

Intelligence Collective pour Robot Multi-Cellulaire

Julien Nembrini et Alan Winfield

Intelligent Autonomous Systems Laboratory (IASLab)
University of the West of England
Coldharbour Lane
Bristol, Royaume-Uni

Lorsque le comportement de robots au sein d'un groupe est tellement interdépendant qu'il en devient difficile de distinguer les éléments comme des individus, assistons-nous au passage du stade individuel au stade du robot multi-cellulaire? La recherche présentée ici tente de semer le doute au sein d'une perception dominante en faveur de l'individu.

1. Introduction

L'étude des capacités d'organisation des insectes sociaux tels que les fourmis, les abeilles ou les termites a soulevé une interrogation sur les mécanismes impliqués permettant des réalisations aussi complexes en regard des limitations des individus. Pour ne prendre qu'un seul exemple, l'organisation d'une fourmilière avec la recherche de nourriture, le tri des larves, l'organisation de cimetières, etc, présente une complexité que la simplicité de comportement d'une fourmi permet difficilement d'expliquer.

Pour tenter d'apporter une réponse à cette interrogation, le concept d'*intelligence collective*, ou *intelligence d'essaim*¹, a fait son apparition. Cette notion repose sur l'idée qu'un grand nombre d'individus limités dans leurs capacités sont néanmoins capables, par des interactions fructueuses, de présenter des comportements au-delà de leurs limites individuelles. Le comportement d'un individu n'y est pas coordonné par une quelconque entité externe mais par sa propre perception, forcément limitée et localisée, et ce sont les caractéristiques de ce comportement local multipliées à travers chaque individu qui génèrent la coordination du groupe. C'est l'*auto-organisation*² (Bonabeau et al., 1999). Cette différence entre le niveau individuel et le comportement global est nommée *émergence* dans la littérature (Holland, 1998), et se résume par "le tout est plus grand que la somme des parties". Mais la définition précise reste matière à discussion, d'autant plus que l'émergence, résultant par essence d'interactions fortement non-linéaire, reste typiquement difficile à caractériser mathématiquement.

Les caractéristiques des colonies d'insectes sociaux ont évidemment attiré les roboticiens cherchant à coordonner un groupe de robots. En effet, les limites actuelles de capacité et de fiabilité des robots autonomes rendent le paradigme de l'intelligence collective très attrayant. Les exemples biologiques prennent donc à la fois le rôle d'inspiration de solutions et de preuve d'existence, voire certaines recherches en robotique vont même jusqu'à servir de validation d'une hypothèse émanant du champ de la biologie (Krieger and Billeter, 2000). Notre recherche vise plus particulièrement à étudier le potentiel d'une communication radio entre les robots pour coordonner le comportement du groupe. Elle ne cherche pas à recréer un comportement du règne vivant mais s'inspire librement d'exemples biologiques. L'analogie avec des exemples d'êtres multi-cellulaires n'apparaît qu'a posteriori.

2. Recherches Apparentées

Parmi les différents axes de la recherche en robotique qui s'apparentent à ce travail, se profilent en premier lieu les recherches concernant les robots dits *auto-reconfigurables*. Ces travaux se concentrent sur la réalisation d'éléments robotiques autonomes ayant la capacité de s'attacher et se détacher entre eux et, par la conjonction de ces mouvements individuels, de produire un comportement global tel qu'un déplacement de l'ensemble ou la construction d'une forme (Kotay and Rus, 1999, Støy, 2004, Østergaard and Lund, 2004).

¹ *collective intelligence* ou *swarm intelligence* en anglais

² *self-organisation*

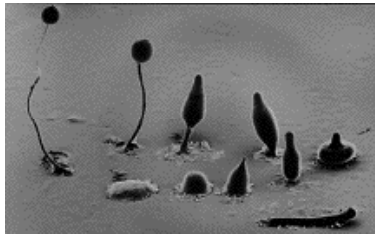


Figure 1: différents stades de développement de *Dictyostelium*

Comme une coordination centralisée de tels ensembles devient vite impossible, les algorithmes reposant sur l'intelligence collective sont particulièrement indiqués.

