

# Etude de lois de navigation pour la recherche de sources de gaz

Etienne Hugues, Nicolas Ginder, Dominique Martinez

► **To cite this version:**

Etienne Hugues, Nicolas Ginder, Dominique Martinez. Etude de lois de navigation pour la recherche de sources de gaz. XIèmes Journées Neurosciences et Sciences pour l'Ingénieur - NSI'02, Sep 2002, La Londe les Maures, France, 4 p, 2002. <inria-00099417>

**HAL Id: inria-00099417**

**<https://hal.inria.fr/inria-00099417>**

Submitted on 26 Sep 2006

**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.

# Etude de lois de navigation pour la recherche de sources de gaz

Etienne Hugues, Nicolas Ginder et Dominique Martinez

LORIA, Université de Nancy 1, BP 239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France

E-mail : {hugues,dmartine}@loria.fr

## Résumé

On dérive, dans une situation homogène et stationnaire, une famille de lois de navigation  $\mathcal{L}_n$  ( $0 \leq n \leq 1$ ) pour un robot à la recherche d'une source de gaz. Ces lois lui permettent de converger vers la direction de la source et d'y rester de manière stable. Dans une situation inhomogène et en présence de bruit, ce dernier étant autant dû à la turbulence qu'au système permettant d'estimer la concentration en fonction des données des capteurs, la loi  $\mathcal{L}_{1/2}$  se révèle la plus efficace. Les performances restent étonnamment élevées même pour un bruit fort.

## 1 Introduction

Se diriger vers une source odorante est un problème a priori difficile en raison de la forte inhomogénéité spatiale et des grandes fluctuations du champ de concentration du gaz, celles-ci étant principalement dues à la turbulence. Ce problème est néanmoins résolu par de nombreux animaux, notamment des insectes. Bien que les mécanismes sous-jacents ne soient pas encore élucidés [3], il est intéressant d'essayer de comprendre, à l'aide d'un robot, comment ce comportement est possible.

Dans le cadre de l'Action de Recherche Coopérative *NOSE* <sup>(1)</sup> de l'INRIA, nous développons un tel robot [2]. Deux matrices de capteurs de gaz disposées latéralement alimentent un modèle neuronal permettant d'estimer les concentrations du gaz recherché pour ensuite guider le robot vers la source. Deux modélisations seront utilisées : un perceptron [1] et un modèle du bulbe olfactif. Dans les deux cas, les estimations de concentration seront relativement imprécises.

Atteindre une source requiert donc de pouvoir faire face à de grandes fluctuations du signal, problème qui peut s'étudier en s'intéressant à la loi de navigation. Cette approche n'a pas encore, à notre connaissance, fait l'objet d'une véritable étude. Dans l'hypothèse où seules les mesures instantanées sont prises en compte, on se propose ici de dériver analytiquement des lois de navigation dans une situation homogène et stationnaire, puis d'évaluer ces lois dans des situations inhomogènes et fortement bruitées.

## 2 Dérivation et étude des lois de navigation

A l'instant  $t$ , le robot a pour position  $\vec{r}(t)$  et son orientation est donnée par l'angle  $\gamma(t)$ . On dispose des concentrations stationnaires gauche et droite  $C_{g/d}(t) = C(\vec{r}_{g/d}(t))$ , où

---

<sup>1</sup>Neuromimetic Olfactory SEnsing. Voir : <http://www.loria.fr/~rochel/nose>.

$\vec{r}_{g/d} = \vec{r} \pm \frac{l}{2} \vec{u}(\gamma + \frac{\pi}{2})$ ,  $l$  étant la distance entre les matrices et  $\vec{u}(x)$  étant le vecteur unitaire d'angle  $x$ . La commande du robot se fait en attribuant des vitesses aux roues gauche et droite. Le robot se déplaçant dans un champ de concentration donné, il est important de pouvoir maîtriser les trajectoires qu'il emprunte pour ne pas sortir inopinément de la zone où se trouve le gaz, c'est-à-dire de maîtriser la vitesse de rotation  $\omega = d\gamma/dt$  et leur rayon de courbure  $R(t)$ . Ces deux grandeurs dépendant des vitesses des roues, il est très difficile de maîtriser la trajectoire en contrôlant directement ces vitesses. On choisira donc de contrôler directement  $\omega$  et de fixer la vitesse du robot  $v$ .

