HAL
open science

Machiavel, un protocole d'accès au médium orienté mobilité et réseaux de capteurs

Romain Kuntz, Thomas Noël

To cite this version:

Romain Kuntz, Thomas Noël. Machiavel, un protocole d'accès au médium orienté mobilité et réseaux de capteurs. CFIP'2009, Oct 2009, Strasbourg, France. inria-00417787

HAL Id: inria-00417787

https://inria.hal.science/inria-00417787v1

Submitted on 16 Sep 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Machiavel, un protocole d'accès au médium orienté mobilité et réseaux de capteurs

Romain Kuntz — Thomas Noël

LSIIT - UMR 7005
Université de Strasbourg
Pôle API, Boulevard Sébastien Brant
67412 Illkirch CEDEX
{kuntz,noel}@unistra.fr

RÉSUMÉ. *Les réseaux de capteurs sans fil opèrent en environnements contraints. Aux limitations en termes d'énergie, de mémoire et de capacité de calcul s'ajoute la récente perspective d'utiliser des capteurs mobiles. Toutefois, peu de protocoles d'accès au médium prennent en compte la dynamique de tels scénarios. Dans ce papier, nous parlerons tout d'abord des problèmes potentiels qui peuvent survenir avec les protocoles actuels en environnement mobile. En prenant pour exemple le protocole B-MAC, nous nous pencherons plus particulièrement sur les difficultés de synchronisation entre capteurs statiques et mobiles, ainsi que sur les congestions dans les réseaux denses. Dans cette optique, nous présenterons Machiavel, une nouvelle méthode d'accès au médium qui permet aux noeuds mobiles de s'approprier le canal même en cas de forte compétition, tout en leur assurant d'être synchronisés avec leur voisinage. À l'aide d'une évaluation par simulation, nous montrerons les gains que peut apporter notre contribution par rapport à B-MAC.*

ABSTRACT. *Wireless sensor networks operate in constrained environments. In addition to the limitations in terms of energy, memory and computation, the use of mobile sensors has recently been contemplated. However, only a few medium access control protocols consider the dynamics of such scenarios. In this paper, we will first present potential problems that could arise with nowadays protocols operating in mobile environments. Through the example of the B-MAC protocol, we will particularly analyze the synchronization issues between static and mobile sensors, as well as congestion in dense networks. For that purpose, we will introduce Machiavel, a new method to access the medium. Machiavel allows mobile sensors to capture the channel even in networks with high contention, while guaranteeing the synchronization with their peers. An evaluation by simulation will demonstrate the benefits of our contribution compared to B-MAC.*

MOTS-CLÉS : *Réseaux de capteurs, mobilité, couche MAC, Machiavel, B-MAC, performances*

KEY WORDS: *WSN, mobility, MAC layer, Machiavel, B-MAC, performances*

1. Introduction

Voilà une décennie que les contraintes inhérentes aux réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks, WSN) attirent l'attention de la communauté scientifique. Ainsi, de nombreuses améliorations à différents niveaux de la pile de communication ont été proposées afin de relever les défis en termes d'économie d'énergie, de capacité de calcul et de contrainte mémoire imposés par l'utilisation d'équipements embarqués [AKY 02]. Parallèlement, la littérature rapporte plusieurs déploiements aux résultats prometteurs. Par exemple, le projet de surveillance de glacier SensorScope [ING 08] a permis de modéliser un micro-climat pour prévenir des coulées de boue.

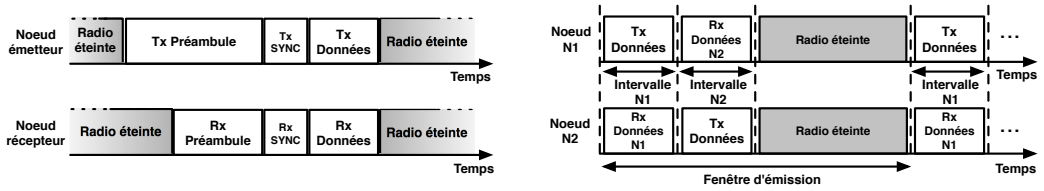
Les récentes avancées en termes d'intégration d'équipements et de protocoles de communication ont permis d'élaborer de nouveaux scénarios plus complexes. Ils mettent en scène des réseaux denses et dynamiques par l'utilisation de capteurs mobiles ou de différentes méthodes de collection de données. L'intérêt de la mobilité dans les WSN est multiple dans la mesure où les capteurs mobiles peuvent notamment permettre d'étendre la couverture d'un réseau, d'améliorer ses performances de routage ou sa connexité globale [DAN 05]. L'emploi de capteurs corporels en milieux médical tel que rapporté dans [SHN 05] illustre également ces possibilités. Toutefois, ces hypothèses apportent de nouvelles difficultés dans la conception de protocoles, notamment au niveau du contrôle de l'accès au médium (Medium Access Control, MAC).

Dans cette article, nous nous intéresserons donc à la problématique de la mobilité dans les WSN, et plus particulièrement à ce que cela implique au niveau MAC. Nous rappellerons notamment en section 2 les principales classes de protocoles MAC existantes dans les WSN. Nous identifierons ensuite en section 3 les problèmes soulevés par la mobilité, et en exposerons les solutions existantes les plus significatives. En prenant pour exemple le protocole B-MAC [POL 04], nous mettrons également en lumière les problèmes de synchronisation et de congestion qui peuvent survenir dans des réseaux denses et dynamiques.