Un autre champ de recherche se concentre sur le déplacement dit *en formation*³ : l'enjeu est de faire adopter à un groupe de robots autonomes une forme globale et à la conserver lorsque le groupe se déplace, typiquement en étant capable d'éviter des obstacles (Reynolds, 1987). La recherche présentée ici s'intègre aussi dans le cadre de la *robotique minimaliste*⁴, dont le principe est de mettre au maximum à contribution les concepts d'émergence et d'intelligence collective, afin de simplifier les capacités requises par un ou plusieurs robots pour accomplir une tâche donnée (Melhuish, 1999).

Une des applications qui bénéficierait de ces différents axes de recherches est le développement de *réseaux sensoriels*⁵. Ce sont des réseaux d'éléments mobiles ou non, dont le but est de prendre des mesures en parallèle et de les rassembler pour en permettre l'analyse, voire même une action adaptée au résultat de ces mesures (par exemple des systèmes de prévision météorologiques ou de déminage) (Winfield, 2000). Le concept de *computation ubiquiste*⁶ qui projette d'intégrer des éléments utilisant la technologie sans-fil à même les matériaux de construction pour en faire des matériaux "intelligents" repose sur des progrès dans ces différents domaines (Estrin et al., 1999).

Comme mentionné précédemment, l'inspiration de l'idée d'intelligence collective trouve son origine dans la biologie et plus particulièrement dans les incroyables capacités des insectes dits sociaux. Mais cette notion se retrouve aussi dans le comportement d'êtres vivants autrement plus primitifs comme les bactéries et les amibes. Après avoir été étudiées pendant une certaine d'années comme un ensemble d'individus non coordonnés, principalement pour des raisons d'instrumentation, les colonies de bactéries hétérogènes montrent des comportements collaboratifs qui relèvent de l'intelligence en essaim (Shapiro, 1988).

Mais l'exemple le plus apparenté à cette recherche est la particularité méconnue du cycle de vie de l'amibe sociale *Dictyostelium discoïdum*. Pour en résumer les grands moments, l'amibe sociale, dans un contexte d'abondance, vit comme une amibe normale, à savoir elle se déplace individuellement et phagocyte les bactéries de passage. Mais quand la nourriture et l'humidité viennent à manquer, les amibes s'agglutinent pour former une sorte de limace qui entame alors une migration vers un environnement hypothétiquement plus clément. Après un certain temps, cette limace s'arrête, se dresse, une tige en pousse, qui "fleurit" et libère une partie des amibes sous la forme de spores, capables d'endurer des conditions extrêmes durant plusieurs années. Une fois l'abondance revenue, les spores se transforment à nouveau en amibes, et le cycle de recommencer.

Ce comportement intéresse bien entendu nombre de biologistes, surtout pour les indices qu'il révèle sur le fonctionnement de la morphogenèse dans les embryons multi-cellulaires. En effet le comportement de l'amibe sociale la place à cheval entre le monde des unicellulaires et celui des êtres multi-cellulaires, d'où l'intérêt pour notre recherche.

3. Buts, Contraintes et Méthode

L'idée de notre recherche est d'utiliser des robots qui s'échangent des messages pour coordonner leur comportement. Le but de départ consiste donc à étudier le potentiel que recèle l'acte de communication en lui

³*formation control*

⁴*minimalist robotics*

⁵*sensor networks*

⁶*ubiquitous computing*



Figure 2: un robot “linuxbot”

seul, en exploitant au maximum l’information implicite contenue dans un message du fait qu’un robot ne peut communiquer qu’avec son environnement proche. L’objectif est ensuite de réaliser par une coordination locale des comportements globaux d’auto-organisation de mouvement et de forme sans la contrainte du contact physique : les robots sont connectés entre eux virtuellement par un lien de communication radio.

