Recherche décentralisée de connexité pour réseaux de capteurs mobiles

Merwan Achibet

Introduction

On traite le problème suivant : un groupe de n capteurs mobiles est réparti aléatoirement dans un espace aérien. On part de l'hypothèse qu'un capteur connaît uniquement le nombre total de capteurs du système et qu'il est assez sophistiqué pour pouvoir déterminer précisément sa position absolue. Les capteurs sont dotés de matériel de communication sans fil et peuvent s'envoyer des messages à condition que la distance les séparant soit inférieure à leur rayon d'émission R_c.

Le réseau constitué par cet essaim d'appareils volants forme un graphe dynamique dont les nœuds sont les capteurs. Deux nœuds sont reliés par un arc si les capteurs qui leur sont associés sont en mesure de communiquer, c'est à dire s'ils sont assez proches. La figure 1 décrit un exemple de scénario impliquant trois capteurs.

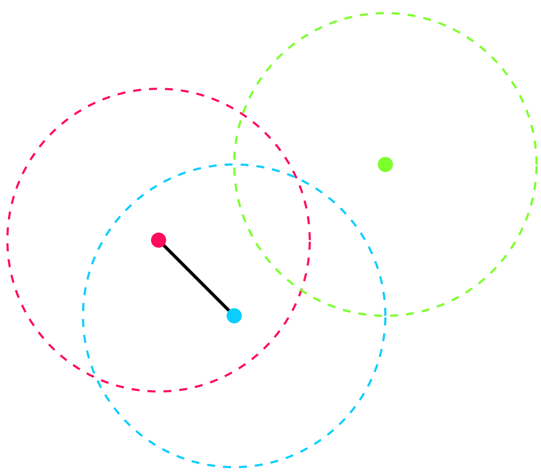


Figure 1 – Les capteurs rose et bleu peuvent communiquer et sont connectés tandis que le capteur vert est isolé.

On considère un capteur comme un agent autonome capable de se mouvoir dans l'espace. Afin de ne pas se préoccuper de considérations géométriques superflues, il est supposé qu'un capteur conserve toujours la même altitude et donc on limite son déplacement à deux dimensions. La contrainte principale de cet exercice est que l'on refuse toute forme de contrôle global sur l'essaim de capteurs. Toutes les actions entreprises par un appareil seront uniquement dues à ses décisions propres et dépendront de la vue réduite du système dont il dispose.

La possibilité pour un capteur de communiquer avec ses semblables est au centre de nos préoccupations car on considère qu'un capteur isolé est inutile puiqu'incapable de partager des données. Dans le contexte de l'étude décentralisée d'un graphe dynamique, deux questions se posent :

1. Comment déterminer si le réseau de capteurs est connexe ?
2. Comment déplacer les capteurs de façon à ce qu'il le devienne ?

Pour répondre à la première question, on se concentre sur les communications de capteur à capteur en proposant une méthode pour laquelle chaque agent diffuse sa vision de la connexité du réseau, étiquettée en fonction de la date de chaque information et de son origine. Un mécanisme de filtrage autorégulant sera mis en place pour répandre les informations critiques telles que l'ajout d'un nouveau nœud à une composante connexe et stoppant la diffusion d'informations erronées.

La réponse à la seconde question s'attache à l'aspect mobile d'un capteur. On propose une méthode décentralisée de guidage se basant sur l'imitation de plusieurs lois physiques de la nature afin de former un maillage à la fois connexe, équilibré et étalé dans l'espace. Finalement, on envisage une extension de ce système pour permettre aux capteurs d'éviter naturellement les obstacles.

1 Déterminer si le réseau est connexe

Dans cette section, on se place du point de vue d'un capteur c et l'on considère que le réseau est connexe lorsque c le pense connexe.

Les capteurs étant mobiles, le réseau de communication qu'ils forment est hautement dynamique et des événements impromptus, comme le déplacement d'un capteur ou une panne, peuvent à tout moment faire varier la connexité du graphe résultant. Comme énoncé précédemment, c a connaissance du nombre de capteurs n du système. Déterminer la connexité du réseau revient donc à un problème de comptage décentralisé, où $\tilde{n}$ est le nombre de capteurs que c sait connectés à sa propre composante connexe, et le graphe est connexe si $\tilde{n} = n$.