Le rôle d'un capteur mobile peut s'avérer crucial dans certains scénarios, tels que la détection d'intrusion ou le suivi de cible. Il peut ainsi être nécessaire d'allouer une plus grande importance aux données qu'il transmet. C'est dans cette optique que nous avons élaboré le protocole *Machiavel*, une nouvelle méthode d'accès au médium pour capteurs mobiles. Machiavel permet notamment d'assurer une meilleure synchronisation du voisinage tout en réduisant les temps d'accès au médium. Les principes de ce protocole ainsi qu'une étude préliminaire de ses bénéfices seront présentés en section 4. Les perspectives qu'offre cette solution dans d'autres scénarios seront exposées en section 5, suivi de la conclusion en section 6.

2. Le contrôle d'accès au médium dans les réseaux de capteurs

Les contraintes imposées par les réseaux de capteurs sans fil ont poussé la communauté scientifique à proposer de nouvelles solutions d'accès au médium. Notamment, la réalisation d'une méthode de communication à faible coût énergétique a été jusqu'à présent l'un des défis les plus importants dans les WSN (comparé à la réduction des délais ou à l'équité dans les réseaux sans fil traditionnels). Les collisions, l'écoute involontaire (*overhearing*), l'écoute passive (*idle listening*) et l'utilisation de données de contrôle ont été identifiées comme sources principales de consommation d'énergie [DEM 06]. De nombreuses propositions ont ainsi vu le jour pour adresser ces problèmes.



(a) Les protocoles par échantillonnage utilisent un préambule avant l'envoi de données.

(b) Les protocoles à intervalles de temps reposent sur une synchronisation temporelle.

Figure 1. *Protocoles par échantillonnage et à intervalles de temps.*

Parmi les différentes fonctions d'une couche MAC, l'ordonnancement a notamment été le domaine de nombreuses améliorations. L'idée principale est d'éteindre la radio autant que possible tout en assurant la connexité entre les capteurs. Pour satisfaire cela, deux principales catégories de protocoles ont vu le jour : les protocoles par échantillonnage et les protocoles à intervalles de temps.

Les protocoles par échantillonnage (figure 1(a)) utilisent l'envoi d'un préambule et éventuellement d'un message SYNC avant les données. Chaque capteur présent dans le réseau allume périodiquement sa radio et écoute le médium. Si aucun signal n'est détecté, le noeud éteint sa radio. Si en revanche un préambule est décelé, le noeud reste éveillé afin de recevoir les données qui suivront. Le préambule sert ainsi à synchroniser un ensemble de noeuds afin de s'assurer qu'ils soient prêts à recevoir les données envoyées par l'émetteur du préambule. La longueur du préambule doit évidemment être supérieure à la période d'échantillonnage du médium. B-MAC [POL 04] est le protocole le plus connu basé sur cette idée. Les protocoles à intervalles de temps (figure 1(b)) s'organisent autour d'un horaire commun. Le temps est divisé en intervalles discrets, utilisés par les capteurs pour envoyer ou recevoir des données, ou pour éteindre leur radio. Les protocoles CSMA à intervalles tels que S-MAC [YE 04] ou IEEE 802.15.4 [IEE 06], ainsi que les protocoles TDMA (par exemple TRAMA [RAJ 03]) appartiennent à cette catégorie.

Toutefois, des problèmes peuvent apparaître lors de l'utilisation de ces protocoles en environnement mobile. Nous les détaillons dans la section suivante avec les principales solutions existantes.

3. Les défis liés à la mobilité

3.1. *Problèmes connus et solutions*

Les catégories de protocoles citées en section 2 rencontrent plusieurs difficultés lors d'une utilisation dans des réseaux dont la topologie est dynamique. Tout d'abord, les protocoles à intervalles de temps intègrent difficilement les capteurs mobiles dans leurs algorithmes d'ordonnancement de communication. Par exemple, la synchronisation périodique indispensable à S-MAC [YE 04] peut empêcher un capteur mobile d'émettre ou de recevoir des données si celui-ci ne connaît pas la période utilisée dans le cluster virtuel où il se situe. Pour cela, MS-MAC [PHA 04] étend S-MAC et propose d'ajuster la période de synchronisation en fonction de la mobilité des noeuds. En pratique, le niveau du signal reçu utilisé comme indicateur de mobilité n'offre toutefois pas une bonne précision.

Les protocoles à intervalles de temps de type TDMA s'accommodent difficilement de l'apparition de nouveaux capteurs. En effet, ils nécessitent de recalculer et de redistribuer les intervalles de temps à chaque changement topologique, afin de prendre en compte d'éventuels nouveaux participants dans les communications, ou de soustraire ceux n'étant plus à proximité. Afin de pallier ce problème, une solution telle que EMACs [HOE 04] permet aux capteurs d'offrir temporairement à d'autres noeuds les intervalles de temps qui leur sont attribués. Le nombre d'intervalles de la fenêtre d'émission étant borné, ce type de proposition reste toutefois difficilement extensible à de nombreux noeuds. Les protocoles par échantillonnage ne souffrent pas de cette limitation, car chaque noeud est en théorie libre de communiquer à tout moment sur le médium. Ils sont donc plus appropriés lors de changements topologiques. Dans la suite de ce papier, nous nous intéresserons donc plus particulièrement à cette deuxième catégorie de protocoles.