De manière plus générale, ce travail s’inscrit dans un courant de recherche s’intéressant à l’intelligence collective dans le but de développer des systèmes robotiques qui se montrent *robustes* et *échelonnables*⁷, c’est-à-dire qui présentent une bonne dégradation de leurs performances en cas de panne d’éléments ou en présence de bruit et dont les capacités ne sont pas altérées par une augmentation du nombre de ces éléments. De ces buts découle l’utilisation de robots homogènes contrôlés par des algorithmes distribués à travers l’essaim, aucun élément ou partie ne pouvant être essentiel au fonctionnement de l’ensemble. Et une véritable échelonnabilité exige une communication strictement locale, du fait de la limitation intrinsèque du medium radio : à partir d’une certaine utilisation les messages se collisionnent, entraînant leur propre brouillage.

Pour développer des algorithmes utiles dans le cadre de réseaux sensoriels en général, l’environnement où évoluent les robots est choisi non-bordé, ce qui implique une contrainte essentielle de *cohésion* : l’essaim doit absolument ne former qu’un seul groupe. En effet, le choix de n’utiliser qu’un moyen de communication local ne présente aucune aide quant au cap à suivre pour rejoindre l’essaim en cas de déconnection durable. Il est montré plus loin comment la localité de la communication contient une information spatiale suffisante pour aider les robots à maintenir la cohésion.

Dans cette recherche le principal outil d’investigation est la simulation, car les expériences avec les robots réels, prenant énormément de temps pour des raisons de matériel comme de programmation, servent surtout à confirmer en un deuxième temps les solutions dégagées par les simulations. Cette confirmation est absolument essentielle tant il est impossible de construire une simulation qui puisse prétendre prendre en compte tous les aspects du problème réel, tant du point de vue du degré de description du modèle que de celui des artifices nécessaires pour simuler un espace-temps continu et parallèle. Dans notre cas, les contraintes de la taille du laboratoire et de la plateforme robotique à disposition n’ont pas permis de véritablement recréer les conditions de la simulation et tous les comportements présentés plus loin n’ont pu être vérifiés sur des robots réels.

4. Algorithmes

4.1 *algorithme de base*

La recherche se restreint à utiliser uniquement l’échange d’information sur les connections entre les robots. De plus, l’omnidirectionnalité du rayon d’action de la communication radio implique une absence d’information spatiale permettant d’agir en cas de déconnection. Pour faire bon usage de cette information limitée, il est tiré parti de la capacité d’un robot de tourner sur place avec une bonne précision : l’état par défaut du robot est d’avancer tout droit. Dès que le processus de contrôle détecte une déconnection, la direction présente est considérée comme obsolète et le robot retourne dans la direction opposée. Les robots sont équipés par ailleurs de senseurs de proximité pour éviter les collisions.

⁷*robust and scalable*

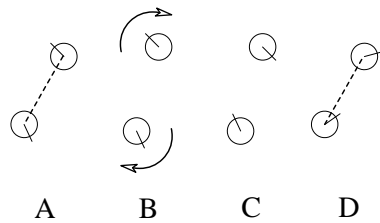


Figure 3: algorithme de base

Par simplicité considérons le problème avec deux robots : supposons que les robots soient au départ à distance de communication, avançant dans des directions quelconques (A). A moins qu'ils n'aient des trajectoires parallèles ou se coupant⁸, ils perdent la connexion (B). Pour contrôler cette connexion, l'algorithme utilise un mécanisme "transmet-écoute" : périodiquement, chaque robot envoie un message contenant son identité et passe ensuite en mode d'écoute pour entendre de possibles messages venant de l'autre. S'il ne reçoit pas de message durant un certain laps de temps, il considère être en dehors du rayon de communication de l'autre et réagit immédiatement en retournant dans la direction opposée (C). Ensuite, dès qu'un message lui parvient à nouveau, il choisit un cap aléatoire (D).