Le but de la navigation est de s'orienter suivant le gradient de concentration, de préférence le plus rapidement possible. Si on écrit ce gradient  $\vec{\nabla}C = A\vec{u}(\alpha)$ , où  $A$  est son module et  $\alpha$  sa direction, le guidage revient donc à annuler  $\delta = \gamma - \alpha$ . La loi de comportement peut s'écrire, de manière générale,  $\omega = G(\Delta C, \bar{C})$ , où  $\Delta C = C_g - C_d$  et  $\bar{C} = (C_g + C_d)/2$  et  $G$  est une fonction à déterminer. Tout d'abord,  $G$  doit vérifier  $xG(x, y) \geq 0$  pour tourner dans la bonne direction et aussi  $G(-x, y) = -G(x, y)$  pour avoir un comportement symétrique. Lorsque les concentrations latérales sont peu différentes, on peut écrire  $\bar{C} \approx C(\vec{r})$  et  $\Delta C \approx -lA(\vec{r}) \sin \delta$ , où  $l$  est l'écartement entre les capteurs. Pour déterminer plus précisément  $G$ , on va imposer les conditions suivantes :

- *i*) l'orientation correspondant à  $\delta = 0$  doit être stable ;
- *ii*) quelle que soit l'orientation du robot, il doit tourner suffisamment rapidement pour atteindre la source.

La condition *i*) revient à s'intéresser au comportement de  $G$  autour de  $x = 0$  : en supposant que  $G$  soit suffisamment régulière, on peut écrire  $G_n(x, y) \approx \text{sgn}(x) |x|^n g_n(y)$ ,  $\text{sgn}$  étant la fonction signe (avec  $\text{sgn}(0) = 0$ ),  $g_n$  étant à déterminer. On prend  $n \geq 0$  pour avoir une vitesse de rotation bornée. Pour le choix de  $g_n$ , il faut faire intervenir la dynamique du comportement. L'évolution de  $\delta$  obéit à l'équation différentielle  $d\delta/dt = \omega - d\alpha/dt$ . Plaçons-nous maintenant dans le cas axisymétrique, par exemple lorsqu'une source de gaz est placée à l'origine. Si  $(r, \theta)$  sont les coordonnées polaires de  $\vec{r}$ , on a alors  $A(\vec{r}) = | \frac{dC}{dr} |$  et  $\alpha(\vec{r}) = \theta + \pi$ . Alors,  $d\delta/dt = G_n(\Delta C, \bar{C}) - d\theta/dt$  peut s'écrire, lorsque  $\delta \approx 0$ , comme :

$$\frac{d\delta}{dt} = -\left( l \left| \frac{dC}{dr} \right| \right)^n g_n(C) \text{sgn}(\delta) |\sin \delta|^n + \frac{v}{r} \sin \delta = F_n(\delta, r), \quad (1)$$

la cinématique donnant  $d\theta/dt = -v \sin \delta / r$  et  $dr/dt = -v \cos \delta$ . Pour que  $\delta = 0$  soit un point fixe stable de (1), il faut que  $\frac{\partial F_n}{\partial \delta}(0, r) < 0$ . Le terme  $d\theta/dt$  étant destabilisant, le terme correspondant à  $\omega$  doit donc contrebalancer cet effet : il faut donc que  $n \leq 1$ . On peut montrer que la condition de stabilité est automatiquement satisfaite pour  $0 \leq n < 1$ , et que pour  $n = 1$ , il faut que  $g_1(C(r)) > \frac{v}{l} \frac{1}{r |dC/dr|}$ .