Les protocoles par échantillonnage posent néanmoins le problème de la synchronisation entre les capteurs statiques et mobiles. Dès lors qu'un capteur n'est pas toujours à portée du noeud émetteur du préambule, il est probable qu'il ne détecte aucun signal lors de l'échantillonnage du médium. En conséquence, sa radio sera éteinte lorsque le correspondant émettra ses données. Ce problème peut par exemple survenir lorsqu'un noeud mobile transmet un préambule tout en se déplaçant. L'envoi d'un préambule dans les protocoles par échantillonnage réduit de plus la disponibilité du canal et donc augmente la compétition entre les noeuds. En fonction de la fréquence de collection des données dans le réseau, les performances des capteurs mobiles peuvent décroître rapidement. Le protocole hybride MH-MAC [RAJ 08] propose ainsi de diviser la fenêtre d'émission en deux parties : une pour les noeuds statiques où l'accès est réalisé par un protocole de type TDMA, et une réservée aux mobiles utilisant une approche CSMA. Cette dernière solution soulève toutefois la question des communications entre noeuds mobiles et statiques, chacun utilisant une partie différente de la fenêtre d'émission. Bien que les auteurs ne le précisent pas, une topologie en cluster dont un noeud est toujours à l'écoute est certainement nécessaire.

Afin d'approfondir et de mieux apprécier les problèmes qui peuvent survenir avec un protocole par échantillonnage en environnement mobile, nous nous proposons d'évaluer plus en détail le protocole B-MAC dans la section suivante.

3.2. *L'exemple du protocole B-MAC*

Nous avons choisi de travailler avec B-MAC [POL 04] car il reste le protocole par échantillonnage de référence dans les réseaux de capteurs. La possibilité de configurer certains paramètres (comme la longueur du préambule ou l'utilisation d'acquittements) à travers des interfaces de configuration en fait un protocole versatile et approprié pour différents scénarios. Il a de plus déjà été utilisé avec succès dans des déploiements réels, comme rapporté par exemple dans [TOL 05].

Afin de mettre en lumière les problèmes que peut poser B-MAC en environnement mobile, nous avons choisi d'en développer une implémentation pour le simulateur de réseaux de capteurs WSNet[1]. En proposant entre autres divers modèles d'interférence et de modulation, ainsi que la possibilité de configurer avec précision le médium radio, WSNet permet de simuler les couches basses avec précision. Notre implémentation de B-MAC pour WSNet s'inspire d'une implémentation de référence

1. http ://wsnet.gforge.inria.fr (WSNet inclut notre implémentation de B-MAC depuis juillet 2009)

Paramètres de simulation	Valeurs
Topologie	carré (20x20m), disposition aléatoire des capteurs à chaque simulation
Nombre de capteurs mobiles	1
Nombre de capteurs statiques	10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400
Période d'envoi des données	capteur mobile : 1 sec.
	capteurs statiques : pas d'envoi, 4 sec., 2 sec., 1 sec.
Taille des données	18 octets
Modèle de mobilité	Billard, 1m/sec., point et direction initiaux aléatoires
Couche MAC	B-MAC, Low power listening, préambule de 100 msec.
Modèle radio	Half-duplex, débit 15 ko/sec.
Modèle d'antenne	Omnidirectionnelle
Modèle de propagation radio	Friis free-space, 868 Mhz, pathloss 2 (portée 4m)
Modèle de modulation	BPSK
Durée et nombre	100 sec., simulé 20 fois pour chaque combinaison possible

Tableau 1. *Paramètres de simulation dans le cadre de l'expérimentation B-MAC.*

disponible dans le système d'exploitation TinyOS[2]. Le scénario de simulation consiste en un capteur mobile se déplaçant dans un réseau dont la densité et les fréquences de communication des capteurs statiques augmentent progressivement. Tous les capteurs utilisent le protocole B-MAC pour accéder au médium. Les détails des paramètres de simulation sont reportés dans le tableau 1. Chaque couple *(nombre de capteurs, période d'envoi des données)* a été simulé vingt fois. Les résultats présentés sont une moyenne des données récoltées sur l'ensemble de ces simulations. L'intervalle de confiance à 95% calculé dans le tableau 2 indique la fiabilité de nos mesures.