L'idée que l'on présente ici repose sur un partage permanent, entre voisins, de la vision du réseau que chaque capteur entretient. Si l'on pouvait traduire en langue humaine un message de c à c', on entendrait :

> *Je suis c et c' m'a dit que x à été vu dans le réseau il y a 14 secondes. Par contre, je n'ai pas eu de nouvelles de mon voisin y depuis 78 secondes, je doute du fait qu'il soit toujours présent dans le réseau.*

Dans notre méthode, un capteur transmet régulièrement à ses voisins son avis sur la présence ou non d'autres nœuds dans sa composante connexe. Afin de permettre de gérer des informations potentiellement contradictoires, une date et une source sont associées à chaque information de nœud. Par comparaison temporelle et par élagage des informations fournies par les nœuds eux-mêmes déconnectés, on provoque dans le réseau une dynamique globale de comptage qui se stabilise lorsque le graphe devient connexe. On précise par la suite les trois structures de données qui serviront de support à ces échanges.

Puisque le filtrage par comparaison d'informations contradictoires se base sur une donnée temporelle, on suppose que les capteurs disposent d'une horloge interne et qu'ils sont synchronisés. On suppose aussi qu'ils possèdent une mémoire interne afin de stocker les trois structures de données décrites ci-dessous.

Données propres à un capteur

Chaque capteur entretient trois listes de données. On décrit d'abord la nature de leur contenu puis l'on développe la façon dont ce contenu est acquis dans la section suivante.

La première liste, N, représente le voisinage de c et contient uniquement les identifiants des nœuds en liaison directe avec ce dernier.

La seconde liste entretenue par un capteur est C. Elle représente sa vision de la connexité du réseau, soit concrètement, tous les nœuds qui, de son point de vue, y sont connectés directement (par voisinage) ou indirectement (par l'intermédiaire d'autres capteurs). On en déduit que tous les nœuds représentés dans N apparaissent dans C. Contrairement à N, C ne contient pas que des identifiants et ses entrées sont des triplets (c', t, s) avec c' l'identifiant du nœud dont l'on veut exprimer la présence sur la composante connexe, t le dernier temps auquel c' a été détecté et s le capteur ayant transmis cette information à c (la *source*).

La troisième et dernière liste, D, contient les capteurs dont c n'est plus certain de la connexité. Ses entrées prennent la forme de paires (c', t) où c' est le nœud sur lequel le doute se pose et t la date à laquelle l'absence de c' a été dernièrement remarquée.

Modification autonome de l'état interne

Les trois listes décrivant la connaissance du réseau dont dispose un capteur ont été présentées mais la question de l'origine des informations qu'elles contiennent n'a pas encore été abordée. On se concentre dans un premier temps sur les modifications qu'un capteur applique à sa propre mémoire à partir de ses propres observations.

Afin de présenter le plus clairement possible ce problème, on imagine la situation d'un capteur c fraîchement arrivé dans le système et n'ayant encore rencontré aucun autre nœud.

Si c reçoit un message d'un capteur c', il l'ajoute à sa liste de voisins N ainsi qu'à sa liste de connexité C tout en y associant une date et une source adaptées (ici la source est simplement c'). La liste N n'est jamais partagée avec les autres capteurs mais permet à c de disposer d'une liste séparée contenant uniquement ses voisins directs.

On choisit d'aborder le problème de façon proactive : les messages d'un capteur sont envoyés volontairement et à intervalle régulier afin d'informer ses voisins de sa présence. Ainsi, on considère qu'un capteur a potentiellement disparu d'un voisinage s'il n'envoie plus de message ; ou plus précisément, si les voisins l'ayant enregistré n'en ont plus de nouvelle depuis un certain temps. C'est le processus de *surveillance*.

Ainsi, si c ne reçoit plus de message de c' pendant un certain temps, il supprimera toute référence à c' de ses listes N et C et l'ajoutera D, la liste des doutes. Le changement de statut de c' n'est pas définitif et s'il se connecte à nouveau à c, l'opération inverse sera effectuée.

Modition de l'état interne par propagation des rumeurs

les modifications de la mémoire décrites concernaient uniquement le domaine dont un capteur c est certain, son voisinage. On évoque maintenant la façon dont toutes les informations sont diffusées dans le réseau afin de comprendre comment un capteur situé à un de ses bouts prend connaissance de sa connexité avec un capteur placé à l'autre bout.

