

# Explorer l'environnement avec des réseaux de chercheurs infotactiques.

JEAN-BAPTISTE MASSON<sup>1</sup>, MASSIMO VERGASSOLA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité génétique in silico, Institut Pasteur, CNRS URA 2171  
25-28 rue du Docteur Roux, 75724 Paris Cedex 15, France

[jbmasson@pasteur.fr](mailto:jbmasson@pasteur.fr), [massimo@pasteur.fr](mailto:massimo@pasteur.fr).

**Résumé** – Nous introduisons des stratégies de recherches de sources de particules transportées dans un environnement aléatoire et détectées par un ou plusieurs chercheurs. L'environnement mélange fortement les particules, de sorte que des stratégies basées sur la montée de gradients de concentrations s'avèrent inefficaces. Ce genre de conditions est commun dans les environnements naturels où les oiseaux et insectes font des recherches. L'intermittence des détections est le problème majeur qui ralentit le développement de robots renifleurs devant chercher des mites, des fuites de produits chimiques, etc.. Nous discutons dans un premier temps de l'infotaxie, qui fut récemment introduite pour la recherche de source unique par un robot. Les décisions sont prises de sorte à maximiser le taux d'acquisition d'information sur la localisation de la source. Elles permettent un équilibre entre exploration et exploitation. Nous introduisons ensuite une nouvelle formulation de l'infotaxie pour une assemblée de chercheurs ou une collaboration entre robots est possible et doit être coordonné. Le gain en termes de temps de recherche est impressionnant et la méthode peut être généralisée pour gérer les conflits apparaissant lorsque plusieurs sources émettent des particules.

**Abstract** – We discuss search strategies for finding sources of particles transported in a random environment and detected by one or many searchers. The mixing of the particles in the environment is supposed strong, so that strategies based on concentration-gradient ascent are not viable. These dilute conditions are common in natural environments typical of searches performed by insects and birds. The sparseness of the detections constitutes the major stumbling block in developing efficient olfactory robots to detect mines, chemical leaks, etc.. We first discuss a search strategy, “infotaxis”, recently introduced for the search of a single source by a single robot. Decisions are made by locally maximizing the rate of acquisition of information on the location of the source and they balance exploration and exploitation. We then introduce a novel formulation of infotaxis for collective searches where a swarm of robots is available and must be coordinated. Gains in the search time are impressive and the method can be further generalized to deal with conflicts arising in the identification of multiples sources.

## 1 Introduction

Des animaux tels les papillons [1, 2] ou les oiseaux sont capables de suivre d'infimes traces de phéromones ou d'odeurs et les exploiter pour repérer leur source. Pour se faire ces animaux suivent de trajectoires qui alternent entre des périodes de “zig-zag”, des périodes de mouvements circulaires, et des trajectoires plus “droites”. La même problématique se rencontre pour les robots “renifleurs” [3, 4] qu'on utilise afin de détecter les fuites chimiques, bactériologiques et même les mines [5]. La plupart des robots actuels qui tentent de résoudre ces problèmes se basent sur des algorithmes qui essaient de remonter des gradients et qui ne peuvent donc identifier la source qu'en présence de flux importants de particules émises et peu de mélange, c'est-à-dire que dans le voisinage immédiat de la source. Afin de surmonter ces limitations un nouvel algorithme d'infotaxie fût développé

récemment. L'infotaxie [6] est une méthode qui est conçue pour les situations à faible taux de détection de particules émises. Le chercheur construit un champ de probabilité de la position de la source mais, au lieu d'essayer de se diriger vers les zones de fortes probabilités de présence de la source, cherche à ce que chaque mouvement diminue la valeur attendue de l'entropie du champ de probabilité. Ainsi, plus l'entropie du champ baisse, plus l'incertitude sur la position de la source diminue, et donc plus d'informations fiables sont disponibles pour s'en rapprocher sans fautes et rapidement.

