HAL open science

Systèmes répartis à grande échelle: de l'anarchie à l'auto-structuration

Gilles Trédan, Aline Viana

To cite this version:

Gilles Trédan, Aline Viana. Systèmes répartis à grande échelle: de l'anarchie à l'auto-structuration. Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP), Mar 2008, Les Arcs, France. hal-00250194

HAL Id: hal-00250194

https://hal.science/hal-00250194v1

Submitted on 11 Feb 2008

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.

Systèmes répartis de grande taille : – de l'anarchie à l'auto-structuration

Gilles Trédan[1] **et Aline C. Viana**[3]

[1] *Université de Rennes 1-IRISA, France*
[3] *INRIA Saclay - Ile de France sud, France*

RÉSUMÉ. *L'auto-structuration est une propriété très difficile à établir dans les réseaux de grande taille lorsque les entités n'ont accès à aucune information globale concernant le réseau qu'elles composent. Dans ce contexte, il est crucial de permettre aux entités de se positionner les unes par rapport aux autres. Ceci peut-être obtenu en définissant un système de coordonnées auquel les entités pourront se référer pour obtenir leur position. Un tel système fournit alors une brique de base pouvant être utilisée pour l'auto-structuration. Dans cet article, nous présentons un tel système de coordonnées : VINCOS. Ce système, léger et complètement décentralisé, repose uniquement sur l'exploitation de données locales et la communication entre entités voisines. C'est une grande différence par rapport à la plupart des approches existantes qui reposent soit sur des référentiels prédéfinis, soit sur des systèmes de positionnement auxiliaires. Des simulations montrent ensuite que cette approche est à la fois efficace et précise.*

ABSTRACT. *Self-structuring is extremely hard to achieve when no global information about the network is available. Yet, it is crucial in such contexts, that each node be able to infer its position with respect to the other nodes. One solution for this is to allow the nodes to access a coordinate system from which they can obtain a coordinate assignment. Such a coordinate system represents the basic layer on top of which adaptive behaviors can be designed. In this paper, we present the design and the evaluation of a simple lightweight and fully decentralized virtual coordinated system (VINCOS), which relies only on local connectivity information and per-neighbor communication. This is to oppose to most existing approaches relying either on pre-defined positioning referential or signal measurement. We also show how the VINCOS coordinates can be used to enable a large set of nodes to configure themselves in arbitrary geometric structures. The evaluation demonstrates that the approach is both efficient and accurate.*

MOTS-CLÉS : *Système autonomes, structuration géométrique, réseau auto-organisant, réseaux de capteurs, système de coordonnées virtuelles*

KEYWORDS: *Autonomous system, Geometric structuring, Locality, Self-organizing network, Sensor network, Virtual coordinate system*

1. Introduction

L'auto-structuration représente la capacité d'un système à créer un structure spécifique, en partant de rien, et sans apport d'information extérieure. C'est une dimension importante des systèmes autonomes, par exemple pour le passage à l'échelle [DOH 07]. La complexité d'un telle structuration dépend de la quantité d'information dont les entités (ou noeuds) disposent initialement. Nous définissons par *connaissance externe* l'information procurée aux noeuds par une entité ou un dispositif externe à celui-ci. A l'opposée, la *connaissance intrinsèque* est la connaissance que les noeuds établissent eux-mêmes par l'observation du réseau. D'un coté, l'utilisation de connaissance externe réduit l'autonomie du réseau, puisque son fonctionnement dépend alors d'une hypothèse supplémentaire : la disponibilité de cette connaissance. De l'autre, se baser sur de la connaissance intrinsèque renforce fortement l'autonomie du système, mais au prix de plus de communication. Ceci peu réduire considérablement l'espérance de vie du système. En résumé, l'autonomie d'un système est inversement proportionnelle à la quantité de connaissances extérieures qu'il faut lui apporter pour lui permettre de se structurer. Il est néanmoins crucial d'établir un bon compromis entre autonomie et coûts de communications.

Cet article propose un système adaptatif de coordonnées virtuelles pour les réseaux de capteurs (ou *VINCOS* pour VIrtual Networked COordinate System). Ce système constitue une brique de base pour la structuration du réseau, et compose ainsi le coeur d'un système autonome. La grande différence avec les travaux existants est qu'il ne repose sur aucune ancre, ne suppose aucun noeud conscient de sa position, et n'utilise aucun système de mesure du signal. Les noeuds obtiennent des coordonnées d'une manière complètement décentralisée. Pour cela ils exploitent uniquement des informations locales ou obtenues par communications entre noeuds voisins.