Comme il n'y a pas de synchronisation globale, les robots ne réagissent pas forcément au même instant, mais chaque robot ayant le même rayon de communication, les deux réactions ont lieu sur un court intervalle de temps, dépendant de la périodicité de la transmission des messages. Il est important ici de noter que la réciprocité de la réaction est primordiale car la réaction d'un seul robot ne suffit pas à garantir la reconnection.

En suivant cet algorithme, les robots évoluent plus ou moins à distance de communication, comme retenus par un élastique. Le choix aléatoire de cap après reconnection rend la trajectoire de la paire aléatoire.

4.2 algorithme des "voisins partagés"

Appliquer l'algorithme de base à un plus grand nombre de robots les amène à s'agglutiner en un groupe compact : toute connexion existante est maintenue et chaque nouvelle le sera à son tour. Après un certain temps les robots sont quasi-tous connectés. Mais les réseaux sensoriels, l'une des inspirations de cette recherche, ont besoin d'un essaim de robots capable de s'éparpiller tout en maintenant la cohésion. L'algorithme de contrôle doit donc faire une différence entre les connexions qui sont essentielles à la cohésion et celles qui peuvent être ignorées.

Une première solution consisterait à compter le nombre de connexions et réagir quand ce nombre passe au-dessus d'une certaine valeur. Malheureusement ce nombre ne donne pas d'information quant à l'importance d'une connexion pour la cohésion globale. Dans certains cas, le nombre de connexions est élevé mais une de ces connexions doit absolument être maintenue pour maintenir la cohésion.

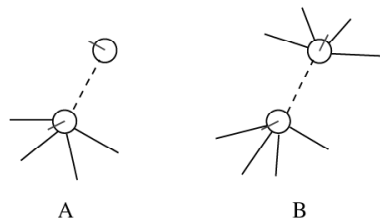


Figure 4: cas extrêmes

En fait ces cas extrêmes apparaissent lorsqu'un robot ou un groupe de robots n'est relié au reste de l'essaim que par une seule connexion. Pour éviter de telles situations il est fait appel à une triangulation : quand un robot perd une connexion, il contrôle si ce robot avait des voisins partagés avec lui. C'est-à-dire qu'il vérifie si un certain nombre de ses voisins actuels ont toujours le robot perdu comme voisin. Par exemple,

⁸situation gérée par un comportement d'évitement

dans la situation de la figure ci-dessous, le robot A , perdant la connection avec B , vérifie les connections de ses voisins et trouve que les robots C et D sont aussi voisins de B . Il est ensuite fixé un seuil sur le nombre de voisins partagés au-dessous duquel le robot réagit à la perte de la connection : le robot A réagira si ce seuil minimum est plus grand ou égal à 2.

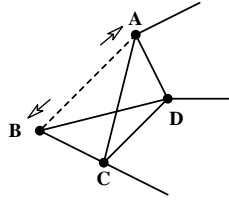


Figure 5: triangulation par voisins partagés

Pour pouvoir faire cette vérification, il est nécessaire que chaque robot, en plus de son identité, inclue la liste de ses voisins dans les messages qu'il envoie. Cela augmente évidemment la bande passante utilisée, mais les exemples de cas extrêmes prouvent que c'est absolument nécessaire. En augmentant l'information envoyée, il est en fait associé à l'existence de la connection une information qualitative sur l'environnement local de cette connection qui permet de définir son importance pour la cohésion de l'essaim.

En plus de garantir la cohésion, l'algorithme des voisins partagés permet, comme on peut le voir sur les images des simulations, de contrôler l'étendue couverte par l'essaim de robots en jouant sur le seuil de réaction au nombre de voisins partagés.