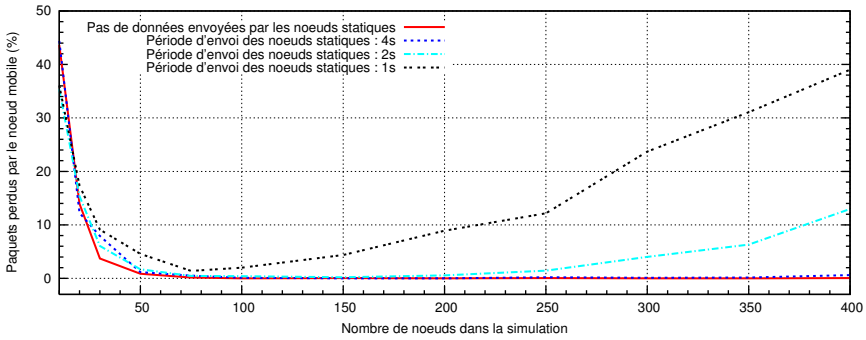


Figure 2. *Pertes de paquets d'un mobile utilisant B-MAC, en fonction de la densité du réseau.*

Nous avons tout d'abord calculé le taux de perte de paquets du capteur mobile, c'est-à-dire le pourcentage de paquets envoyés par le mobile au niveau applicatif et n'ayant été reçu par aucun noeud du voisinage à la fin de la simulation. Il est représenté en fonction du nombre de capteurs total sur la figure 2. Nous remarquons notamment un taux de perte supérieur à 10% lorsque le nombre de noeuds dans la simulation est faible (10 à 30 noeuds), ainsi que lorsque celui-ci est élevé (200 à 400

2. http ://www.tinyos.net

Nombre total de capteurs	*Pourcentage de paquets perdus*	*Intervalle de confiance à 95%*	*Raisons majeures (en pourcentage du total de paquets perdus)*				
			Pas de voisins	*En file d'attente*	*Collisions*	*Radio éteinte*	*Paquets non-capturés*
10	36.07	± 6.19	95.42	0.00	0.79	2.10	1.18
50	4.56	± 2.06	31.87	1.10	15.17	23.98	26.42
100	2.00	± 0.92	0.00	15.00	15.34	31.66	37.02
200	8.92	± 1.60	0.00	22.47	13.99	10.46	52.66
300	23.70	± 5.35	0.00	63.21	6.47	2.50	27.62
400	39.03	± 6.42	0.00	74.58	4.79	0.80	19.74

Tableau 2. *Principales raisons pour lesquelles les paquets du capteur mobile utilisant B-MAC sont perdus, lorsque la période d'envoi des données des noeuds statiques est de 1 sec. L'intervalle de confiance à 95% nous indique la fiabilité de l'ordre de grandeur du taux de perte calculé.*

noeuds) et que les communications dans le réseau sont fréquentes. Il existe plusieurs raisons pour lesquelles les paquets du capteur mobile ne sont reçus par aucun autre. Les principales sont résumées dans le tableau 2. Dans le premier cas, il s'avère que la densité du réseau n'est pas suffisante pour que le mobile soit toujours dans le voisinage d'autres capteurs lorsqu'il envoie ses données : les paquets sont naturellement perdus. Dans le deuxième cas, la majeure partie des paquets non-reçus en fin de simulation sont en fait encore dans la file d'attente de B-MAC.

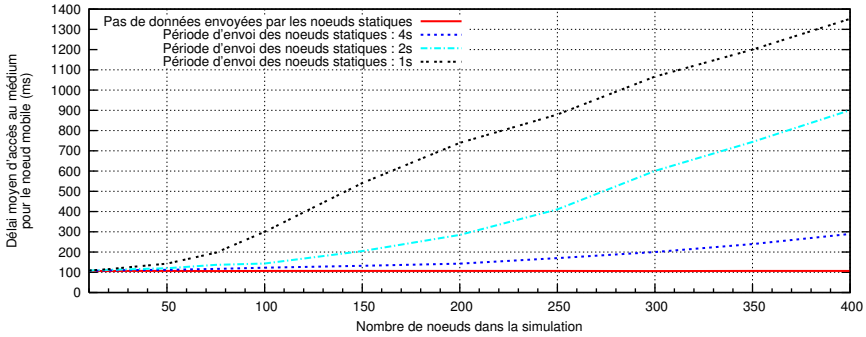


Figure 3. *Délai d'accès au médium d'un mobile avec B-MAC, en fonction de la densité du réseau.*

La figure 3 nous en révèle les raisons. Elle représente pour le capteur mobile le délai moyen d'accès au médium par paquet. À titre de référence, le cas ou aucun noeud statique n'envoie de données pendant la simulation nous donne la borne inférieure de ce délai. Il vaut environ 106 ms, soit la somme de la durée du préambule et du message SYNC (100 ms), du backoff (5 ms en moyenne), et de l'échantillonnage du canal (1 ms en moyenne). Nous remarquons que le délai d'accès au médium peut dépasser la fréquence d'envoi des données du noeud mobile au niveau applicatif (1 seconde dans notre environnement). Le niveau élevé de compétition dans le réseau est la cause de ce délai. Cela explique le fait que la file d'attente du mobile se remplisse plus vite qu'elle ne se vide. Ainsi, en fonction de la taille de la file d'attente, les paquets peuvent soit être jetés, soit fortement retardés. Notre réseau de 400 capteurs présente par exemple un taux de perte de 39%, dont près de 75% correspondent à des paquets non-envoyés et encore en file d'attente en fin de simulation.

Le tableau 2 indique également d'autres causes à ces pertes. Les collisions sont principalement dues au problème du noeud caché (nous n'utilisons pas de mécanisme de type RTS/CTS dans nos simulations). Le problème de radio éteinte illustre les soucis de synchronisation entre le noeud mobile et son voisinage, tel que nous le rapportions en section 3.1. Les paquets non-capturés correspondent à ceux dont la réception au niveau radio n'a pas pu être réalisée correctement : seulement une partie du paquet a été reçue, ou bien le signal n'était pas assez fort à réception.