La suite de cet article est organisée ainsi : après avoir introduit notre modèle dans la section 2, nous présentons une étude des travaux semblables en section 3. VINCOS est décrit section 4. Sa performance est évaluée en section 6. Enfin, la section 7 conclut en présentant les perspectives de recherche.

2. Modèle

Nous nous concentrons sur les scénarios où la région surveillée ne permet pas d'intervention humaine. Pour des raisons de simplicité, l'analyse des coûts sera effectuée soit sur une distribution de noeuds uniforme dans une zone de forme rectangulaire, soit en supposant les noeuds répartis régulièrement sur une grille. Le principe demeure le même sur d'autres distributions. Dans le cas d'une grille de N noeuds, chaque rangée et colonne contient $\sqrt{N}$ noeuds.

Noeuds Le système est composé d'un ensemble fini de N capteurs répartis de façon uniforme sur une zone géographique[1]. Chaque noeud possède un identifiant unique i.

1. Une fois de plus, pour des raisons de simplicité, la distribution est supposée uniforme. Bien qu'il soit trop tôt pour affirmer que notre algorithme converge indépendament de la distribution, les simulations que nous avons effectué sur des distributions plus exotiques vont dans ce sens

Communication Chaque noeud peut communiquer avec tout autre noeud situé à portée radio, qui est modélisée par un disque de diamètre R. On suppose le réseau non partitionné et les communications bidirectionnelles.

Connaissance initiale Initialement, un noeud connait seulement son identité, le fait qu'il soit le seul à posséder cette identité dans le réseau, et un paramètre, d, définissant la dimension de l'espace de coordonnées.

3. Contexte

La communauté des réseaux sans fils propose une vaste littérature concernant les systèmes de positionnement [HOL 01, glo, BEN 06, BEN 07, CAP 01, BEN 05, CAR 05, BIS 04, SHA 03, NIC 03, GUS 03, DOH 01, RAO 03, MOS 04]. La majorité de ces approches reposent sur des hypothèses spécifiques (de la disponibilité d'informations GPS à la connaissance de l'angle d'arrivée du message radio), et témoignent de la nécessité d'une approche permettant plus d'autonomie. Cela fut traité dans certaines approches n'utilisant aucune *ancre* (noeud connaissant sa position). Il en résulte des *systèmes de coordonnées virtuelles* [RAO 03, MOS 04, BEN 06] (par opposition aux systèmes de coordonnées géographiques).

Ces travaux présentent clairement les enjeux et les solutions pour l'établissement de coordonnées virtuelles. Ces solutions sont cependant très coûteuses, tant en temps de calcul qu'en nombre de messages, et peu applicables aux réseaux de capteurs [RAO 03, MOS 04]. De plus, certaines de ces méthodes, bien que n'ayant pas recours aux ancres, requièrent l'utilisation de noeuds *bien placés* dans le système afin de servir comme noeuds de référence [MOS 04, BEN 06, BEN 07].

4. VINCOS : un système de coordonnées virtuelles économique

Les techniques présentées ici reposent sur des principes simples. Encore une fois, cette approche n'utilise que les capacités naturelles et intrinsèques des communications radio (connexité, nombre de messages reçus et observations de voisinage) pour *1)* identifier les zones denses du système, et *2)* utiliser ces zones denses pour détecter la périphérie (ou *bordure*) du système. Ces information peuvent ensuite être exploitées pour implémenter différentes fonctionnalités.

4.1. *Principe des coordonnées*

Le positionnement est une information clé dans la construction et le maintien de systèmes autonomes. Un système de coordonnées procure à chaque noeud une *position* qui est à la fois localement et globalement cohérente. Dans VINCOS, chaque noeud est configuré initialement avec un paramètre d : la dimension du système de coordonnées. Ainsi, les coordonnées virtuelles d'un noeud i sont représentées sous la forme d'un tuple $(x_1, \ldots, x_d)$, où x_j est la projection du noeud i sur le $j$ème axe de l'espace virtuel à d dimensions. L'unité de distance utilisée est le saut.