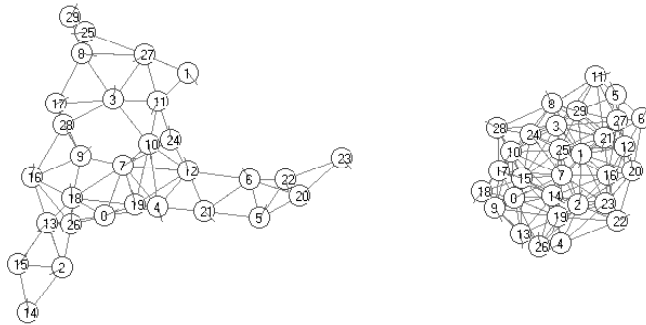


Figure 6: disposition typique avec un seuil de 1 et 4 voisins partagés

En divisant l'essaim de robots en deux groupes réagissant à un seuil de réaction différent, une auto-organisation concentrique se produit, où le groupe au seuil plus élevé se retrouve au centre de l'essaim, lui-même entouré de l'autre groupe.

La capacité de l'algorithme des voisins partagés à maintenir la cohésion a été confirmée par des expériences sur des robots réels, même si l'amplitude de contrôle de l'étendue couverte n'a pas été à la mesure des résultats des simulations. Les contraintes matérielles ont en effet rendu l'implémentation très difficile, surtout en ce qui concerne la localité du moyen de communication.

Il est intéressant par ailleurs de noter que l'algorithme présenté est indépendant de l'espace dans lequel est plongé l'essaim de robots. Ce qui implique, malgré le fait que la plupart des comportements présentés n'aient été testés que sur le plan, qu'il n'y a aucune restriction fondamentale qui empêcherait une application directe dans un espace à N dimensions ou, plus particulièrement, dans les trois dimensions de l'espace usuel.

4.3 extension avec stimulus externe

Pour obtenir un comportement de déplacement, un stimulus externe est introduit dans l'environnement. C'est une source de lumière dont l'intensité décroît avec la distance. Si l'on considère un robot seul, une solution pour le faire se déplacer en direction de cette source serait de l'équiper de senseurs placés d'un côté

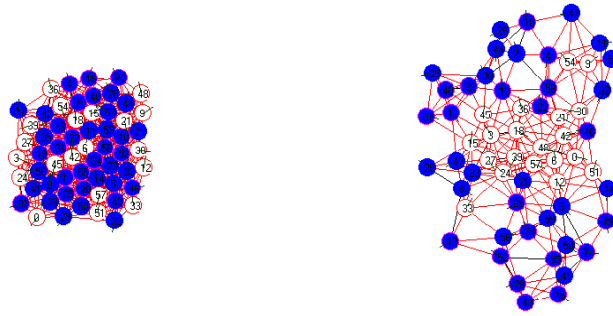


Figure 7: auto-organisation concentrique de deux groupes

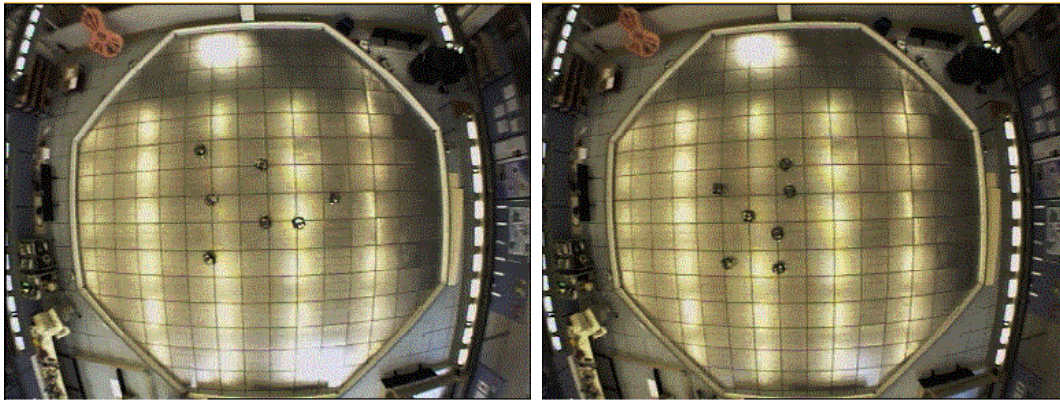


Figure 8: disposition typique des robots réels avec un seuil de 2 et 6 voisins partagés

et de l'autre de son axe de symétrie, de mesurer la différence d'intensité captée et de changer le cap dans la direction de l'intensité la plus élevée.

