is probabilistic nor static where the CHs are fixed at deployment time. The adoption of a semi-static scheme is to simplify the routing process, whereas the two-level clustering endeavors to distribute the load.

**Scheduling:** RMC scheduling is cluster-based. Based on the ID of its cluster, each node determines its schedule.

We assume the traffic is periodic, and the network model adopts the following assumptions:

- Nodes are stationary, location-aware and time synchronized;
- The network geometry is rectangular;
- The nodes are uniformly deployed;
- We currently considers the centre location for the sink. However, the sink node may be located at any corner or at the centre.

As both horizontal and diagonal levels are adopted, the scheduling scheme uses four phases to alternate flows. The adoption of the two levels clustering combined with the four phases aims to vary the routes of the packets, so the traffic load can be evenly distributed. To understand the principles of the RMC mechanism, we use the illustration shown in Figure 1. Each node will be a member of two clusters, horizontal and diagonal. The horizontal cluster ID is used to address the nodes in phase one and three. In the other phases, nodes will be addressed using their diagonal cluster ID. The routing mechanism employed in RMC works in phases one and three to gather the network packets into the middle row and column respectively, towards reaching the sink. In the other phases, the gathering will be at the diagonal before the sink.



**Figure 1: the four phases of data collection with different flow directions. Phase 1 involves data collected vertically through to the middle row and towards the sink. The others follow the direction indicated.**

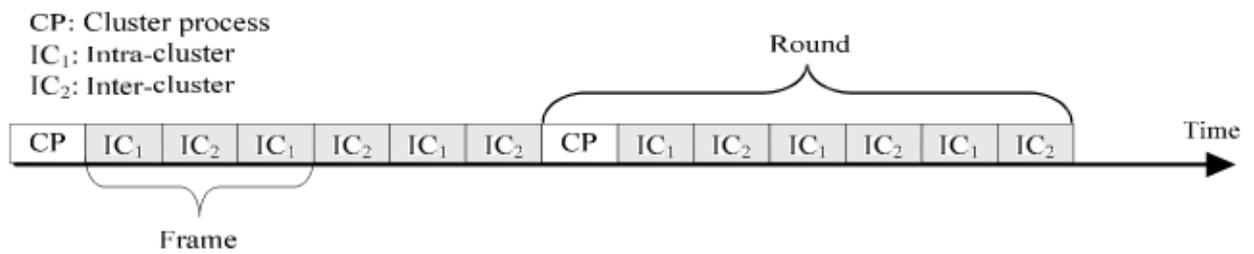


Figure 2: RMC frame

### 3.1 Clustering Process

RMC adopts a two-step clustering process involving cluster setup and CH election. Its operation is frame-based with a fixed number of slots per frame. Figure 2 illustrates this frame, and round which consists of clustering, intra-cluster communication and inter-cluster communication.

#### 3.1.1 Cluster setup

Several proposals have been introduced to address the routing protocol overhead [7][12]. Generally, they attempt to simplify the routing process by organizing the network into a multi-level architecture. Even though these approaches have achieved significant overhead reduction, their designs have not considered the importance of load balancing. Therefore in this section, we describe the RMC protocol clustering scheme, which is designed to simplify the routing process as well as to promote load balancing. As indicated before, the clustering is performed across two levels, horizontal and diagonal. At each level the network is divided into a number of grids, and each grid host a cluster. For the horizontal level, the clustering process will be performed to obtain  $m$  by  $m$  grids. The value of  $m$  is odd as depicted in Figure 3(a). The odd division ensures that the behavior of the network is symmetric. The size of each grid is determined based on the geometry of the network. On other hand, diagonal clustering divides the network into diamond grids, where each diamond vertex will bisect a horizontal grid edge [Figure 3 (b)]. Using the available information about the network and the grids, each sensor can locally determines its cluster membership. These information can be provided to the network before deployment. To start the process of identifying the cluster, each node maps its location to the relative  $(x,y)$  coordinates, where the origin of the network is fixed to the network lower left corner.