Cet espace virtuel est définit comme suit. La bordure de la zone géographique couverte par les noeuds est partitionnée en d "segments". Ces *segments de bordure* peuvent avoir soit la même taille, soit des tailles différentes[2]. Soit un axe $j, 1 \leq j \leq d$, du système de coordonnées. La coordonnée x_j est alors la distance, en sauts, du plus court chemin du noeud i au segment j (*i.e.* au noeud le plus proche appartenant au segment). La figure 1 illustre ceci : l'espace de coordonnées y est de dimension $d = 3$. Les coordonnées virtuelles de trois noeuds y sont portées : les coordonnées $(2, 4, 2)$ signifient que le noeud est à distance 2 des bordures 1 et 3, et à distance 4 de la bordure 2. Ce système ne nécessite ainsi pas d'ancre ou de noeud particulier.

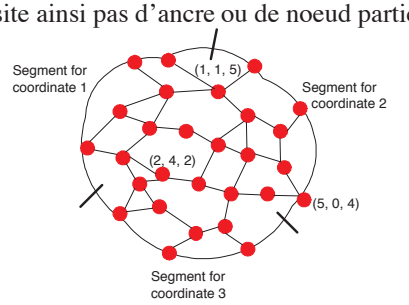


Figure 1. *Un exemple de coordonnées virtuelles.*

Les coordonnées de VINCOS dépendent d'une définition précise des segments de bordure, *i.e.* les d segments qui composent la bordure du système. Afin de définir de tels segments, VINCOS repose sur la construction d'une *ceinture* de processus autour du système qui épouse la bordure (les noeuds la bordure). Détecter quels sont les noeuds appartenant à la bordure de manière précise est difficile. Nous allons voir comment VINCOS calcule une telle *ceinture*.

4.2. *VINCOS : De l'anarchie aux coordonnées virtuelles*

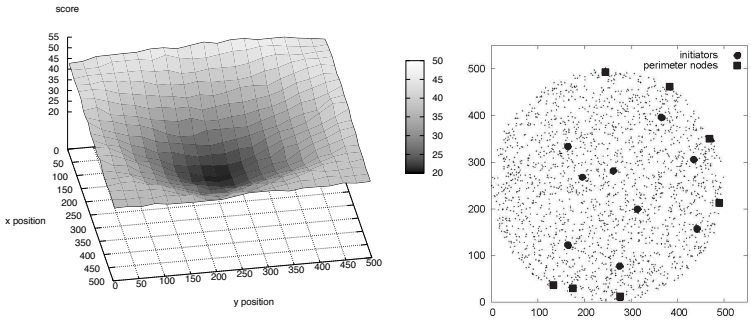
Afin de construire un système de coordonnées cohérent de façon décentralisée, VINCOS comporte quatre phases. Nous allons ici les détailler.

4.2.1. *Phase 1 : detection des initiateurs*

La première phase utilise les densités pour identifier un petit ensemble d'*initiateurs*. Ce sont des noeuds qui joueront un rôle important dans les phases suivantes.

Découverte des voisins Chaque noeud i émet un message contenant son identité. Ainsi chaque noeud i peut établir la liste des noeuds dans son voisinage : l'ensemble $neighbors_i$. Chaque noeud i émet ensuite son nombre de voisins, $|neighbors_i|$. Cela permet à chaque noeud d'apprendre le nombre de voisins qu'ont ses voisins.

2. Pour des raisons de simplicité, nous présenterons le cas où les segments sont de taille égale. La démarche est identique si les segments ont des tailles différentes



(a) (b)

Figure 2. *(a) Les noeuds de bordure ont un score plus élevé.(b) Initiateurs et initiateurs de bordure pour un réseau de* 2000*-noeuds.*

Découverte des initiateurs Un initiateur est définit comme un maxima local de densité. Ceci se traduit intuitivement par le noeud ayant plus de voisins que tous ses voisins. Formellement, un noeud i est initiateur s'il vérifie le prédicat suivant :

$$\forall j \in neighbors_i : \quad |neighbors_i| > |neighbors_j|. \qquad [1]$$

Puisque l'on suppose une densité uniforme, les noeuds sont supposés avoir un nombre de voisins proportionnel à l'aire du système présent à portée radio. Ainsi les noeuds de bordure, qui ont la moitié de leur disque radio hors du système, sont supposés avoir moitié moins de voisins que les noeuds dans le système. Ainsi, le prédicat 1 permet de sélectionner des voisins qui ne sont pas sur la bordure, ce qui a son importance pour les phases suivantes. Des simulations sur un grand nombre de scénarios ont montré que ce nombre reste bas (souvent 3,4 ou 5).