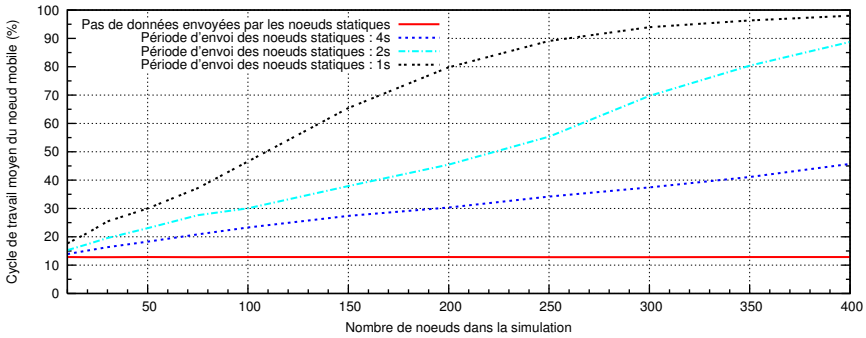


Figure 4. *Cycle de travail d'un mobile utilisant B-MAC, en fonction de la densité du réseau.*

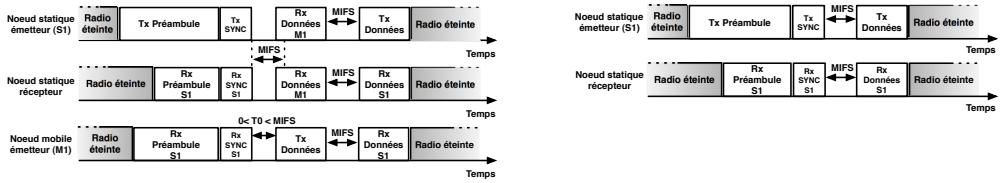
Un autre aspect intéressant à quantifier est le cycle de travail de la radio du capteur mobile. Il indique le taux d'utilisation de la radio et est rapporté sur la figure 4. Nous pouvons noter qu'en cas de fort trafic, le seuil des 30% est dépassé même à faible densité. Le fait que le capteur mobile ait constamment des données dans sa file d'émission en est une des causes principales. La batterie d'un capteur mobile devant alimenter à la fois le capteur mais peut-être aussi le système de mobilité, il serait intéressant d'essayer de réduire ce cycle de travail.

En résumé, nous avons identifié trois problèmes majeurs en environnement mobile. Tout d'abord, la synchronisation entre capteurs statiques et mobiles peut échouer. De plus, un délai d'accès au médium trop élevé peut saturer la file d'attente de paquets du mobile. En environnement peu dense, des pertes de paquets peuvent survenir lorsqu'aucun récepteur ne se situe dans l'entourage du mobile. Afin de remédier à cela, nous proposons le protocole Machiavel dans la section suivante.

4. Machiavel, un protocole d'accès au médium orienté mobilité

4.1. *Principes*

Afin de résoudre les problèmes soulevés en section 3.2, nous avons élaboré le protocole Machiavel. Nous nous sommes tout d'abord concentré sur les topologies denses. Nous reviendrons sur les problèmes des réseaux peu denses en section 5. Machiavel reprend les principes des protocoles par échantillonnage : le préambule suivi d'un court message SYNC envoyés par un capteur statique permettent de préparer les capteurs du voisinage à la réception des données. Machiavel utilise ce travail de synchronisation pour en faire bénéficier les capteurs mobiles, comme représenté sur la figure 5(a).



(a) Un noeud mobile souhaite émettre : il s'approprie le canal.

(b) Opération lorsqu'aucun noeud mobile ne s'approprie le médium.

Figure 5. *Machiavel en action.*

Lorsqu'un mobile souhaite envoyer des données, il échantillonne le médium. Si il ne détecte aucun signal, il suit la procédure standard (envoi d'un préambule, du SYNC puis des données). Si il détecte un préambule, il va pouvoir s'approprier le médium à la fin du préambule envoyé par le noeud statique. Pour cela, Machiavel spécifie un intervalle de temps (MIFS, Machiavel Inter-Frame Space) que le noeud statique doit respecter entre le préambule et ses données. Afin de limiter d'éventuelles collisions avec d'autres capteurs, le mobile tire un temps aléatoire *T0* compris 0 et MIFS. À expiration de ce délai, il échantillonne à nouveau le médium, et envoie ses données si le canal est toujours libre. Le capteur émetteur du préambule, ainsi que les capteurs situés dans le voisinage commun du mobile, reçoivent ces données. L'ensemble des récepteurs savent que d'autres données vont suivre tant que l'adresse source du paquet reçu ne correspond pas à celle du message SYNC. Avant de pouvoir éteindre leur radio, ils attendent donc un délai au moins équivalent à MIFS. Durant ce délai, d'autres noeuds mobiles peuvent envoyer leurs propres données suivant le même modèle que précédemment. Afin d'éviter que trop de mobiles ne monopolisent le médium, il peut être nécessaire d'en limiter le nombre pouvant successivement se l'approprier. Cela fera l'objet de travaux futurs, discutés en section 5. Si aucun autre noeud mobile n'émet à expiration du délai MIFS, le capteur à qui le canal a initialement été subtilisé peut envoyer ses propres données. A réception, l'ensemble des récepteurs éteint sa radio.