On a suggéré qu'un capteur prend connaissance de la présence d'un voisin en recevant ses messages sans pour autant préciser leur nature. Un message est en fait constitué des listes C et D de son émetteur. À la réception de ces données, un capteur c va traiter ces listes et évaluer quelles informations retenir et quelles autres informations ignorer en se basant sur les étiquettes temporelles.

Par exemple, si c reçoit de c' la liste $C' = \{\ldots, (x, 23, y), \ldots\}$ et que le capteur x ne fait partie d'aucune des listes de c, alors il l'absorbe et $C = \{\ldots, (x, 23, c')\}$. On remarque la source de l'information est modifiée car c'est c' qui a transmis l'information à c et y n'a joué aucun rôle dans cet échange.

Autre exemple, c possède $C = \{\ldots, (x, 23, y), \ldots\}$ et c' lui transmet $C' = \{\ldots, (x, 37, z), \ldots\}$. Le même capteur x est présent à la fois dans la liste de connexité de c et dans celle de c' ce qui signifie que chacun de ces deux nœuds admet que x fait partie de leur composante connexe. Par contre, la date associée à la dernière détection de x est plus récente du côté de c' donc on la met à jour dans c. On a au final $C = \{\ldots, (x, 37, c'), \ldots\}$.

La liste de doutes D n'est pas encore entrée en jeu mais elle aussi joue un rôle important. Par exemple, c a $C = \{\ldots, (x, 42, y), \ldots)\}$ et reçoit de c' la liste $D' = \{\ldots, (x, 56, z), \ldots\}$. Puisque c' dispose d'une information plus récente établissant que x n'est plus présent dans le système depuis le temps 56, alors on lui fait confiance et $C = \{\ldots, (x, 56, c'), \ldots\}$ tandis la référence à x est retirée de D.

De plus, c peut être amené à réfuter une partie de ses connaissances s'il s'aperçoit qu'un nœud qui en est à l'origine (qui en est la source donc) est mis en doute de façon crédible par un voisin. Prenons l'exemple de $C = \{\ldots, (x, 14, y), (y, 5, z), \ldots\}$ et $D' = \{\ldots, (y, 20, w), \ldots\}$. Comme pour l'exemple précédent, les deux capteurs ont un avis différent sur la présence de y dans le système et c'est c' qui l'emporte car son information est plus récente. On passe donc y de C à D tout en mettant à jour la date de l'observation de la source de l'observation. En plus de cette modification on retire aussi $(x, 14, y)$ de C car y qui vient d'être jugé comme déconnecté en est la source. C'est ce procédé de rétrodiffusion qui permet le comptage dans un graphe dynamique car par propagation toutes les connaissance du réseau ayant y comme source vont être réévaluées.

Ces quelques exemples illustrent l'idée de cette méthode de comptage décentralisée basée sur le fait que seuls les voisins directs peuvent affirmer avec certitude la présence ou non d'un capteur dans le réseau tout en diffusant cette information, en l'étiquettant temporellement, de façon à gérer les conflits, et en précisant sa source, de façon à annuler des connaissance potentiellement fausses. Un exemple graphique est visible sur la figure **??**.

Cette algorithme est bien sûr une approximation de la connexité du réseau car les informations souffrent d'un temps de propagation proportionnel à la distance entre le capteur observant la modification de son voisinage et le capteur recevant plus tard l'information passée de mains en mains. De plus, une fréquence d'émission trop élevée est encline à générer des *broadcast storms* dans une situation réelle. Néanmoins, cette méthode permet l'évaluation de la connexité d'un graphe dynamique.

2 Rendre le réseau connexe

On traite maintenant la seconde interrogation soulevée par ce problème : comment déplacer les capteurs pour obtenir un réseau connexe ?

La résolution de ce problème passe par la satisfaction de deux besoins *a priori* antagonistes. D'une part, il est naturellement nécessaire de réunir les capteurs dans un espace réduit, de façon à ce qu'ils puissent communiquer et échanger des données en continu. D'autre part, et dans l'interêt de leurs utilisateurs, ils doivent s'étaler dans l'espace afin d'effectuer des mesures sur la plus grande superficie possible. Nous sommes donc dans une situation de compromis, dans laquelle une contrainte technique (la portée de communication) force à agglomérer les capteurs en une même zone, tandis que leur but premier est de relever des données en masse et donc, rationnellement, de s'éloigner les uns des autres pour couvrir le plus de terrain possible. La seule issue favorable à ce problème est donc d'aboutir à une situation d'équilibre satisfaisant ces deux contraintes diamétralement opposées.