Cette solution a tout d'abord comme défaut d'être assez sensible au bruit. En effet si l'intensité de la lumière est faible, il est possible que les fluctuations ambiantes trompent le robot sur le cap à suivre. Mais un défaut bien plus grave dans notre cas est le fait que ce comportement est individuel. Pour arriver à maintenir la cohésion tout en avançant en direction du stimulus, il faudrait arbitrer entre les deux comportements. De plus, l'algorithme de base implique des changements constants de cap qui sont difficilement compatibles avec cette solution.

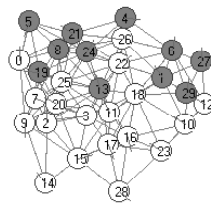


Figure 9: un essaim illuminé

Une autre solution consiste donc à utiliser le stimulus pour augmenter le seuil de réaction d'une partie de l'essaim de robots. On équipe les robots d'un seul senseur qui leur permet de savoir s'ils sont directement illuminés par la source ou si un obstacle, robot ou autre, leur cache la lumière. Et on modifie l'algorithme en faisant toujours réagir un robot s'il vient de perdre une connection avec un robot illuminé, quelque soit le nombre de voisins partagés. Le résultat est une illumination du bord de l'essaim situé du côté de la source de lumière et un comportement de ces robots qui s'agglutinent sans se déplacer, occupés à maintenir les connections. Ce groupe agit comme une ancre pour attirer les autres qui se retrouvent illuminés à leur tour. Commence alors un lent mouvement en direction de la source de lumière. Et même une encapsulation de la source une fois celle-ci atteinte.

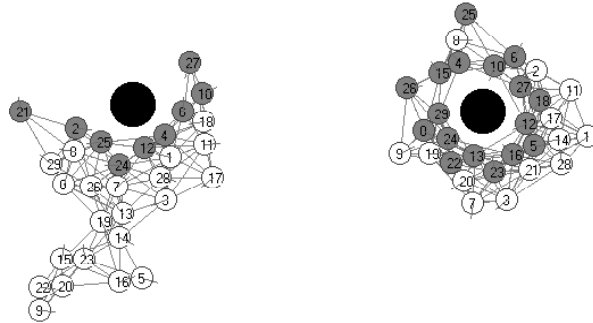


Figure 10: encapsulation de la source de lumière

Cette solution a l'avantage d'être beaucoup moins sensible au bruit en n'utilisant qu'un seul senseur et surtout elle maintient la cohésion en s'inscrivant complètement dans le cadre de l'algorithme des voisins partagés. De plus si des obstacles sont placés sur le chemin de l'essaim robotique, celui-ci va les éviter tout en maintenant la cohésion, parfois de manière spectaculaire comme dans la figure ci-dessous.