Complexité Le coût total de cette phase est de $2N$ messages, et la convergence est obtenue en 2 étapes.

4.2.2. *Phase 2 : définition du score de bordure*

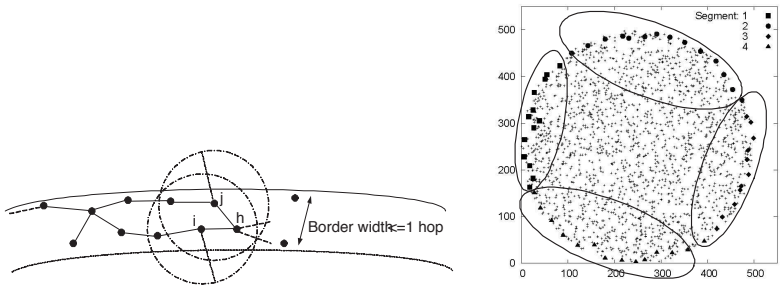
L'objectif est de procurer à chaque noeud un *score de bordure*, définit ensuite. Pour cela, chaque noeud détermine sa distance à chaque initiateur.

Calcul de la distance aux initiateurs Chaque initiateur i émet un message m contenant son identité et un compteur de sauts, initialisé à 0. Après avoir reçu le message m, et si m améliore sa distance à i, un noeud j incrémente le compteur de sauts de m et le réémet ; sinon il ne tient pas compte du message m. La distance d'un noeud j à un initiateur i est : $dist(i,j) = min\{dist(i,\ell)|\ell \in neighbors_j\} + 1$.

Le score de bordure La valeur, notée $score_j$, du *score de bordure* d'un noeud j est définie ainsi :

$$score_j = \sum_{i \in initiators} dist(i,j). \qquad [2]$$

Il est intéressant d'observer qu'en plus de connaître son score, chaque noeud connait aussi le score de ses voisins (puisque chaque noeud réémet les messages provenant des initiateurs). Ce score peut être vu comme la distance à un "initiateur moyen". La figure 2(a) représente, en échelle de gris, le score de chaque noeud en fonction de sa position. On peut constater que le minimum (*i.e.* le plus proche de l'initiateur moyen) est situé au centre du système.



(a) (b)

Figure 3. *(a) Les voisinages des noeuds i et j s'intersectent, ce qui permet au noeud h de ne pas croire qu'il a reçu des sondes provenant de côtés différents. (b) Les 4 segments définis pour un réseau de 2000 noeuds.*

Quelques noeuds de la bordure Le deuxième objectif de la phase 2 est de découvrir quelques noeuds qui sont *de facon certaine* sur la bordure. Nous les appellerons *initiateurs de bordure*. Ces noeuds sont les noeuds responsables de l'initiation de la construction de la ceinture, lors de la phase 3. Un noeud j se découvre en bordure par rapport à un initiateur i s'il vérifie le prédicat suivant :

$$\forall \ell \in neighbors_j : \quad dist(i,j) \geq dist(i,\ell). \qquad [3]$$

Soit x un pourcentage d'initiateurs. Le protocole considère qu'un noeud est initiateur de bordure s'il est en bordure par rapport à $x\%$ d'initiateurs. Autrement dit, un noeud est initiateur de bordure s'il vérifie le prédicat 3 pour $x\%$ initiateurs. Nous avons expérimentalement constanté que $x = 60\%$ permettait un bon compromis entre faux positifs (noeuds détectés à tort comme en bordure) et faux négatifs (noeuds non détectés comme en bordure). La figure 2(b) illustre un exemple de sélection d'intiateurs et d'initiateurs de bordure.

Complexité Pour N noeuds et y initiateurs, cette phase a un coût en communication de $O(y * N)$ messages. Si l'on considère les noeuds répartis régulièrement sur une

grille, le temps de cette phase est proportionnel à la distance maximale entre deux noeuds du réseau, soit $\sqrt{2N}$ (la diagonale de la grille).

4.2.3. *Phase 3 : Construction de la ceinture*

Cette phase est le coeur de VINCOS. L'objectif est d'établir une liste de noeuds qui appartiennent tous à la bordure. Cette liste est une structure mono-dimensionnelle, ce qui facilitera son exploitation ultérieure. La détection d'une telle bordure est complexe s'il faut à la fois un coût raisonnable et peu de faux positifs/négatifs.