Le cadre de cet exercice s'accorde parfaitement avec la problèmatique de la prise de décision dans un réseau décentralisé puisque chaque capteur peut être assimilé à un agent autonome, capable d'agir sur la configuration de son environnement en se déplaçant dans l'espace. Quel que soit l'état d'un capteur, la vision du système dont il dispose est locale et doit servir seule à déterminer quelles actions il entreprend. L'objectif est donc ici de proposer une méthode de guidage que chaque capteur peut adopter et qui, par émergence d'une dynamique globale, résout notre problème en répartissant les capteurs dans l'espace de façon satisfaisante.

Les boïds de Craig Reynolds [Rey87] sont reconnus pour simuler un comportement d'apparence complexe et synchronisée à partir d'un jeu de règles simples. On s'en inspire, ainsi que d'un modèle de mouvement particulaire [CSJ11] se basant sur la répulsion entre molécules de gaz, pour concevoir les trois règles qui gouverneront notre système. Chacune de ces lois, que l'on présente séparément par la suite, engendre une influence sur le déplacement de nos capteurs ; influence dont la composition sera détaillée en dernière partie.

Attraction

À la lecture de l'énoncé de ce problème, la nécessité de rapprocher les capteurs les uns des autres, afin qu'un réseau de communication ininterrompu se forme, vient naturellement à l'esprit. En effet, la condition *sine qua non* au bon fonctionnement du réseau est la communication.

Par sa loi de la gravitation universelle, Isaac Newton décrit la force qui attire toute paire de corps comme étant proportionnelle à leur masse respective et à la distance les séparant [New87]. Nous nous permettons de simplifier quelque peu son équation et d'en retirer l'aspect massique pour obtenir une règle qui a tout couple de corps associe une attraction proportionnelle à leur distance. S'ils obéissaient à cette loi, nos capteurs auraient naturellement tendance à se grouper.

À l'échelle de notre système, le cadre est différent de celui de la loi de Newton, et cette influence n'est pas universelle. Nous ne pouvons malheureusement pas réécrire les règles de ce monde et inventer une attirance magique entre toute paire de capteurs. On peut néanmoins la simuler. Si deux capteurs sont à portée de communication et peuvent échanger leur position respective alors la détermination de la distance les séparant est aisée et la simulation d'un phénomène d'attraction devient possible.

Concrètement, on associe à tout capteur c un rayon d'attraction R_a (voir figure 2). Si un capteur voisin se trouve à la fois dans le rayon de communication R_c de c et à l'extérieur de R_a, la force d'attraction que ce capteur subit est :

$$\vec{a} = \frac{\vec{p}_c - \vec{p}_v}{|\vec{p}_c - \vec{p}_v|^2}$$

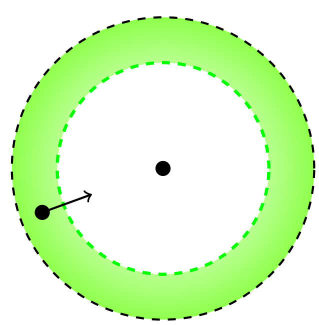


Figure 2 – En pointillés verts, le rayon d'attraction, dont l'intensité est décroissante de l'intérieur vers l'extérieur.

Dans le phénomène d'attraction réel, l'action est réciproque et instantanée mais dans notre cas elle est unidirectionnelle. Un capteur est attiré par tous ses voisins mais le processus décrit ne modifie pas directement la position du voisin en question et il n'en subit aucune influence. Il est néanmoins à prévoir que lorsque ce voisin calculera les influences qui s'appliquent à lui, il en subira la réciproque.

On note que l'attraction n'a pas pour but d'approcher des capteurs trop éloignés pour communiquer puisque l'existence d'une connexion entre deux capteurs est un prérequis à l'application de la force d'attraction. Son interêt majeur est de renforcer l'assurance d'une communication pérenne et un effet secondaire appréciable se révélera par association avec la seconde force présentée.

Répulsion

L'attraction a pour effet d'agglomérer en groupes serrés tous les capteurs démarrant la simulation dans une même zone. Mais même si de cette façon la communication est assurée, les capteurs finissent par être réunis en une zone très réduite au bout d'un certain nombre d'itérations et la contrainte de couverture n'est absolument pas satisfaite.