## 2 L'infotaxie à un chercheur et une source

L'infotaxie est implémentée de la manière suivante : un chercheur parcourt l'espace et rencontre une trace de particules,  $T_i$ , qui peut par ailleurs être considérée

comme un message fortement bruité envoyé par une source. Le "message" est décodé par des méthodes Bayésiennes, ceci permet la formulation de la distribution de probabilité a posteriori  $P_t(\vec{r}_0)$  de la position de la source  $\vec{r}_0$ .

$$P_t(\vec{r}_0) = \frac{\exp\left(-\int_0^t R(\vec{r}(t')|\vec{r}_0)dt'\right) \prod_{i=1}^H R(\vec{r}(t_i)|\vec{r}_0)}{\int d\vec{x} \exp\left(-\int_0^t R(\vec{r}(t')|\vec{x})dt'\right) \prod_{i=1}^H R(\vec{r}(t_i)|\vec{x})} \quad (1)$$

où  $H$  est le nombre de détections que le chercheur a reçu jusqu'à présent, les  $t_i$  les temps où les détections eurent lieu,  $R(\vec{r}|\vec{r}_0)\delta t$  le taux moyen de détections de particules pendant le temps  $\delta t$  pour un chercheur en  $\vec{r}$  et une source en  $\vec{r}_0$ . Il est bon de noter que  $T_t$  et  $P_t(\vec{r}_0)$  varient avec le temps et sont constamment mis à jour. Les détails complets sur la modélisation du milieu peuvent être trouvés dans la référence [6]. Au moment où le chercheur s'apprête à bouger, il évalue la variation attendue d'entropie que son mouvement, sur la position  $\vec{r}$ , devrait avoir sachant toute l'information qu'il a accumulée jusqu'à présent et il fait le choix qui maximise la réduction attendue d'entropie. Cette réduction d'entropie s'écrit comme la somme de deux termes :

$$\Delta \bar{S}(\vec{r} \rightarrow \vec{r}') = -P_t(\vec{r}')S + (1 - P_t(\vec{r}')) \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \rho_k(\vec{r}') \Delta S_k \right] \quad (2)$$

où  $\vec{r}'$  est un point voisin de  $\vec{r}$ . En employant ce processus l'infotaxie arrive à équilibrer deux tendances importantes des processus de recherche, celle explorative qui tend à visiter le plus de zones possible pour accumuler de l'information et celle exploitante qui tend à utiliser directement l'ensemble des connaissances accumulées. Le premier terme de l'équation (2) est un terme d'exploitation et le second est une combinaison d'exploration et d'exploitation.

Cette méthode est extrêmement efficace, elle aboutit à une dépendance linéaire du temps moyen de recherche en fonction de la distance initiale et à des densités de probabilité (PDF) de temps recherche pour une distance fixe exhibant une décroissance exponentielle pour les longs temps de recherche. Enfin aucun cas de chercheur « perdu » n'a jamais été observé.

### 3 Une source, un réseau de chercheurs

La formulation de l'infotaxie permet une adaptation générale à plusieurs chercheurs [7]. Deux possibilités principales s'ouvrent sur la nature de la collaboration entre robots : ils peuvent partager le champ de probabilité de position de la source mais garder de manière individuel le processus de décision sur le mouvement ou ils peuvent tout partager et choisir ensemble comment ils vont se déplacer.