To understand how a node locally determines its cluster id, we use Figure 3(c) for exposition. The row's number ( $r$ ) and the column's ( $c$ ) number are used to identify a cluster. Accordingly, the horizontal cluster ID is calculated as:

$$r = \left\lceil \frac{x}{h_{cw}} \right\rceil, \quad c = \left\lceil \frac{y}{h_{ch}} \right\rceil \quad (1)$$

Where  $h_{cw}$  and  $h_{ch}$  are the horizontal grid width and height, respectively.

In diagonal clustering, a row represents the number of clusters crossed by a line drawn parallel to the diagonal line BD [Figure 3(c)]. Indexing progresses from the lower left corner to the upper right corner. For ease of exposition, we use node H as a reference and draw a line (i.e. EF) through it parallel to BD. To calculate the diagonal row index, we need to determine the intersection point of line EF at the network lower edge. Line EF intersects the network lower edge at F. The row index can accordingly be determined by determining the number of  $h_{cw}$  intervals that fits in AF. Similarly, the diagonal column index represents the number of  $h_{cw}$  intervals that fits 2XF.

This completes the unique identification of each cluster. The CH election process is given below.

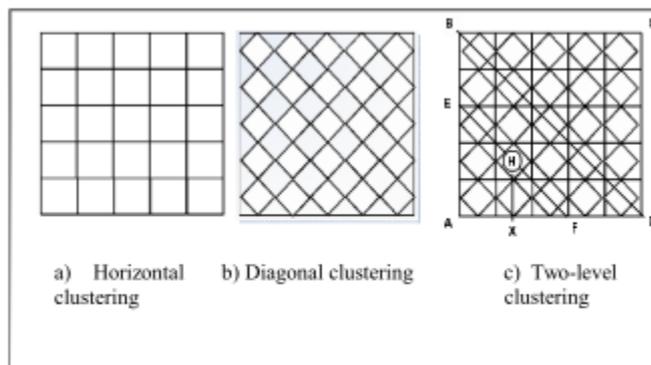


Figure 3: Clustering Process

### 3.1.2 CH election

The above clustering organises the network into a pre-known number of clusters with the same density. Since the nodes are stationary and each cluster has the same number of nodes, the employed CH election process ensures the load is distributed by rotating the elected CH in sequential order of node id. We refer to a generic ‘cluster’ on the understanding that this process is used for both horizontal and diagonal clusters. In order to discover neighbours, a node uses a neighbour discovery scheme. Neighbour discovery involves informing each node of its neighbours. Each node chooses a random slot to broadcast its identity. A slot is the duration needed to transmit one packet denoted by TX. Thus, the probability that a node and its neighbours choose different slots is given by [13]:

$$p = \prod_{j=1}^{n_c} \left( 1 - \frac{j}{s_n} \right) \approx \prod_{j=1}^{n_c} e^{-j/s} \approx e^{-n_c^2/2s_n}$$

where  $n_c$  refers to the number of neighbours of a node and  $s_n$  is the total number of slots. From the above equation, we can see that the necessary number of slots for  $p = 0.99$  can be calculated as:

$$s_n \approx \frac{-n_c^2}{2 \cdot \ln 0.99} \tag{3}$$

If  $n_c$  is unknown, it can be approximated using the cluster area ( $A_{cl}$ ) and node density. For intra-cluster communications, the transmission range is set to make sure that the cluster area is covered. The inter-cluster communications range must ensure

that the next CH can be reached. Consider two adjacent clusters  $C_1$  and  $C_2$ . In the worst case, a CH is situated at the upper right corner of  $C_1$  but its next hop is located at the bottom left corner of  $C_2$ . This will demand high transmission costs. To reduce the probability of such an occurrence, we introduce a procedure termed virtual-clustering.

Virtual-clustering is used to split each cluster into four sub-clusters  $scl_1 \dots scl_4$ . Starting sequentially from  $scl_1$  to  $scl_4$ , the node with the smallest ID will advertise itself as the CH. Upon completion of a round, the process repeats.

### 3.2 Transmission scheduling

RMC scheduling is cluster-based. Nodes determine their schedule based on the id of their clusters. As stated above, the process of the scheduling consists of four phases, and in each phase, the scheduling process consists of two stages of gathering; the intermediate gathering and the sink gathering. In the intermediate gathering, the process works by gathering the packets at the middle row or the middle column. Once this step is performed, the process starts the sink gathering step to forward the packets to the sink.