Lancement des sondes Chaque initiateur de bordure identifié à la phase précédente envoie un message, appellé *sonde*, qui va "coller" à la bordure du système en s'appuyant sur les scores de bordure.

Transmission de la sonde Une sonde contient deux ensembles de noeuds : $destinators$ et $exclude$. Un noeud i considère qu'il reçoit une sonde ssi l'ensemble $destinators$ de la sonde contient i. Rappelons que chaque noeud connait son score de bordure, et le score de tous ses voisins. Lorsque le noeud i reçoit une sonde, il sélectionne k candidats à qui il va relayer la sonde (k est un paramètre de l'application). Ces k noeuds sont les noeuds ayant **le score de bordure le plus élevé** parmi l'ensemble $candidates_i$ tel que : $candidates_i = neighbors_i - (destinators \cup exclude)$.

Ces k noeuds constituent l'ensemble $destinators$ de la sonde que i va émettre. L'ensemble $exclude$ de la sonde émise par i est l'ensemble $destinators$ de la sonde que i a reçu. La sonde n'étant relayée que par les noeuds ayant un score de bordure localement maximal, elle va "coller" la bordure.

Chaque sonde contient aussi un champ $path$, qui contient la liste des noeuds qui ont relayé la sonde : chaque noeud relayant la sonde y ajoute son identité. Enfin, chaque sonde contient aussi la liste des voisins du deuxième noeud la relayant. Cette liste est appelée $stamp$. Elle sert à identifier de manière unique chaque "coté" de la ceinture : deux sondes pourraient emprunter le même coté de la bordure avec des chemins différents (voir Figure 3(a)), mais l'intersection de leurs champs $stamp$ serait alors non nulle.

Définition des segments Lorsqu'un noeud j reçoit deux sondes issues du même initiateur de bordure, il vérifie que ces deux sondes ont des chemins et des champs $stamp$ différents. Si c'est le cas, l'union des champs $path$ des deux sondes est une ceinture du système. Le noeud j, alors appelé *définisseur de segment*, va découper cette ceinture en d segments, et émettre un *message de segment* contenant la liste des noeuds composant chaque segment. Ce message de segment va alors emprunter le chemin inverse, relayé par les noeuds de la ceinture. Chaque noeud relayant un tel message apprend alors à quel segment il appartient (voir figure 3(b)).

Combattre l'ambiguïté Un mécanisme de propagation-extinction est utilisé sur les identités des initiateurs de bordures afin de ne garder qu'une segmentation pour tout les système.

Complexité Le temps nécessaire est proportionnel au nombre de noeuds de la ceinture, soit $4\sqrt{N}$ dans le cas de la grille. Le coût en message est de $z * 4\sqrt{N}$, où z est le nombre d'initiateurs de bordure.

4.3. *Phase 4 : Définission des coordonnées*

Obtention des coordonnées Lorsqu'un noeud de la ceinture a appris à quel segment s auquel il appartient, il émet un message contenant ce numéro s et un compteur de sauts initialisé à 0. Ces messages sont relayés et utilisés par tous les noeuds pour découvrir à quelle distance ils sont de chaque segment de bordure. Chaque noeud i possède finalement un enssemble de coordonnées $(x_1, \ldots, x_d)$ dans l'espace de coordonnées d-dimensionnel.

Complexité Après définition des segments, d types de messages différents se propagent à travers le réseau. Chaque noeud ne relaie qu'un message par numéro de segment (celui qui a le plus petit compteur de sauts). Le coût en messages de cette phase est donc de $d \times N$. Les d messages se propagent simultanément, le temps de convergence est donc de $\sqrt{2N}$ étapes.

5. Des coordonnées virtuelles à la structuration géométrique du réseau

Les coordonnées sont principalement utilisées pour faire du routage. Elles présentent selon nous bien d'autres intérêts. Elles constituent entre autres un outil puissant d'organisation du réseau. Une contribution de cet article consiste à présenter comment les exploiter à de telles fins.