Pour pallier cette déconvenue, on introduit une nouvelle force opposée à l'attraction, la répulsion. Le rayon R_r définit une nouvelle zone radiale qui, contrairement à la loi précédente, expulsera les capteurs envahissants vers l'extérieur. L'influence qui en découle est inversement proportionnelle à la distance les séparant, de façon à engendrer une répulsion plus forte vers le centre [CSJ11] :

$$\vec{r} = \frac{\vec{p} - \vec{p_v}}{|\vec{p} - \vec{p_v}|}(R_r - |\vec{p} - \vec{p_v}|)$$

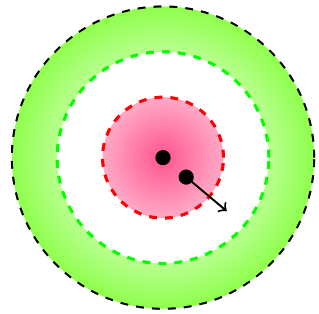


FIGURE 3 – En pointillés rouges, le rayon de répulsion, dont l'intensité est décroissante du centre vers les bords.

On prend $R_r = R_a - \varepsilon$, où ε correspond à la largeur d'une bande neutre entourant chaque capteur (voir figure 3). Les capteurs auront naturellement tendance à s'installer dans ces zones libre de toute influence. Nous verrons dans les démonstrations que la conséquence principale de ce positionnement fortement dirigé est une organisation en un maillage régulier et géométrique. La régularité qu'adopte la structure de notre réseau est un plus à ne pas négliger puisqu'il permet des mesures de l'environnement homogènes.

Gravité

Les deux règles présentées permettent aux capteurs de s'agglomérer en composantes connexes équilibrées mais ces composantes prennent la forme d'îlots séparés et la connexité totale du réseau n'est toujours pas garantie. Dans cette optique, on introduit une dernière influence inspirée de la physique, la gravité.

Comme annoncé en introduction, on part de l'hypothèse que les capteurs sont munis de moyens de localisation dans l'espace et nous en avons jusque là allègrement profité pour les calculs de distance nécessaires à l'évaluation des forces. Dans la continuité de cette hypothèse, on peut supposer que tous les capteurs connaissent le centre géométrique de l'environnement dans lequel ils évoluent. Cette position peut être la position de laquelle ils ont été largués, une position pré-programmée ou un point calculée de façon décentralisée par moyenne de toutes leur positions. La notion importante est que cette position est connue de tous et sert d'origine à leur système de coordonnées.

La gravité est la force qui va attirer tous les capteurs vers le centre de l'environnement. À première vue, une telle règle semble dangereuse car on imagine qu'elle poussera les capteurs à se déplacer vers le centre de la zone au risque de sacrifier l'étendue de la zone couverte. Néanmoins, on compte sur l'effet combiné des différentes forces, notamment la répulsion, pour résister à ce phénomène.

L'interêt de la gravité est d'attirer vers un même espace les capteurs isolés et les composantes connexes chanceuses formées par l'attraction et équilibrées par la répulsion. On la calcule de façon uniforme, comme un vecteur unitaire dirigé vers le centre de l'environnement.

$$\vec{g} = -\frac{\vec{p}}{|\vec{p}|}$$

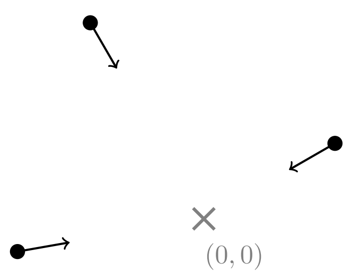


FIGURE 4 – La gravité attire tous les capteurs vers le centre de l'environnement.

Composition d'une force nette

Une fois ces trois forces évaluées, on ne peut pas les appliquer naïvement sur le capteur concerné car il s'agit d'un objet physique soumis à des limitations quant à sa vitesse de déplacement. On associe donc à chaque capteur une vitesse maximale qui sert de borne supérieure à la magnitude des trois forces combinées.