In the intermediate stage the network is partitioned to three partitions  $P_A, P_M$  and  $P_B$ .  $P_M$  refers to the middle row or column where the packets need to arrive before reaching the sink. In addition, when  $P_M$  refers to the middle row,  $P_A$  and  $P_B$  are the network partitions, where  $row > P_M$  and  $row < P_M$ , respectively. Otherwise, they represent the partitions where  $column > P_M$  and  $column < P_M$ , respectively.

In the intermediate stage of phase one, the odd and even column works in alternative fashion to gather the data of the nodes at the middle horizontal row. Phases 2, 3, and 4 largely follow this approach for the scheduling of transmissions. To schedule the packets in phase one without collision, each cluster head must know the number of clusters in its column and the partition to which it belongs. The scheduling logic is determined by the membership of each cluster head partition. For  $P_A$ , the following steps are required before scheduling:

- 1) In Each CH, the number of cluster heads in  $P_A$  that can transmit their data collision-free is calculated. This number ( $C_{ft}$ ) is calculated by dividing the number of clusters in  $P_A$  over the minimum number of hops required to separate the non-interfering transmissions.  $C_{ft}$  can be calculated as follows

$$C_{ft} = \left\lfloor \left\lceil \frac{n_h / h_{ch}}{2} \right\rceil \right\rfloor \tag{4}$$

where  $n_h$  refers to the network height.

- 2) Then the number of hops between any cluster and the last cluster in its column is determined (HC).

$$H_c = \frac{n_b}{h_{cb}} - r \tag{5}$$

3) The number of transmissions to perform in one gathering round is determined ( $T_A$ ).  $T_A$  is given by:

$$T_A = \left\lceil \frac{H_c + 1}{3} \right\rceil \tag{6}$$

After determining the number of transmissions, a CH will transmit in one round. Each cluster head transmission can span multiple slots to support a number of packets, thus we represent its period as a transmission duration or TD. Each CH transmission will be assigned to its appropriate time duration. Each time duration represents an interval of time in a cluster's duty-cycle. Each time duration will be occupied by one or more non-interfering CHs. Based on the lowest CH index ( $i$ ) in  $TD_1$ 's sequence, the other slot sequences will be determined as follows:

- The first case occurs when  $i=3$ . In this situation,  $CH_1$  will be assigned to transmission duration number two. In general the sequence of the transmission duration number  $i$  will be awarded as  $CH_i \square \square CH_{CHr} \square 1$  in  $TD_i \square 1 \square$ .
- The second case occurs when the value of  $i$  is 2. In this case, the sequence of  $TD_2$  will be assigned as  $CH_i \square \square CH_{r} \square 1 \square CH_r$  in  $TD_1 \square$ . Other  $TD$  will be assigned as  $CH_i \square \square CH_{CHr} \square 1$  in  $TD_i \square 1 \square$ .

In the  $P_B$  partition, the number of transmissions ( $T_B$ ) that each cluster head performs is calculated based on two values: the number of clusters in the cluster head partition column (PCN), as well as, the cluster head row index ( $r$ ).  $T_B$  is computed as follows:

- If the values of the  $PCN + 1$  and  $r + 1$  are factor of 3, then  $T_B$  value is calculated as  $\lceil \frac{r}{3} \rceil + 1$ ; otherwise the value will be  $\lceil \frac{r}{3} \rceil$ .
- If  $r$  is equal to  $PCN$  or its value is a factor of 3, then  $T_B$  value will be calculated as  $\lceil \frac{r}{3} \rceil + 1$ ; otherwise the value will be  $\lceil \frac{r}{3} \rceil$ .

Figure 4 presents an example to clarify the presented stages. In this example, the intermediate scheduling is for a column with nine clusters.