La condition *ii*) peut se traduire par le fait que pour n'importe quelle orientation par rapport à la source, le rayon de courbure de la trajectoire soit suffisamment petit pour que, si celui-ci était fixé, le robot puisse se diriger vers la source : il suffit, comme on le voit sur la figure 1, que la longueur de la corde  $AB = 2 |R \sin \delta|$  soit plus petite que  $r$ . Si l'on prend pour  $G_n$  l'expression dérivée plus haut pour  $\Delta C$  petit, on peut montrer qu'il faut prendre  $g_n(C(r)) = h \frac{2v}{l^n} \frac{1}{r |dC/dr|^n}$ , avec  $h > 1$ . On peut montrer que  $h \geq 2$  permet une bonne convergence. Notons que la condition de stabilité pour  $n = 1$  est alors automatiquement vérifiée. En supposant que le profil de concentration est celui donné par la diffusion,  $C(r) = a/r$  <sup>(2)</sup>,  $g_n(C) = h \frac{2v}{l^n} a^{n-1} C^{1-2n}$ . Notons que cette fonction

<sup>2</sup>Dans l'approximation tridimensionnelle, le profil stationnaire de diffusion est  $C(r) = \frac{F}{4\pi D r}$ , où  $F$  est le débit de la source et  $D$  le coefficient de diffusion du gaz.

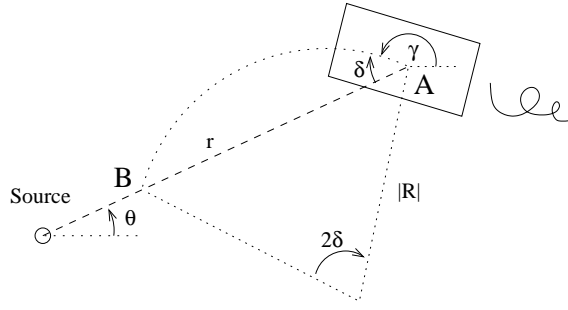


FIG. 1 – Condition de convergence vers la source dans le cas axisymétrique : la longueur de la corde  $AB$  doit être inférieure à  $r$ .

est indépendante du profil de concentration ( $a$ ) que pour  $n = 1$ . On peut montrer que, par construction, la loi  $\mathcal{L}_0$  est la plus stable et la plus convergente pour ce champ de concentration, ce qui se traduit par des trajectoires plus courtes.

## 2.1 Effet de discrétisation du temps

En fait, le robot ne peut disposer d'une estimation des concentrations qu'avec un pas temporel  $\Delta t$  de l'ordre de 0,1 à 1s, en raison de la dynamique des capteurs et du temps de réponse du modèle neuronal. Les simulations de trajectoires présentées ici ont été faites dans ce cas. Entre  $t_p = p\Delta t$  et  $t_{p+1}$ , il parcourt alors un arc de cercle avec la vitesse de rotation  $\omega_p = G(\Delta C_p, \bar{C}_p)$ , le faisant passer de  $\delta_p$  à  $\delta_{p+1} = f(\delta_p)$ . Il peut être montré que les conditions définies ci-dessus restent vérifiées dans le cas discret, hormis l'existence d'une instabilité de la direction  $\delta = 0$  près de la source <sup>(3)</sup>. Ce problème peut être résolu en réduisant la vitesse lorsque la concentration devient élevée.

Les simulations montrent que la condition de convergence permet effectivement d'atteindre la source quelle que soit l'orientation initiale du robot. D'autre part, des valeurs modérées de  $h$  ( $h < 6$ ) sont préférables pour éviter des instabilités.

## 2.2 Effet de l'inhomogénéité

Pour évaluer ces lois dans un cas inhomogène, le champ de concentration obtenu par diffusion en présence de convection a été choisi <sup>(4)</sup> : le panache de gaz relativement étroit qui en résulte, plus réaliste, permet de tester les lois dans un contexte où le gaz n'est présent que dans une zone limitée de l'espace et où le gradient de concentration peut changer de direction et de valeur rapidement. Les simulations montrent que  $\mathcal{L}_1$  et  $\mathcal{L}_{1/2}$  permettent de se diriger convenablement vers la source et de l'atteindre quelle que soit l'orientation initiale.