Puisque l'on dispose de trois influences différentes, chacune tenant un rôle particulier dans la résolution du problème, l'idée la plus intuitive est d'en déduire une influence moyenne.

$$\vec{f} = \frac{\vec{a} + \vec{r} + \vec{g}}{3}$$

En pratique, ce choix montre vite ses limites. En effet, sous certaines configurations, deux forces peuvent prendre des directions opposées et les combiner de la sorte annule tout mouvement. Or l'inaction est rarement une solution. Dans d'autres cas relativement fréquents, les trois forces semblents correctement pondérées : on observe des capteurs isolés flotter lentement vers le centre de leur environnement et s'assembler en composantes connexes de plus en plus grandes. Mais une fois que le maillage est complet et qu'une situation d'équilibre semble avoir été atteinte, le centre du réseau commence à trembler ; les capteurs centraux se rapprochent dangereusement et se superposent sur l'origine de l'univers, ignorant totalement la règle de répulsivité. Ce problème est du à la quantité importante de tensions s'opérant au centre du réseau. La pression intense qui en résulte fait s'effondrer le réseau jusqu'à ce que tous les capteurs occupent la même position. Moyenner les forces est donc une fausse bonne idée.

On préférera prioritiser les forces, c'est à dire leur donner un ordre d'importance. Le mode opératoire est le suivant :

1. On définit l'ordre des forces, dans notre cas répulsion puis attraction puis gravité.
2. On calcule la force de répulsion et on l'applique en bornant par la vitesse maximale des capteurs.
3. S'il reste de la marge de manœuvre, on recommence cette opération avec l'attraction.
4. S'il reste de la marge de manœuvre, on recommence cette opération avec la gravité.

De cette façon, les situations d'urgence telles que l'écartement rapide de deux capteurs trop proches prennent le pas sur des mouvements de composition, tels que celui d'un capteur isolé flottant vers l'origine. Ce procédé est appliqué aux boïds de Reynolds pour prioritiser l'évitement d'obstacles face aux forces de cohésion du groupe. Une succession d'étapes menant à la formation d'un réseau connexe est visible sur la figure 3.

Pour prouver la versatilité de notre système, on propose finalement d'étendre ce modèle de guidage afin de permettre aux capteurs d'éviter automatiquement les obstacles par l'ajout d'une nouvelle force virtuelle. Un obstacle représente toute zone non traversable. Il peut s'agir d'un bâtiment, d'une zone dont les relevés ne nous intéressent pas ou d'un espace interdit aux appareils volants. Dans un soucis de simplicité (et de délais !), on limite les obstacles à des formes circulaires afin de mieux s'accorder avec l'aspect radial des différentes forces introduites jusqu'à présent.

Une force de répulsion du même type que celle éloignant les capteurs les uns des autres est appliquée sur chaque obstacle et est inversement proportionnelle à la distance entre le capteur soumis à la force est l'obstacle, afin de provoquer des expulsions rapides. Lors de la composition des différentes forces que subit le capteur, on choisit d'appliquer en priorité la nouvelle force d'évitement des obstacles, avant même la répulsion. La figure 5 illustre le comportement obtenu.

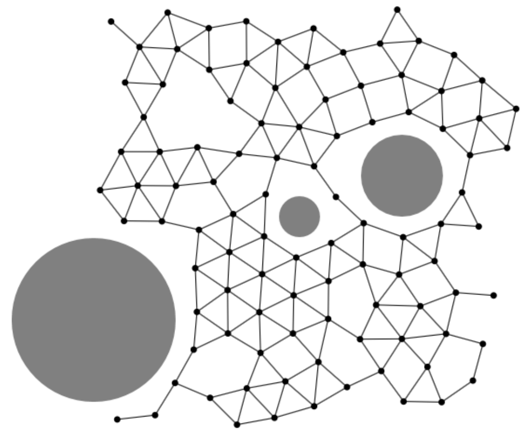


FIGURE 5 – Réseau connexe obtenu dans un environnement à obstacles.