From the discussion, we can see that the last data to arrive in  $P_M$  includes the  $CH_1$  packet. By identifying the  $TD$ , where the last hop in  $P_B$  transmits the flow, we can calculate the amount of time needed to collect the column packets. We expect that the  $CH_1$  data to appears in  $TD_2$  and all subsequent  $TD_s$ , therefore, we can know that the last hop in  $P_B$  will always schedule the last flow in  $TD_{z+1}$ , where  $z$  is the number of clusters in each side. By knowing  $z$ , the data gathering time needed of a column towards the  $P_M$  cluster is obtained as follows:

$$CT = z \times 3 \times TX + 2 \times cluster\_time$$

Where  $cluster\_time$  is the intra-cluster time for data collection.

Once the packet are collected at  $P_M$ , the process proceed by triggering the sink scheduling stage to forward the collected packets to the sink. In  $P_M$ , each CH's load will be  $(2z+1)$  packets (equivalent to the number of clusters in a column). Therefore, eq.(7) can be re- written to represent the time needed to gather the network load to the sink as:

$$NT = 2CT + 6z^2 + 3z + TX \quad (8)$$

While considering the direction of the flow direction, the scheduling in phase three will be identical to phase one. However, in diagonal scheduling, each CH must undertake several steps before adopting the process described for horizontal scheduling. For instance, in phase two, the steps for a CH will be:

- Determine its partition membership.
- Compute the number of clusters in its row. Using the id of the cluster and PM, a cluster head can find the number of clusters in its row by:

$$cl(r) = PM - 2 + r - P - 2$$

The smaller clusters at the beginning and end of each row and column will be handled as regular clusters

And the total time needed to gather all network data at the sink is given by:

$$NT = 2LC + \sum TD_i + TX$$

Where  $\sum TD$  Refers to the duration of all TDs in the sink scheduling and LC refers to the gathering time needed for the longest diagonal column in the network. By changing the flow direction, the same steps can be applied to the scheduling process of phase four. In the following, we demonstrate how the cluster size can be determined to satisfy a given application gathering time bound.

#### 4. SIMULATION FRAMEWORK

To validate the performance of the presented protocol, we used the the J-Sim simulator [14]. Regarding the propagation model, we used the free-space model. We assume that all nodes are required to transmit their data once in an interval of time determined by the end-user. Also, regarding the behavior of the RMC protocol, nodes determine the id of their next hop based on the current active phase.

To benchmark the proposed protocol, we compared its performance against the HEED protocol [17]. This protocol can not be directly used in a multi-hop communication paradigm. Therefore, for the fairness of the comparison, we facilitated the HEED protocol to use both, the GPRS [18] protocol and the AODV [19] protocol, to act as the routing protocols. In both cases, only the CHs are used for forwarding purposes. By investigating against two different routing protocols, we aim to underline the effect of decoupling routing and clustering on the network performance. Moreover, at the data link layer for HEED simulation, the MAC functionality is handled by 802.11 MAC protocol. For the rest of the paper, the acronyms HEED-Loc and HEED-Hop will be used to refer to the routing protocol in use, where Loc refers to the GPSR protocol and Hop to the AODV protocol. However, to ensure the fairness of the comparison, the effect of the collision in intra-cluster communications is eliminated.

#### 5. RESULTS AND DISCUSSIONS

Our underlying goal is to investigate the performance in terms of the energy consumption and the lifetime of the network. We define the lifetime of the network,

as the time until the first sensor node run out of energy. Also, we assume that the nodes are uniformly distributed across  $N \times N$  m<sup>2</sup> where  $N = 300$  m. The width and height of the horizontal clusters are 100 m. In HEED, the transmission ranges for the intra-cluster and inter-cluster are 60 m and 150 m. To balance the load, node degree is selected as the secondary parameter. The cluster round is selected to be 100 sec. In AODV and GPSR, the lifetime of any path is set to 100 ms. All the following experiments adopt these transceiver energy parameters:  $E_{elec} = 50$  nJ/bit and  $E_{fs} = 10$  pJ /bit/m<sup>2</sup>. We vary the sensing interval, number of nodes and radio range. The duration of each simulation experiment is 50 minutes. The shown results is the average of 50 runs and we draw 95% confidence intervals. From the earlier description, it might be obvious that RMC components are designed without any stochastic behavior. As a result, in the following experiments, its performance will be plotted without confidence interval since repeating the experiment has no effect on its behavior.