Afin d'organiser un réseau, il est intéressant de pouvoir assigner aux noeuds différents comportements selon leur position. Bien que ce soit possible en utilisant n'importe quel système de coordonnées, nous montrons ici qu'il est possible de le faire en utilisant les coordonnées assignées par VINCOS. L'objectif ici est d'utiliser les coordonnées VINCOS afin de faire émerger une structuration géométrique du réseau. Il sera ensuite possible d'utiliser cette structuration à de multiples fins : clustering, aggrégation de données, gestion des consommations d'énergie. Une fonction de structuration géométrique est une fonction transformant des coordonnées en un numéro de partition. Formellement, soit $\mathcal{K}$ l'espace des coordonnées (avec VINCOS, $\mathcal{K} = \mathbb{N}^d$), et p le nombre de partitions différentes souhaitées, alors une fontion de structuration géométrique est une fonction f telle que :

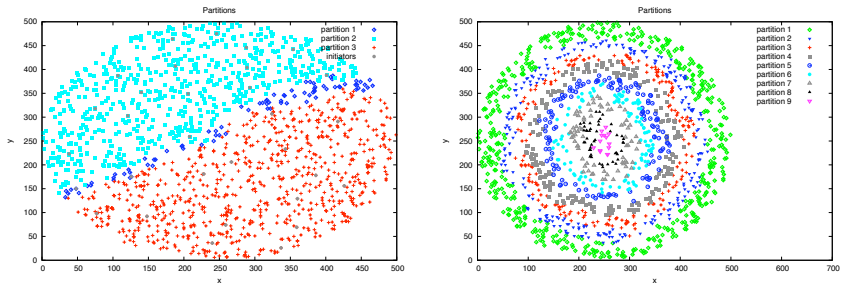
$$\begin{array}{lcl} f : \mathcal{K} & \rightarrow & \{0, \ldots, p\} \\ f(c_i) & \rightarrow & p_i. \end{array}$$

Une telle définition permet à un noeud de calculer le numéro de partition de n'importe quel noeud dont il connait les coordonnées : *chaque noeud a une idée de la structuration du système*.

Prenons un example : un ensemble de capteur disséminés sur une grande zone. On assigne trois groupes à ces capteurs : *Nord*, *Sud* et *Equateur*. Le groupe Equateur est une “ligne droite de noeuds” qui marque la séparation entre les groupes Nord et Sud. Considérons une application où les capteurs doivent collecter et rassembler de l’information (via un protocole de routage). Les capteurs envoient l’information au groupe Equateur. Ainsi, périodiquement, un avion survole la ligne Equateur pour collecter toute l’information. Obtenir un tel partitionnement en trois groupes est facile. Soit (x_1, x_2) les coordonnées VINCOS ($d = 2$) d’un noeud i. La fonction de structuration est alors (voir figure 4(a)) :

$$\begin{array}{lcl} f : \mathbb{N} * \mathbb{N} & \rightarrow & \{1, 2, 3\} = \{South, Equator, North\} \\ f(x_1, x_2) & \rightarrow & \left\{ \begin{array}{lll} 1 & when & x_1 > x_2 \\ 2 & when & x_1 = x_2 \\ 3 & when & x_1 < x_2 \end{array} \right. \end{array}$$

Un autre partionnement géographique est “la cible” (voir figure 4(b)). C’est une structuration facile à obtenir avec VINCOS et ne nécessitant qu’un segment ($d = 1$). La fonction f permettant de l’obtenir est alors l’identité : chaque noeud a pour numéro de partition sa distance en sauts à la bordure la plus proche.



(a) (b)

Figure 4. *(a)-(b) Exemples de structuration géométrique.*

6. Evaluation des performances

Cette section décrit les expériences que nous avons effectué pour attester l’efficacité et la précision de nos propositions. Les expériences ont été conduites avec un simulateur discret écrit en Java. Nous sommes intéressés par l’évaluation algorithmique du protocole, aussi le simulateur n’implémente pas une couche Mac et un modèle de communication réaliste, mais une version simplifiée sans perte de messages, ni collisions[3].

3. Nous pensons que les pertes et les collisions, bien qu’impactant le temps nécessaire, n’empêcheraient pas la convergence du protocole. Etudier leur impact en détail constitue une direction de recherche

Nous simulons des réseaux comportant 250 à 2600 noeuds. Ces noeuds sont distribués sur une zone $2d$ de 500×500 unités de distance. La zone de portée radio est un disque dont le diamètre varie de 30 à 50 unités de distance.