Dans le cas où aucun noeud mobile ne s'approprie le médium, les noeuds statiques se comportent de manière très similaire à un protocole par échantillonnage classique, à l'exception du délai MIFS situé entre le message SYNC et les données (figure 5(b)).

4.2. *Evaluation du protocole Machiavel*

Nous avons développé une implémentation de Machiavel pour WSNet. Les scénarios d'évaluation sont les mêmes que ceux utilisés pour B-MAC : nous avons repris l'ensemble des paramètres décrits dans le tableau 1, en remplaçant simplement la couche B-MAC par notre implémentation de Machiavel. Nous avons utilisé une valeur d'une milliseconde pour le délai MIFS.

Dans les figures suivantes, une des courbes d'évaluation de B-MAC est également indiquée à titre de comparaison. La figure 6 nous indique que le taux de perte a été réduit de manière significative par rapport à B-MAC dans le cas de réseaux denses. Il avoisine une valeur nulle, même dans les cas où les communications sont fréquentes. Cela signifie qu'une très grande majorité des paquets du

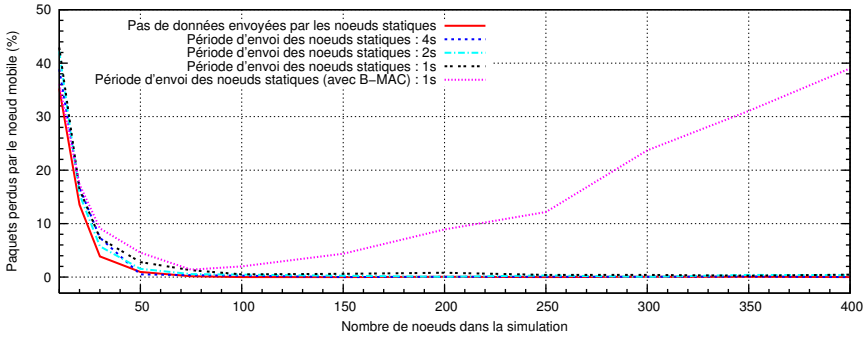


Figure 6. *Pertes de paquets d'un mobile utilisant Machiavel, en fonction de la densité du réseau.*

Nombre total de capteurs	*Pourcentage de paquets perdus*	*Intervalle de confiance à 95%*	*Raisons majeures (en pourcentage du total de paquets perdus)*				
			Pas de voisins	*En file d'attente*	*Collisions*	*Radio éteinte*	*Paquets non-capturés*
10	42.94	± 5.42	95.45	0.00	0.23	2.57	1.75
50	2.81	± 1.54	37.50	0.00	5.21	32.29	22.92
100	0.50	± 0.42	0.00	0.00	19.64	37.50	42.86
200	0.80	± 0.49	0.00	43.75	12.18	10.44	28.41
300	0.40	± 0.24	0.00	62.50	6.41	1.97	22.20
400	0.45	± 0.32	0.00	100.00	0	0	0

Tableau 3. *Principales raisons pour lesquelles les paquets du capteur mobile utilisant Machiavel sont perdus, lorsque la période d'envoi des données des noeuds statiques est de 1 sec.*

noeud mobile ont été reçus au moins une fois par un voisin. Lorsque le nombre de noeuds dans la simulation est faible, nous conservons toutefois un taux de perte équivalent à celui de B-MAC, pour les mêmes raisons qu'auparavant (pas de voisins, comme l'indique le tableau 3). Nous exposerons une méthode pour réduire ces pertes en section 5. Bien que le tableau 3 révèle encore des pertes en réseau dense dues aux collisions où à des problèmes de synchronisation, celles-ci se révèlent infimes si nous les confrontons au total de paquets perdus.

Une des principales raisons à la réduction de pertes de paquets exposée précédemment est la diminution du délai nécessaire au noeud mobile pour accéder au médium. Sa valeur moyenne est illustrée sur la figure 7. En permettant au mobile de s'approprier le médium, Machiavel lui donne l'opportunité d'envoyer ses données même si le niveau de compétition sur le canal est élevé. Le délai restant inférieur à la fréquence d'envoi du mobile (1 sec.), sa file d'attente ne se remplit pas. Nous pouvons même observer des délais plus petits que la borne inférieure calculée précédemment pour B-MAC (106 ms). Cela indique que le noeud mobile a réussi à s'approprier le médium dès le premier préambule capturé. Ce n'est pas toujours le cas, car nous observons que ce délai peut aussi être supérieur à la longueur du préambule. En effet, Machiavel ne s'approprie pas forcément le médium au premier essai : si celui-ci est occupé pendant le délai MIFS (par exemple dans le cas d'une collision entre deux noeuds statiques), le mobile n'envoie pas ses données et attend une nouvelle opportunité.