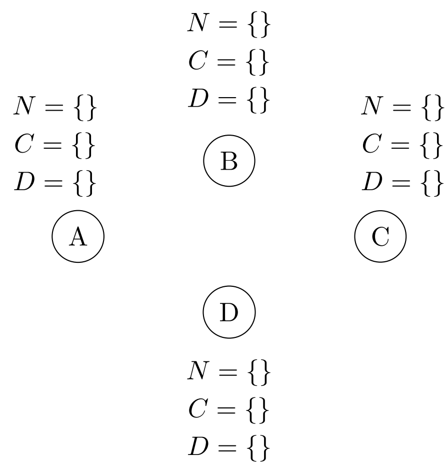
Conclusion

Références

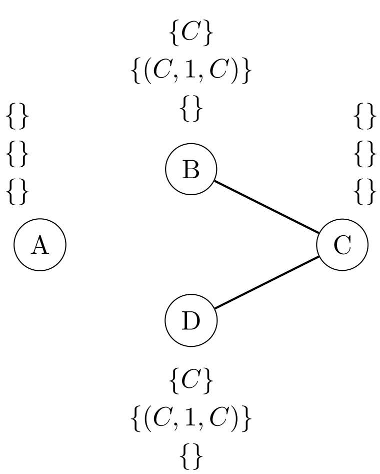
[CSJ11] Teddy M. Cheng, Andrey V. Savkin, and Faizan Javed. Decentralized control of a group of mobile robots for deployment in sweep coverage. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(7–8) :497 – 507, 2011.

[New87] Isaac Newton. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. 1687.

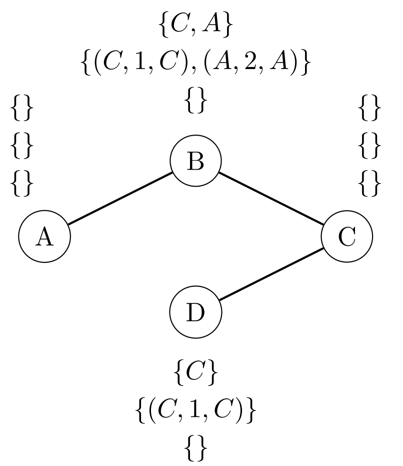
[Rey87] Craig W. Reynolds. Flocks, herds, and schools : A distributed behavioral model. In *SIGGRAPH '87 : Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 25–34. ACM, 1987.



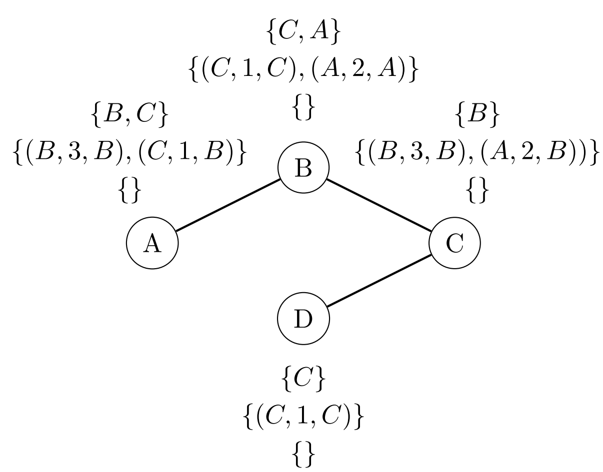
(a) $\underline{t = 0}$ Les capteurs sont éloignés et ne sont pas en mesure de communiquer. Aucun capteur n'a connaissance des autres capteurs du système.



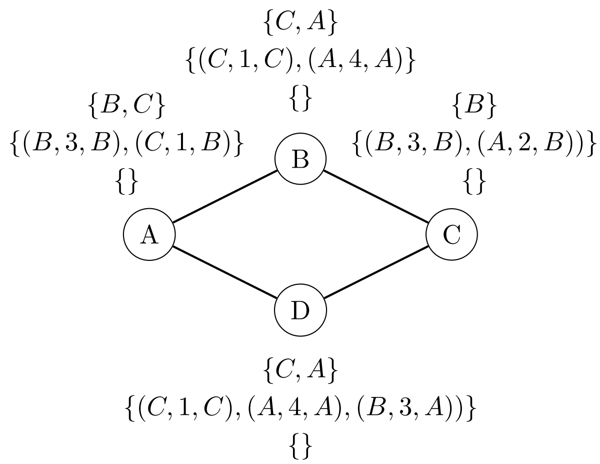
(b) $\underline{t = 1}$ Les capteurs B, C et D sont assez proches pour communiquer. C émet un message. B et D intègrent ses informations.



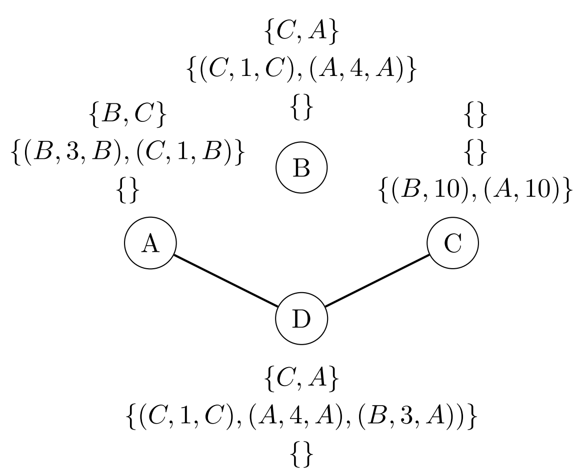
(c) $\underline{t = 2}$ A est désormais à portée de B. A émet un message. B intègre ses informations.