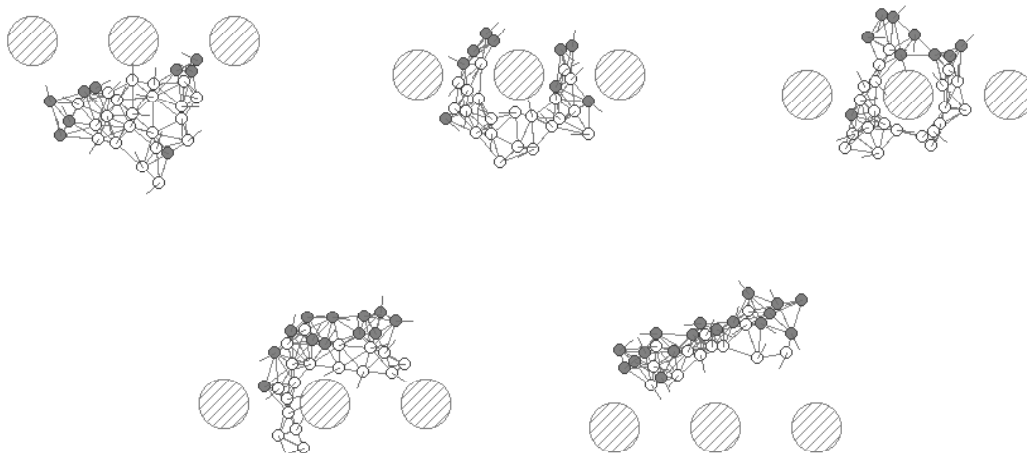


Figure 11: évitement d'obstacles

Il est important d'insister ici sur le fait qu'un robot seul n'a aucune raison d'atteindre la source de lumière de lui-même. En effet le mouvement est uniquement le résultat d'une interaction entre les robots illuminés et les autres et la perception d'être illuminé ne donne aucune indication sur le chemin à suivre. C'est un

phénomène émergent dans le sens que les robots sont collectivement plus capables que la somme de leurs capacités.

En augmentant la différenciation entre les robots illuminés et les autres par une différence de vitesse, on obtient un contrôle sur la forme globale de l'essaim : en faisant se mouvoir les robots illuminés plus lentement, ceux-ci restent d'autant plus sur place et se font finalement dépasser par les autres qui, à peine illuminés, ralentissent. Cette illumination se faisant toujours lorsqu'un robot dépasse l'essaim de côté, les robots construisent petit-à-petit une ligne perpendiculaire à la direction de la source de lumière. Dans le cas contraire où les robots illuminés vont plus vite, ceux-ci allongent par leur mobilité l'essaim en direction de la source.

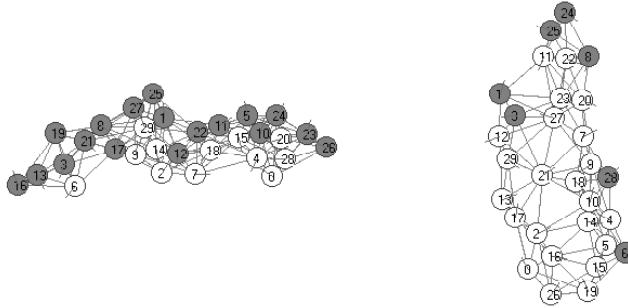


Figure 12: forme linéaire globale

En s'intéressant au fonctionnement de la morphogenèse des êtres multi-cellulaires, il apparaît qu'un des mécanismes fondamentaux qui permettent l'organisation des tissus est l'organisation différenciée de l'adhésion intercellulaire (Foty et al., 1996). Le travail de Paulien Hogeweg à partir de la modélisation de *Dyctiostelium* montre qu'une telle différenciation permet d'expliquer le singulier comportement de l'amibe sociale, et met de plus en avant le potentiel inattendu de l'adhésion cellulaire différenciée pour générer des formes complexes (Hogeweg, 2000b, Hogeweg, 2000a). Dans notre cas on peut considérer l'algorithme des voisins partagés comme un mécanisme d'adhésion intercellulaire, dont le seuil de réaction au nombre de voisins partagés laisse un espace de différenciation. En fait, il apparaît dans la littérature concernant la biologie du développement, que les exemples de comportements de robots présentés ici s'avèrent être caractéristiques du comportement de cellules issues de différents tissus (Gilbert, 2002).

5. Discussion

Les résultats présentés dans cet article amènent à considérer l'essaim de robots comme une entité dont il est possible d'influencer le mouvement et la forme par la seule modification des règles de comportement des éléments de base. Ici la forme et le mouvement de l'ensemble ne sont pas le résultat d'une planification suivie d'une exécution mais un équilibre résultant de multiples interactions de mouvements et réactions individuels.

Dans cet exemple, un contrôle centralisé du déplacement d'un aussi grand nombre de robots serait dépassé par la masse d'information à traiter et à communiquer, tandis qu'une solution faisant se placer chaque robot au sein d'une forme préétablie exigerait des capacités de perception au niveau de l'ensemble. En ce sens, ces comportements mettent en question tant la nécessité que l'adéquation d'un contrôle centralisé ou d'une planification pour influencer un processus dynamique.