## 2.3 Effet du bruit

On modélise les fluctuations du champ de concentration ainsi que les incertitudes de l'estimation par un bruit multiplicatif uniforme d'écart-type  $\sigma$  <sup>(5)</sup> appliqué à  $C_{g/d}$ . La loi  $\mathcal{L}_1$  n'est plus efficace à bruit fort, le robot tournant beaucoup trop. La loi  $\mathcal{L}_0$  ne permet

<sup>3</sup>La suite définie par  $\delta_{p+1} = f(\delta_p)$  est stable autour de  $\delta = 0$  si et seulement si  $|\frac{df}{d\delta}(0)| < 1$ , ce qui n'est plus le cas lorsque  $r$  devient de l'ordre de  $v\Delta t$ .

<sup>4</sup>Le profil stationnaire de diffusion avec une vitesse de convection  $V$  orientée dans la direction  $\theta = 0$  est  $C(\vec{r}) = \frac{F}{4\pi D r} e^{-\frac{V}{2D} r(1-\cos\theta)}$ .

<sup>5</sup>Les concentrations étant positives,  $\sigma < 1/\sqrt{3}$ .

plus de converger vers la source pour une orientation initiale éloignée de la direction de la source. La loi  $\mathcal{L}_{1/2}$  se révèle la plus efficace (voir la figure 2). De manière a priori surprenante, les trajectoires simulées atteignent encore la source la plupart du temps, même pour un bruit fort. Leur durée augmente néanmoins de plus en plus avec le niveau de bruit.

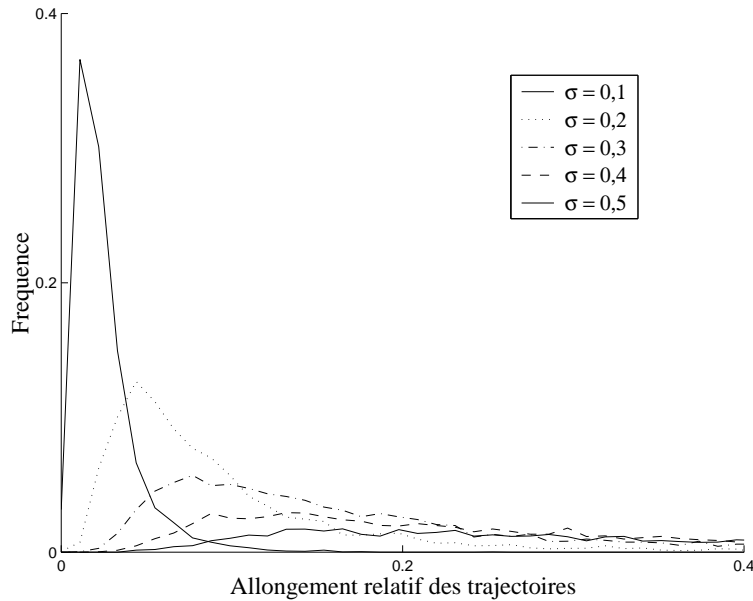


FIG. 2 – Distribution de l'allongement relatif des trajectoires pour la loi  $\mathcal{L}_{1/2}$ . Evolution en fonction de  $\sigma$ .

### 3 Perspectives

Parmi la famille  $\mathcal{L}_n$  de lois de navigation dérivées ici, la loi  $\mathcal{L}_{1/2}$  semble la plus appropriée à la localisation d'une source de gaz, dont la répartition est spatialement et temporellement complexe. L'évaluation sera poursuivie prochainement en situation réelle.

Une extension possible de cette étude serait de tenir compte des estimations de concentration et/ou des vitesses de rotation antérieures afin de diminuer le niveau de bruit.

### Références

- [1] B. W. Jervis, J. Desfieux, J. Jimenez, and D. Martinez. The quantification of gas concentrations in mixtures of known gases using an array of different tin oxide sensors. (A paraître).
- [2] O. Rochel, D. Martinez, E. Hugues, and F. Sarry. Stereo-olfaction with a sniffing neuro-morphic robot using spiking neurons. Euroensors XVI, the 16th European Conference on Solid-State Transducers, Prague, 2002.
- [3] N. J. Vickers. Mechanisms of animal navigation in odor plumes. *Biol. Bull.*, 198 :203–212, 2000.