In Figure 5, for a network with 100 nodes, we show the impact of the sensing interval on the average energy consumption . It is evident that RMC is able to achieve substantial reductions in energy consumption compared to HEED-Hop and HEED-Loc. The major factor behind the difference between their behavior is the routing mechanism. HEED-Hop establishes the routing path among the CHs like a tree. However, in each cluster round upon CH re-election, the routing path needs to be re-established causing a significant overhead. Adopting such routing techniques in periodic-monitoring applications will most likely lead to congestion; this is due to high probability of having more merged paths at lower levels of the tree. On the contrary, HEED-Loc overcomes this problem by establishing routing paths depending on an individual node location. However, in each cluster round, HEED-Loc requires re-performing the new neighboring CHs discovery. RMC simplifies the routing process by establishing the CH communications based on cluster IDs. The identity and the proximity of a cluster remain the same in all cluster rounds. Therefore, due to the elimination of the routing protocol overhead, RMC is the most energy efficient protocol here.

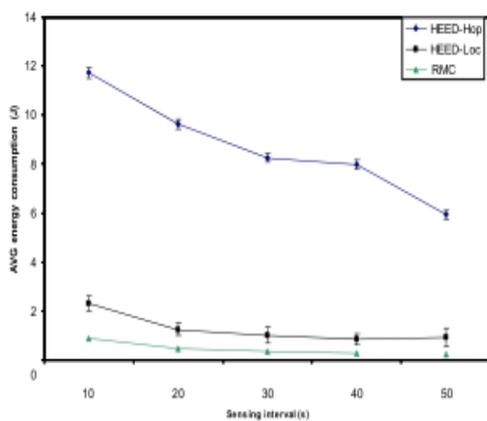


Figure 5: Average energy consumption against sensing interval

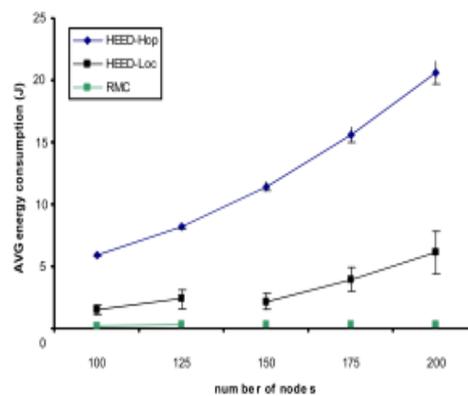


Figure 6: Average energy consumption against number of nodes

In contrast, Figure 6 shows the relationship between number of nodes and average energy consumption (sensing interval 50s). The results show that the RMC protocol constantly outperforms the other protocols. The RMC protocol achieves a near

constant energy usage compared to the exponential rise in energy dissipation for HEED-Hop and HEED-Loc. The key contributing factor in this situation is the adopted clustering mechanism. For HEED, the number of generated clusters is largely dependent on the number of nodes. Increasing the number of nodes raises the collision probability during the cluster setup phase. As a result, the number of generated clusters increases. This affects the performance by increasing the network traffic and the overhead of managing the routing protocol functionalities. In RMC, increasing the number of nodes only has minimal effect on its performance.

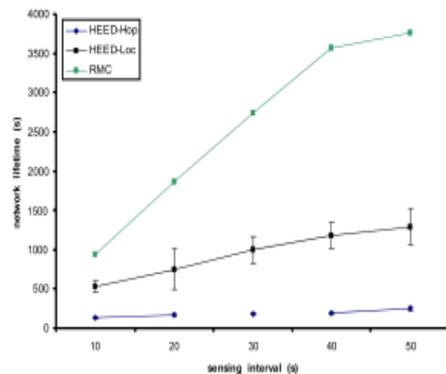


Figure 7: Network lifetime against sensing interval

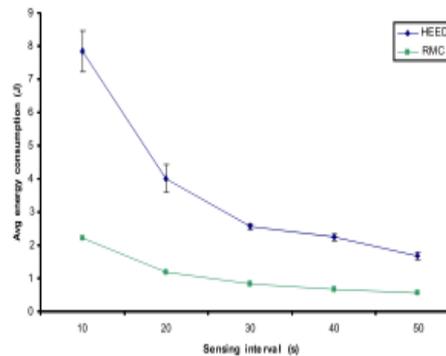


Figure 9: Average energy consumption against sensing interval for a single broadcast domain network.