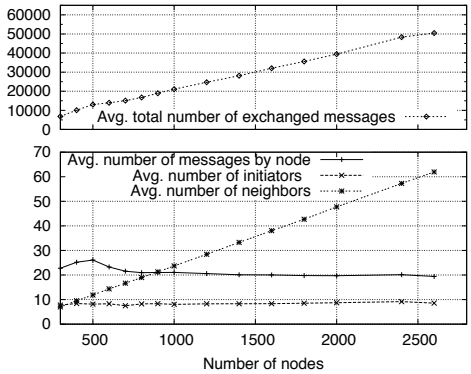
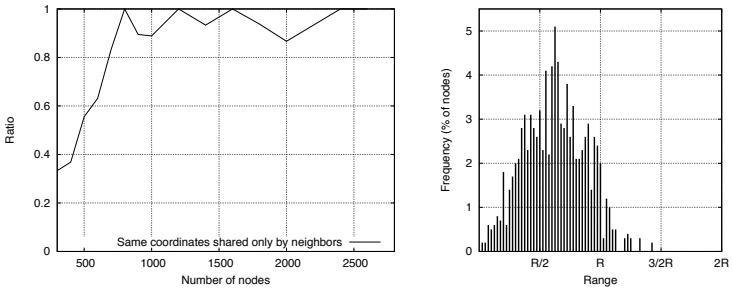


Figure 5. *Analyse du coût en fonction de la taille du réseau, pour* $d = 4$*, portée radio de 40-unités.*

Coûts de communication Le coût total de communication de VINCOS est $O((2 + y + d) * N + 4 * z\sqrt{N})$, avec N le nombre total de noeuds, y et z les nombres d'initiateurs et d'initiateurs de bordure, resp., et d le nombre de dimensions du système de coordonnées.



(a) (b)

Figure 6. *(a) Ratio des simulations ayant conduit à des systèmes précis. (b) Histograme des distances entre noeuds homonymes dans un système non précis de* 1000 *noeuds.*

La figure 5 confirme le résultat théorique : le coût d'exécution de VINCOS par noeud est bas, et indépendant de la taille du réseau. On peut observer que malgré les variations de taille du réseau et de densité, le nombre d'initiateurs reste stable et bas. De plus, même si le nombre total de message augmente avec la taille du réseau, le

coût par noeud décroît légèrement à mesure que le système croît. Ceci est dû au fait que le nombre de messages échangés par les noeuds internes reste constant et faible, mais que leur proportion dans le système augmente. Ainsi plus le système comporte de noeuds, plus la proportion de noeuds de bordure baisse au profit des noeuds internes. Or ce sont les noeuds de bordure qui génèrent la majorité des messages échangés. Donc le coût moyen par noeud baisse[4].

Précision Bien que le routage ne soit pas l'objet de cet article, il est intéressant d'observer la précision de VINCOS. Il est reconnu [BEN 06] qu'un système de coordonnées précis permet un routage glouton efficace. Afin d'observer cette précision, et par conséquent les capacités de routage de VINCOS, nous avons étudié la répartition des noeuds partageant les mêmes coordonnées.

Nous appellerons *système précis* un système vérifiant l'assertion : "si deux noeuds partagent les mêmes coordonnées alors ils sont voisins". Notons qu'un système précis permet un bon routage glouton, puisqu'un message arrivant aux coordonnées finales est arrivé à destination.

Nous avons effectué 20 expériences indépendantes pour différentes tailles de système, et une portée radio de 50 unités de distance. La figure 6(a) montre, en fonction de la taille du système simulé, quel est le ratio des expériences ayant memé à un système précis. On peut observer que, pour certaines tailles, tous les systèmes simulés étaient précis. Pour une taille de 1000 noeuds, 90% des systèmes sont précis.

La figure 6(b) montre le détail d'un système de 1000 noeuds qui n'est pas précis. Afin de montrer qu'une grosse partie du système est tout de même précise, cette figure représente la répartition des distances physiques entre des noeuds partageant les mêmes coordonnées (des *homonymes*). R est la portée radio (ici, $R = 50$), donc les homonymes distants de plus de R unités ne sont pas voisins. Ainsi, on peut y lire que $3,2\%$ des homonymes sont distants de $R/2$ unités. On observe que la majeure partie des homonymes sont voisins, et qu'il n'y a pas d'homonymes distants de plus de $3/2 \times R$. On peut conclure que, même si tous les homonymes ne sont pas voisins, la majeure partie le sont, et qu'un routage glouton dans un tel système ne poserait pas de problèmes.