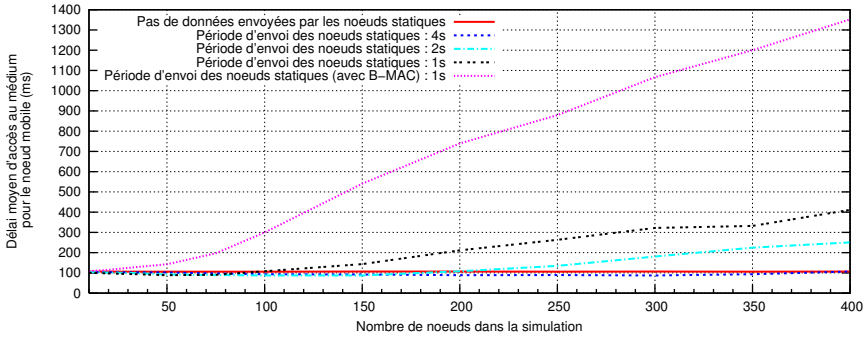


Figure 7. *Délai d'accès au médium d'un mobile avec Machiavel, en fonction de la densité du réseau.*

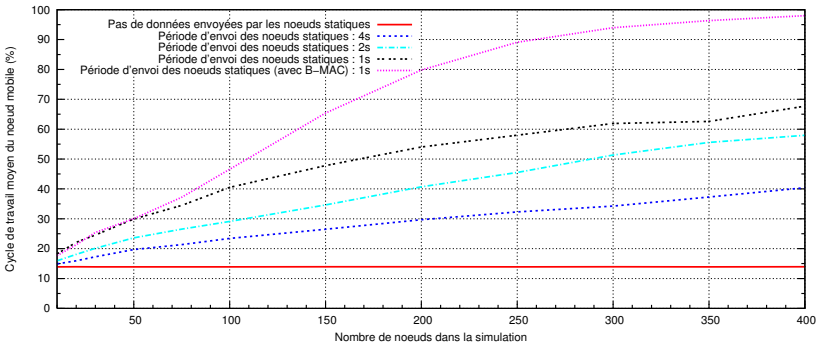


Figure 8. *Cycle de travail d'un mobile utilisant Machiavel, en fonction de la densité du réseau.*

Un effet direct de la réduction du délai d'accès au médium est la diminution du cycle de travail du capteur mobile. Nous observons en figure 8 que celui-ci peut-être réduit de près de 30 points par rapport à celui de B-MAC dans les environnements les plus denses. Il est néanmoins évident que Machiavel à un coût pour les noeuds statiques du réseau et augmente leur cycle de travail. Dans le cas où le médium n'est subtilisé par aucun noeud mobile, nous calculons le temps *Tm* nécessaire pour qu'un capteur statique envoie des données. Il est estimé en fonction du backoff *To*, du temps *Te* pour échantillonner le canal, du temps *Tp* nécessaire pour envoyer le préambule et le message SYNC, et du temps *Data* pour envoyer les données : $Tm = To + Te + Tp + MIFS + Data$. L'équivalent pour B-MAC est le temps *Tb* tel que : $Tb = To + Te + Tp + Data$. Ainsi, le coût supplémentaire *Cm* engendré par Machiavel sur les noeuds statiques par rapport à B-MAC est :

$$Cm = \frac{Tm - Tb}{Tb} = \frac{MIFS}{To + Te + Tp + Data}$$

En utilisant les valeurs de nos expérimentations (To = 5 ms en moyenne, Te = 1 ms, Tp = 100 ms, MIFS = 1 ms, Data = 1.2 ms), nous obtenons *Cm = 0.93%*. Dans le cas où le médium est subtilisé successivement par *N* capteurs mobiles, *Tm* est borné supérieurement selon la formule suivante :

$$Tm = To+Te+Tp+MIFS*(N+1)+Data*(N+1) = To+Te+Tp+(MIFS+Data)*(N+1)$$

Dans notre cas avec N = 1, nous obtenons un coût *Cm* équivalent à *2.98%*. Pour N = 5, nous avons *Cm = 11.2%*. Cela met en évidence le besoin de limiter le nombre d'envois successifs sur le médium. Nous noterons qu'en contrepartie le capteur mobile n'a plus besoin d'envoyer de préambule.

5. Perspectives

Les résultats préliminaires présentés en section 4.2 sont encourageants, mais il reste toutefois à évaluer Machiavel sur d'autres aspects. Tout d'abord, nous souhaitons étudier le comportement du protocole lorsque le ratio de noeuds mobiles augmente dans le réseau. Comme nous l'avons souligné, il sera peut-être nécessaire d'en limiter le nombre pouvant successivement s'approprier le médium, et d'ajuster la valeur du délai MIFS pour éviter les collisions entre mobiles. De plus, l'impact du protocole sur les noeuds statiques n'a pour le moment pas été évalué de manière exhaustive. Nous désirons enrichir l'évaluation avec une étude plus approfondie de son coût. L'impact de la vitesse du mobile et du modèle de mobilité nous semble également être un point important à considérer. Nous souhaiterions aussi étudier les effets de différents modèles de trafic dans le réseau. Nous n'avons pour le moment évalué le protocole qu'à un saut, il serait intéressant de connaître son impact sur plusieurs sauts. Enfin, une comparaison avec d'autres protocoles que B-MAC nous paraît aussi nécessaire.