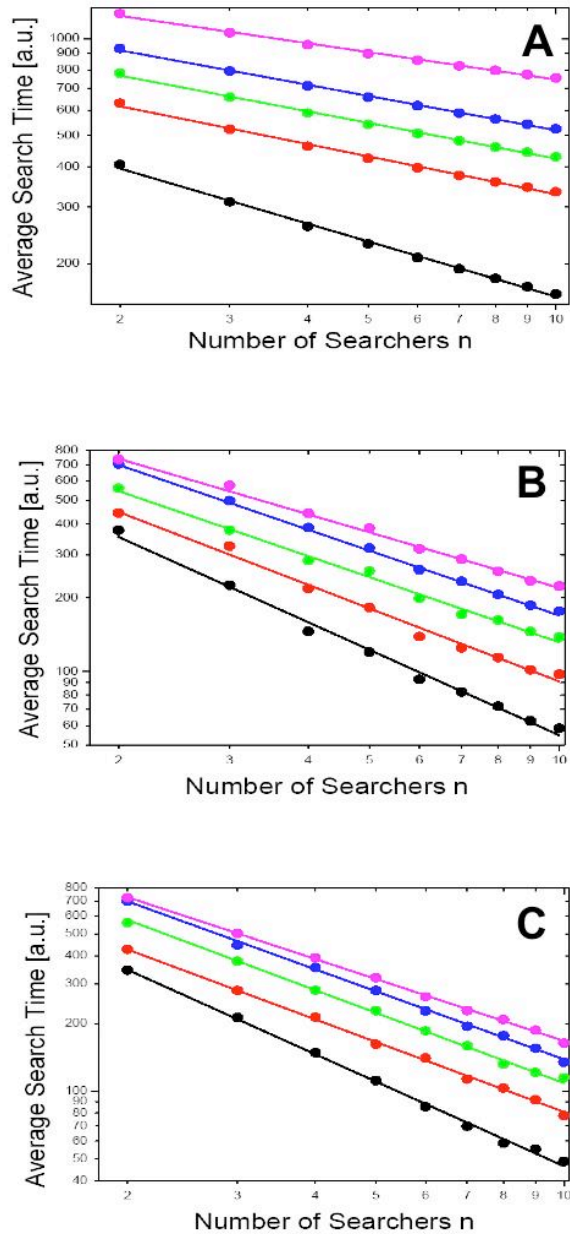


Figure 1 : Temps de recherche moyen en fonction du nombre de chercheurs présentés en échelle log-log. A) chercheurs indépendants, B) chercheurs partageant le champ de probabilité, C) chercheurs entièrement collaboratifs. En noir  $d=30$ , en rouge  $d=60$ , en vert  $d=90$ , en bleu  $d=120$ , et en magenta  $d=150$ , avec  $\lambda=50$ , la longueur de corrélation de la source. Les points sont les résultats des simulations et les droites les courbes modèles en échelle log-log.

### - Réseau infotactique partageur de champ :

La décision sur le mouvement étant laissée à chaque robot l'infotaxie reste programmée de la même manière. La principale différence se fait sur la mise à jour du champ de probabilité global :

$$P_{t+\delta t}^{global}(\vec{r}_0) = P_t^{global}(\vec{r}_0) \exp\left(-R(\vec{r}_i(t+\delta t)|\vec{r}_0)\delta t\right) \times \left(R(\vec{r}_i(t+\delta t)|\vec{r}_0)\delta t\right)^N / Z_{t+\delta t} \quad (3)$$

ou N est le nombre de détections que le chercheur i a expérimenté pendant  $\delta t$ . Ainsi à chaque mouvement d'un chercheur il y a un partage immédiat de l'information acquise.

**- Réseau infotactique en collaboration complète :** dans cette version, les n chercheurs choisissent de prendre les décisions de mouvements ensemble. La mise à jour du champ de probabilité se fait de la même manière que celle décrite dans l'équation (3). La prise de décision commune implique une nouvelle évaluation de la variation d'entropie :

$$\Delta \bar{S}(\{\vec{r}_i\} \rightarrow \{\vec{r}'_i\}) = (P_t^*(\{\vec{r}'_i\}))(-S) + (1 - P_t^*(\{\vec{r}'_i\})) \times$$

$$\left[ \sum_{k_1=0}^{\infty} \dots \sum_{k_n=0}^{\infty} \Delta S_{\{k_i\}} \prod_{j=1}^n \rho_{k_j}(\vec{r}_{j_i}) \right] \quad (4)$$

ou  $P_t^* = \sum_j P_t(\vec{r}'_j) \prod_{k \neq j} (1 - P_t(\vec{r}'_k))$  est la probabilité que la source soit trouvée par un des chercheurs et la notation  $\{\bullet\}$  symbolise l'ensemble des n variables possibles  $k_i$  ( $i=1..n$ ). Cette infotaxie est numériquement plus coûteuse. De manière pratique deux approximations sont faites : le calcul de l'entropie se fait en considérant que seul 0 ou 1 détections peuvent avoir lieu pendant  $\delta t$ , et comme on ne peut évaluer les  $5^n$  mouvements possibles on fait un « simulated annealing » rapidement refroidi (de 50 à 100 étapes) pour choisir les n mouvements des chercheurs.