7. Conclusion

Cet article a présenté un algorithme, *VINCOS*, qui assigne des coordonnées virtuelles aux noeuds, et montré que l'exploitation de ces coordonnées permet de structurer un réseau. VINCOS repose sur des hypothèses très faibles (les noeuds ont des identités distinctes et comparables), et ne nécessiste aucune ancre ou système de mesure de signal. Il est de plus très économique et complètement décentralisé. La contribution clé dans VINCOS est l'algorithme de détection de bordures. C'est lui qui assure la construction économique d'un système de coordonnées fiables. Les simulations attestent de la précision de ce système. Il serait intéressant d'étudier le cas de systèmes

4. Ce n'est pas le cas dans [RAO 03], puisque chaque noeud de bordure inonde le réseau

aux frontières plus singulières, et d'explorer de manière plus approfondie les possibilités de la structuration géométrique pour des applications particulières.

8. Bibliographie

[BEN 05] BENBADIS F., FRIEDMAN T., AMORIM M. D., FDIDA S., « GPS-free-free positioning system for sensor networks », *Proc. of WOCN*, avril 2005.

[BEN 06] BENBADIS F., PUIG J.-J., AMORIM M. D., CHAUDET C., FRIEDMAN T., SIMPLOT-RYL D., « JUMP : Enhancing hop-count positioning in sensor network using multiple coordinates », rapport, avril 2006, TR arXiv cs.NI/0604105.

[BEN 07] BENBADIS F., OBRACZKA K., CORTÈS J., BRANDWAJN A., « Exploring landmark placement strategies for self-organization in wireless sensor networks », *Proc. of IEEE PIMRC*, septembre 2007.

[BIS 04] BISCHOFF R., WATTENHOFER R., « Analyzing connectivity-based, multi-hop ad hoc positioning », *Proc. of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM)*, mars 2004.

[CAP 01] CAPKUN S., HAMDI M., HUBAUX J.-P., « GPS-free positioning in mobile ad hoc networks », *Proc. of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, janvier 2001.

[CAR 05] CARUSO A., CHESSA S., DE S., URPI A., « GPS free coordinate assignment and routing in wireless sensor netwoks », *Proc. of IEEE Infocom*, mars 2005, p. 150–160.

[DOH 01] DOHERTY L., PISTER K. S. J., GHAOUI L. E., « Convex position estimation in wireless sensor networks », 2001, p. 1655–1663.

[DOH 07] DOHLER M., WATTEYNE T., BARTHEL D., VALOIS F., LU J.-L., « Kumar's, Zipf's and Other Laws : How to Structure an Optimum Large-Scale Wireless (Sensor) Network ? », *13th European Wireless Conference*, Paris, France, avril 2007.

[DOL 00] DOLEV S., « *Self-stabilization* », The MIT Press, 2000.

[glo] « The Glonass positioning system », `www.glonass-center.ru/`.

[GUS 03] GUSTAFSSON F., GUNNARSSON F., « Positioning using time-difference of arrival measurements », *Proceedings of ICASSP*, 2003.

[HOL 01] HOLFMANN-WELLNHOF B., LICHTENEGGER H., COLLINS J., « *Global Positioning Systems : Theory and Practice* », Springer, 5th edition, 2001.

[MOS 04] MOSCIBRODA T., O'DELL R., WATTENHOFER M., WATTENHOFER R., « Virtual Coordinates for Ad hoc and Sensor Networks », *Proc. of Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing (DIALM-POMC)*, octobre 2004.

[NIC 03] NICULESCU D., NATH B., « Ad Hoc Positioning System APS using AoA », *Proc. of IEEE Infocom*, mars 2003.

[PEA 80] PEASE L., SHOSTAK R., LAMPORT L., « Reaching Agreement in Presence of Faults », *Journal of the ACM*, vol. 27, n° 2, 1980, p. 228–234.

[RAO 03] RAO A., RATNASAMY S., PAPADIMITRIOU C., SHENKER S., STOICA I., « Geographic Routing without Location Information », *Proc. of ACM Mobicom*, avril 2003.

[SHA 03] SHANG Y., RUML W., ZHANG Y., FROMHERZ M., « Localization from mere connectivity », *Proc. of ACM Mobihoc*, juin 2003.