Au niveau du protocole, nous souhaiterions également considérer les réseaux moins denses. Nous avons soulevé le problème des pertes de paquets lorsqu'aucun récepteur ne se situe à proximité du capteur mobile. Pour cela, nous envisageons d'utiliser une solution proche de X-MAC [BUE 06], qui divise le préambule en messages plus courts, et n'envoie les données que si l'un d'eux est acquitté par un récepteur. Nous désirons également étendre ces travaux pour les communications de mobiles à mobiles, et définir des interfaces de configuration telles que proposées par B-MAC pour faire de Machiavel un protocole pouvant être modifié par les couches supérieures.

6. Conclusion

Afin de répondre à la diversité des scénarios qui s'appliquent aux réseaux de capteurs tout en essayant d'en respecter les contraintes, une multitude de protocoles d'accès au médium ont vu le jour. Ces scénarios ont récemment été enrichis par l'utilisation de capteurs mobiles. Toutefois, peu de protocoles sont conçus pour gérer l'intégration de noeuds mobiles dans leur algorithme d'ordonnancement des communications. À l'aide de simulations, nous avons notamment soulevé deux problèmes peu considérés jusqu'à présent. D'une part, une mauvaise synchronisation entre capteurs mobiles et statiques peut résulter à des pertes de paquets plus importantes. D'autre part, un réseau dense et dont les communications sont fréquentes ne laisse que peu de place au mobile pour accéder au médium. Ceci est d'autant plus problématique selon l'importance des données du mobile.

Afin de minimiser ces deux problèmes, nous avons proposé le protocole Machiavel. À la différence d'un protocole par échantillonnage classique, Machiavel permet au noeud mobile d'envoyer ses données en étant assuré que ses voisins ont été correctement synchronisés. En réduisant les délais d'accès au médium, Machiavel permet également au noeud de ne pas saturer sa file d'attente. Une première évaluation du protocole nous a permis de démontrer ses bénéfices, notamment en réseaux denses où les pertes du mobile sont significativement réduites.

À moyen terme, nous souhaiterions également réduire les pertes de paquets occasionnées dans les réseaux moins denses, et considérer les communications de mobiles à mobiles. Une évaluation plus approfondie du protocole au niveau de l'impact sur les capteurs statiques ainsi que sur l'augmentation du nombre de capteurs mobiles nous donnera une meilleure vue globale des capacités de Machiavel. Une étude du protocole sur une plate-forme de capteurs nous permettra d'en mesurer le comportement en environnement réel. Pour cela, la plate-forme de capteurs déployée dans le cadre du projet Senslab[3] (plus de 1000 capteurs déployés sur 4 sites) nous fournira les moyens de valider notre protocole à très grande échelle.

7. Bibliographie

[AKY 02] AKYILDIZ I. F., SU W., SANKARASUBRAMANIAM Y., CAYIRCI E., « A Survey on Sensor Networks », *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, n° 8, 2002, p. 102–114.

[BUE 06] BUETTNER M., YEE G. V., ANDERSON E., HAN R., « X-MAC : a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks », *SenSys'06*, ACM, Octobre 2006, p. 307–320.

[DAN 05] DANTU K., RAHIMI M., SHAH H., BABEL S., DHARIWAL A., SUKHATME G. S., « Robomote : Enabling Mobility In Sensor Networks », *IPSN'05*, ACM, Avril 2005, p. 404–409.

[DEM 06] DEMIRKOL I., ERSOY C., ALAGOZ F., « MAC Protocols for Wireless Sensor Networks : A Survey », *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, n° 4, 2006, p. 115–121.

[HOE 04] VAN HOESEL L., HAVINGA P., « Poster Abstract : A TDMA-based MAC Protocol for WSNs », *SenSys'04*, ACM, Novembre 2004.

[IEE 06] IEEE, « Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) », Septembre 2006.

[ING 08] INGELREST F., BARRENETXEA G., VETTERLI M., « SensorScope, un système clef en main de surveillance de l'environnement », *CFIP'08*, Mars 2008.

[PHA 04] PHAM H., JHA S., « Addressing Mobility in Wireless Sensor Media Access Protocol », *ISSNIP'04*, Décembre 2004, p. 113–118.

[POL 04] POLASTRE J., HILL J., CULLER D., « Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks », *SenSys'04*, ACM, Novembre 2004, p. 95–107.

[RAJ 03] RAJENDRAN V., OBRACZKA K., GARCIA-LUNA-ACEVES J., « Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks », *SenSys'03*, ACM, Novembre 2003, p. 181–192.

[RAJ 08] RAJA A., SU X., « A Mobility Adaptive Hybrid Protocol for Wireless Sensor Networks », *CCNC'08*, IEEE, Janvier 2008, p. 692–696.

[SHN 05] SHNAYDER V., RONG CHEN B., LORINCZ K., FULFORD-JONES T. R. F., WELSH M., « Sensor Networks for Medical Care », *Technical Report TR-08-05*, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 2005.

[TOL 05] TOLLE G., POLASTRE J., SZEWCZYK R., CULLER D., TURNER N., TU K., BURGESS S., DAWSON T., BUONADONNA P., GAY D., HONG W., « A Macroscope in the Redwoods », *SenSys'05*, ACM, Novembre 2005, p. 51–63.

[YE 04] YE W., HEIDEMANN J., ESTRIN D., « Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks », *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, n° 3, 2004, p. 493–506.

3. http ://www.senslab.info