Une bonne manière de quantifier les résultats est de mettre les chercheurs sur un cercle de rayon d (en 2 dimensions) et de regarder le temps moyen de recherche en fonction de d et n, le nombre de chercheurs. Sur la figure 1 on peut voir le gain impressionnant sur les temps de recherche que la collaboration partielle ou complète entre chercheurs permet d'avoir, tout spécialement comparée aux temps de recherches de n chercheurs indépendants. De manière intéressante l'évolution des temps de recherche en fonction du nombre de chercheurs suit

une loi de puissance  $n^\beta$ . Les exposants  $\beta$  pour les deux distances extrêmes  $d=30$  et  $d=150$  sont (-0.57, -1.16, -1.25) et (-0.28, -0.76, -0.91) pour des chercheurs indépendants partiellement et complètement collaborant. Il y a une légère diminution des coefficients  $\beta$  avec l'augmentation de la distance initiale, cependant les coefficients des chercheurs collaborant restent largement supérieurs à ceux des chercheurs indépendants.

Une conclusion importante est que le gain le plus important est obtenu pour les chercheurs partageant le processus de décision. Cependant, un simple partage du champ de probabilité montre déjà une forte efficacité. Ceci revêt une importance particulière du point de vue expérimental où le nombre de calcul effectuable par un robot n'est pas infini. Enfin, un nombre de stratégies intermédiaires peuvent être élaborées de sorte à faire partager les décisions de mouvement aux robots se trouvant proche les uns des autres et à faire partager le champ de probabilité aux robots éloignés les uns des autres.

## 4 Des sources et un réseau chercheurs

Le passage d'une source à plusieurs s'accompagne d'une diminution conséquente de la quantité d'information accessible et surtout interprétable par le ou les chercheurs. Le but de la recherche est d'accéder à une des sources le plus vite possible. Le cas le plus intéressant est celui où deux sources se trouvent à une distance de corrélation l'une de l'autre. Ainsi lors de l'approche, l'interprétation des détections sera le plus difficile.

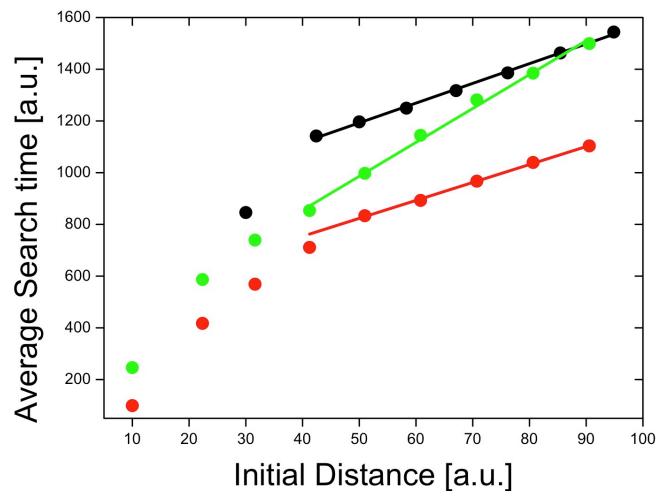


Figure 2 : Temps de recherche moyen en fonction de la distance initiale pour deux sources émettrices et deux chercheurs. Les points sont les résultats de simulations et les lignes des interpolations linéaires. En noir l'infotaxie originale, en vert 2

chercheurs collaborant complètement, et en rouge 2 chercheurs partageant le champ moyen.

Une manière qui paraît immédiate de traiter ce problème est de construire une carte de probabilité de la position des deux sources. Cependant, en deux dimensions, cela implique de stocker des matrices de taille  $Y^4$  ( $Y$  étant le nombre de point dans chaque direction) ce qui n'est pas réaliste.