To investigate how the sensing interval influences the lifetime of the network, we ran the simulation assuming each node is initially equipped with 2J. Figure 7 shows the results of this evaluation. For HEED-Hop and HEED-Loc, by increasing the network load it increases the collision probability. However, in HEED-Hop varying network traffic has a minimal impact on its network lifetime compared to HEED-Loc its lifetime improved considerably with reducing traffic. This behavior is mainly due to the high probability of congestion in HEED-Hop compared to HEED-Loc. In RMC, the static clustering in conjunction with the scheduling strategy works to significantly balance the load distribution. Therefore, besides eliminating collisions and simplifying routing, RMC substantially prolongs the network lifetime.

Figure 8 shows the impact of the number on the lifetime of the network. The sensing interval is set to 50s. from the results, we can see that increasing the number of nodes reduces the difference between HEED-Hop and HEED-Loc. As one would expect, this behavior is mainly due to the HEED mechanism. Increasing the number of nodes leads to increase in the number of generated clusters and therefore increases interference. RMC only experiences liner drop in its network lifetime against the exponential drop seen by the other schemes. This linear drop is due to the fact that by increasing the number of nodes, each node expends more energy due to overhearing, thereby reducing its performance.

All preceding experiments consider RMC’s performance in a multi-hop environment, whereas the following experiments evaluate RMC’s performance against HEED in a single-hop environment. This study aims to discover efficiency across a single broadcast domain with the routing impact discounted. Figure 9 shows the average energy consumption across the network while

varying the sensing interval. It is evident, that RMC outperforms HEED more significantly in heavy traffic compared to light traffic. Two facts contribute to this behavior. Firstly, the overhead involved in cluster setup for RMC is significantly lower than HEED. Secondly, HEED’s probabilistic CH election and tentative CH declarations are likely to produce more clusters than RMC. In light traffic, the major factor influencing HEED’s performance is the cluster setup overhead, whereas in heavy traffic, the larger number of generated clusters increases its energy consumption.

Finally, to investigate the impact of the sensing interval on the lifetime of the network, we ran the experiment, which fixing the sensors initial energy level to 2J. Figure 10 presents the results of this experiment, RMC is able to achieve an improvement of up to seven times compared to HEED. As expected, this behavior is mainly contributed RMC’s two-level-clustering scheme, which achieves good load balancing. Moreover, HEED typically has more number of clusters compared to RMC and therefore contributes to higher amount of network traffic.

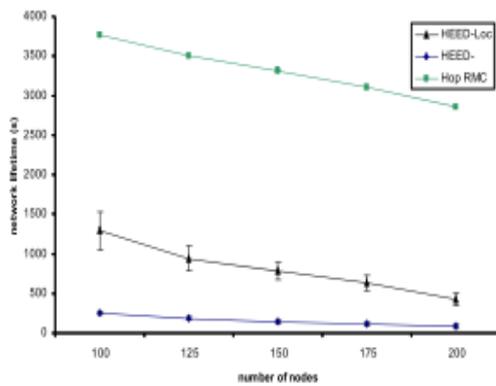


Figure 8: Network lifetime against number of nodes

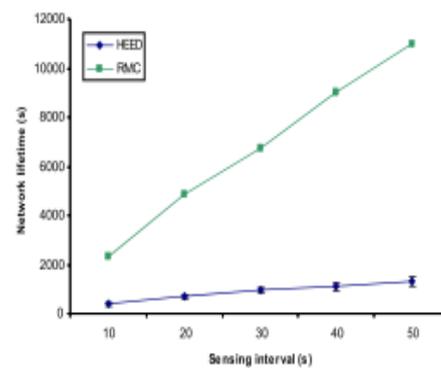


Figure 10: Network lifetime against sensing interval for a single broadcast domain network.