Prenant pour exemple la planification urbaine, on remarque que celle-ci tente encore trop souvent d'imposer une vision directrice au processus dynamique de formation de la ville, vision qui se heurte dans bien des cas à des critiques tant sur le bien fondé de la perception qui la justifie que sur les moyens qui sont mis en oeuvre pour la réaliser. Une approche basée sur l'auto-organisation et l'émergence se contenterait de définir et adapter les possibilités de comportement des éléments (quartiers, rues, etc.) pour créer une situation dynamique se dirigeant vers l'équilibre recherché. L'oeuvre de Yona Friedman présente une recherche sur

les possibilités de pratiquer une architecture auto-organisée par les utilisateurs (Friedman, 1999).

Plus particulièrement, il serait possible d’imaginer une intervention architecturale formée de multiples structures mobiles suivant un ensemble de règles qui imprimeraient une dynamique génératrice de l’organisation de l’ensemble; ou alors, dans un contexte artistique, d’envisager une “sculpture” interactive où le comportement du public influencerait de manière radicale la forme de l’ensemble, grâce à la grande modularité de notre essaim de robots.

Pour en revenir à la robotique, le système présenté ici peut finalement être considéré comme un robot multicellulaire dont les capacités restent certes limitées à un stade d’évolution proche de celui de *Dyctiostelium* et des colonies de bactéries, mais dont le potentiel semble prometteur, par cette même analogie avec le règne vivant.

References

- Bonabeau, E., Dorigo, M., and Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence - From Natural to Artificial Systems*. Oxford Univ. Press.
- Estrin, D., Govindan, R., Heidemann, J., and Kumar, S. (1999). Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In *ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networks MOBICOM’00*, pages 263–270.
- Foty, R., Pflieger, C., Forgacs, G., and Steinberg, M. (1996). Surface tension of embryogenic tissues predict their mutual envelopment. *Development*, 122:1611–1620.
- Friedman, Y. (1999). *L’Architecture de Survie*. L’Éclat (2ⁿd edition).
- Gilbert, S. (2002). *Developmental Biology*.
- Hogeweg, P. (2000a). Evolving mechanisms of morphogenesis: On the interplay between differential adhesion and cell differentiation. *Journal of Theoretical Biology*, 203:317–333.
- Hogeweg, P. (2000b). Shapes in the shadow: Evolutionary dynamics of morphogenesis. *Artificial Life*, 6:85–101.
- Holland, J. H. (1998). *Emergence - From Chaos to Order*. Oxford Univ. Press.
- Kotay, K. and Rus, D. (1999). Locomotion versatility through self-reconfiguration. *Jour. of Robotics & Autonomous Systems*, 26:217–232.
- Krieger, M. and Billeter, J.-B. (2000). The call of duty: Self-organised task allocation in a population of up to twelve mobile robots. *Jour. of Robotics & Autonomous Systems*, 30:65–84.
- Melhuish, C. (1999). *Strategies for Collective Minimalist Mobile Robots*. PhD Thesis.
- Østergaard, E. and Lund, H. (2004). Distributed cluster walk for the atron self-reconfigurable robot. In Groen, P. et al., (Eds.), *Proc. Int. Conf. on Intelligent & Autonomous Systems, IAS-8*, volume 8, pages 291–298.
- Reynolds, C. (1987). Flocks, herds and schools : a distributed behavioral model. In *Computer Graphics*, volume 21, pages 25–34.
- Shapiro, J. (1988). Bacteria as a multicellular organism. *Scientific American*, June 1988:62–69.
- Støy, K. (2004). Controlling self-reconfiguration using cellular automata and gradients. In Groen, P. et al., (Eds.), *Proc. Int. Conf. on Intelligent & Autonomous Systems, IAS-8*, pages 693–702.
- Winfield, A. (2000). Distributed sensing and data collection via broken ad hoc wireless connected networks of mobile robots. In *Distributed Autonomous Robotic Systems*, volume IV, pages 273–282.