Une des méthodes les plus efficaces que nous trouvâmes est d'utiliser plusieurs chercheurs en nombre supérieur ou égal aux nombres de sources. Il faut ensuite appliquer l'infotaxie individuelle sur chacun des chercheurs mais changer les règles de mise à jour du champ de probabilité global :

- (i) s'il n'y a pas de détections pendant  $\delta t$  la mise à jour est similaire à l'infotaxie à un chercheur et un source.
- (ii) S'il y a  $N$  détections pendant  $\delta t$

$$P_{t+\delta t}^{global}(\vec{r}_0) = \frac{P_t^{global}(\vec{r}_0) \exp(-R(\vec{r}_i(t+\delta t)|\vec{r}_0)\delta t)}{Z_{t+\delta t}} \times \left( R(\vec{r}_i(t+\delta t)|\vec{r}_0)\delta t + \frac{s-1}{n-1} \sum_{j=1; j \neq i}^n \int d\vec{r}' P_t^j(\vec{r}') R(\vec{r}'|\vec{r}_0)\delta t \right)^N \quad (5)$$

avec  $s$  le nombre de source et  $n$  le nombre de chercheurs. Cette méthode est basée sur un champ moyen non local partagé par les différents chercheurs et sur des décisions prises de manière individuelle. Le coût en mémoire de cette méthode est  $nY^2$  ce qui est acceptable. La méthode pourrait être étendu de sorte à inclure une prise de décision commune, mais le coût numérique serait important. L'efficacité de la méthode est montrée sur la figure 2. On peut voir ainsi que cette méthode est plus efficace qu'un ou plusieurs chercheurs employant les méthodes montrées dans les deux premières parties. Cette méthode marche de manière sûre et rapidement tant que le nombre de chercheurs est supérieur aux nombres de sources. Si cela n'est pas le cas, la plupart des recherches seront fructueuses et rapides cependant certaines peuvent prendre un temps très long et ainsi nuire à la PDF des temps de recherche. Enfin pour deux sources, l'évolution du temps de recherche moyen en fonction du nombre de chercheurs suit aussi une loi de puissance avec  $\beta=0.95$  ceci confirmant sa grande efficacité.

## 5 Conclusion

L'infotaxie est un algorithme qui s'adapte de manière très naturelle aux fonctionnements en réseau. Nous avons détaillé son application dans le cas de recherches d'une ou plusieurs sources et montré l'immense gain que cette application en réseau permettait sur les temps de recherche. Ainsi que cela soit pour une ou plusieurs sources, avec une collaboration complète ou partielle, le temps de recherche suit une loi de puissance en fonction du nombre de chercheurs. Ceci étant un exemple impressionnant du gain d'information permit par cette nature de collaboration. De plus l'infotaxie comme structure de collaboration permet une adaptation souple autorisant des mélanges entre partage complet et partiel des processus de décisions en fonction des conditions expérimentales

L'infotaxie peut être appliquée à tout problème où un opérateur doit chercher un équilibre entre exploitation de l'information et exploration de l'environnement. De plus l'infotaxie s'adapte très bien à des conditions où la connaissance du milieu est parcellaire et où les agents doivent à la fois effectuer une tâche et s'adapter aux nouvelles connaissances acquises sur l'environnement.

## Références

- [1] T.L. Payne, M.C. Birch et M.C. Kennedy, *Mechanisms in Insect Olfaction*, Clarendon, Oxford (1986).
- [2] J. Murlis, J.S. Elkinton et R.T. Card'e, *Odor plumes and how insects use them*, Ann. Rev. of Entomology **37**, 505-532 (1992).
- [3] R.A. Russell, *Odor Detection by Mobile Robots*, World Scientific, Singapore, (1999).
- [4] H. Ishida, Y. Kagawa, T. Nakamoto, et T. Moriizumi. *Odor-source localization in the clean room by an autonomous mobile sensing system*, Sensors and Actuators B-Chemical **33**, 115-121 (1996).
- [5] G.S. Settles, Sniffers : *Fluid-dynamic sampling for olfactory trace detection in nature and homeland security*, J. of Fluids Eng. **127**, 189-218 (2005).
- [6] M. Vergassola, E. Villermaux et B. Shraiman *'Infotaxis' as a strategy for searching without gradients*, Nature **445**, 406-409 (2007).
- [7] J.-B Masson, M. Bailly-Bechet, M. Vergassola *Chasing information to search in random environments*, J. Phys. A. August 2009 (special issue "The random search problem : trends and perspectives" )