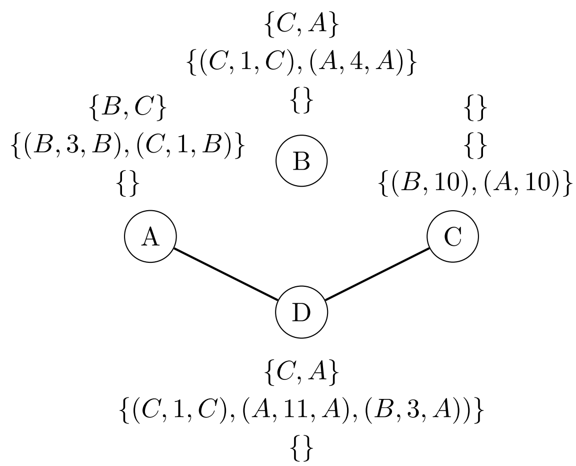
(d) $\underline{t = 3}$ B émet un message. A prend connaissance de C et réciproquement C prend connaissance de A.



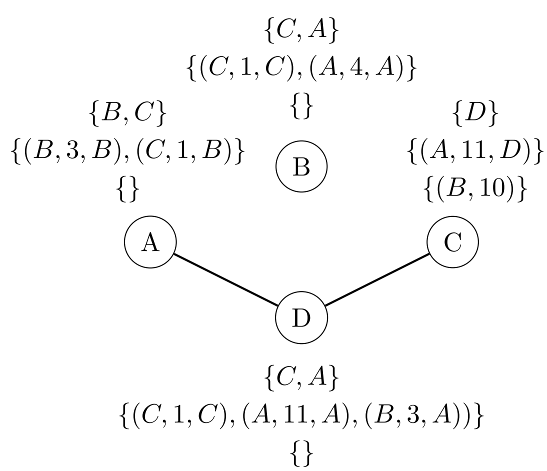
(e) $\underline{t = 4}$ A est désormais à portée de D, le réseau forme une boucle. A émet un message. D prend connaissance de A et de B.



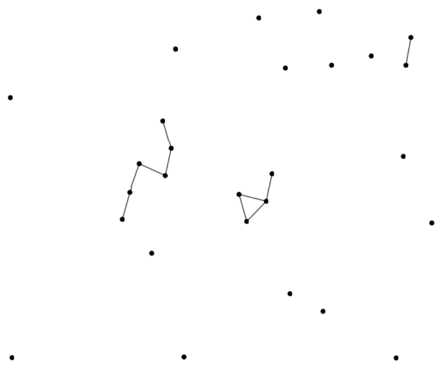
(f) $\underline{t = 10}$ Entre-temps, B s'est éloigné du réseau et est désormais isolé. Par surveillance de son voisinage, C remarque que B a disparu. Il met en doute la présence de B ainsi que celle de A (car B était la source l'informant de la présence de A à t = 3).



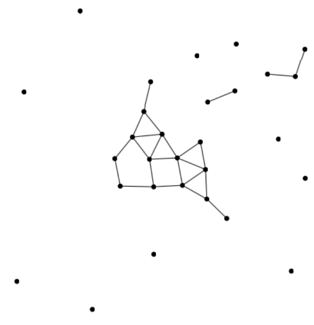
(g) $\underline{t = 11}$ A émet un message. Les données de D sont mises à jour (notamment, $(A, 4, A)$ devient $(A, 11, A)$).



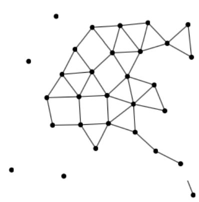
(h) $\underline{t = 12}$ D émet un message. Le doute de C concernant A est balayé car D a constaté sa présence plus récemment.



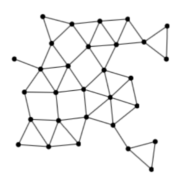
(a)



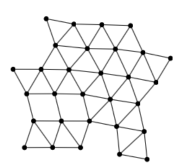
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 3 – Différentes étapes de la formation d'un réseau connexe.