6. CONCLUSION

In this work, we presented an extended version of the cross-layer data gathering protocol RMC[1]. By simplifying the scheduling process as well as the routing mechanism, this protocol aims to eliminate the overhead, which is the result of considering the clustering, MAC, and routing protocol as separate components. Typically, the performance of the scheduling scheme is influenced by the topology structure. This occurs because changing the topology result in re-calculating the schedule. The RMC protocol eliminates this overhead by introducing a dependency relationship between the transmission schedule for each node and its location. RMC adopts two-level clustering with geographic-based routing in order to enhance the load distribution. It also provides the application with a mechanism to control the maximum network gathering time bound. The results show that presented protocol significantly improve the lifetime of the network.

REFERENCES

[1] K. Almiani, S. Selvakennedy and A. Viglas ‘RMC: An energy-aware cross-layer data-gathering protocol for wireless sensor networks’ Proceedings

- of IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), GinoWan, Okinawa, Japan, 410-417, 2008.
- [2] I.F. Akyildiz, W. Su, , Y. Sankarasubramaniam, , and E. Cayirci, A survey on sensor networks. *IEEE communication magazine*. 40 (8) , 2002, 102-114.
- [3] G. Pottie, and W. Kaiser, , *Wireless Integrated Network Nodes*, *Communication of the ACM*. 43 (5). 2009, 51-58.
- [4] L. Arboleda, and N. Nasser, , *Comparison of Clustering Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*. in *Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference on*, Canada, 2006, 1787 - 1792
- [5] S. Tilak , N. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 6(2), 2002, 28 – 36.
- [6] M. Sichitiu , *Cross-layer scheduling for power efficiency in wireless sensor networks*. in *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, (Hong Kong, Japan , 6, 2004, 1740 - 1750
- [7] J. Ding, K. Sivalingam and R. Kashyapa, A multi-layered architecture and protocols for large-scale wireless sensor networks. in *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th.*, 2010, 1443-1447
- [8] Y. Fang, and B. McDonald, *Dynamic Codeword Routing (DCR): A Cross-Layer Approach for Performance Enhancement of General Multi-hop Wireless Routing*. in *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*. Boston, MA, USA, 2004, 255 – 263.
- [9] H. Fei, A. Teredesai, and W. Hongyi, *Timing-controlled, low-energy data query in wireless sensor networks: towards a cross-layer optimization approach*, in *Networking, Sensing and control conference*. Arizona, USA, 2005, 1031-1036.
- [10] B. DeCleene, V. Firoiu, M. Dorsch, and S. Zabele, *Cross-Layer Protocols for Energy-efficient Wireless Sensor networking*,. in *Military Communications Conference*. New jersey, USA, 2005, 1102 – 1107.
- [11] L. Zadorozhny, V., Chrysanthis, and P. Krishnamurthy, *A Framework for extending the Synergy between MAC layer and Query Optimization in Sensor Networks*, in the *First International Workshop on Data Management for Sensor Networks*. Toronto, Canada, 68-77, 2004.
- [12] S. Kulkarni, A. Iyer, , and C. Rosenberg, *An address-light, integrated MAC and routing protocol for wireless sensor networks*. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 14 (4). 793 - 806 2006.
- [13] M. Mitzenmacher, and E. Upfal, *Probability and computing*. University of Cambridge, United Kingdom, 2005
- [14] A. Mainwaring, , D. Culler, J. Polastre, R., Szewczyk, and J. Anderson, *Wireless sensor networks for habitat monitoring*. in the *1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*. Atlanta, Georgia, USA, 88-97, 2002
- [15] A. Sobeih, , W-P Chen, J. Hou, L. Kung , N. Li, H. Lim, , H. Tyan, and H. Zhang, *J-Sim: A Simulation and Emulation Environment for Wireless Sensor Networks*, *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2006, 104 - 119
- [16] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler, *TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire tinyOS applications*. in the *1st ACM international conference on Embedded networked sensor systems*. Los Angeles, USA, 2003, 126 - 137

- [17] O. Younis, and S. Fahmy., Distributed Clustering for Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach. in INFOCOM. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Hong Kong, Japan , 2004, 366 - 379
- [18] B. Karp, Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. in MobiCom the Sixth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking , Boston, MA, 2000.
- [19] RFC3561, "Ad hoc On-demand Distance Vector(AODV) Routing," July 2003.