

AGRIPA : CALCUL DE COÛT D'ACCÈS PAR DIFFUSION CONTRAINTE SUR UN ESPACE DIFFÉRENCIÉ PAR SYSTÈME MULTI-AGENTS

Alain TOURET

Universidad Autonoma de Madrid
Madrid

Résumé

Cet article présente un opérateur spatial raster de calcul de coût d'accès à un réseau routier que nous avons développé au Laboratoire de la Montagne Alpine (LAMA) de Grenoble. Nous utilisons un système multi-agent pour simuler de façon pertinente les modes de circulation des individus. Plusieurs sources de diffusion peuvent être mises en concurrence.

Mots Clés

Accessibilité - Diffusion contrainte - Intelligence artificielle distribuée - Opérateur spatial - Système d'information géographique - Système multi-agent

Un aménagement routier fait perdre une partie de leur sens aux distances kilométriques, à la séparation des villes voisines, aux obstacles infranchissables. Il peut même inverser le rapport distance-temps : ce qui est plus loin en distance kilométrique, peut se trouver plus proche en temps d'accès. Une autoroute peut rendre plus accessible l'une à l'autre deux villes éloignées, que ne l'est un village de la ville la plus proche. Il s'ensuit que la distance kilométrique perd en pertinence pour analyser l'espace géographique.

La distance-temps est une quantité beaucoup plus riche en information que la distance kilométrique : elle caractérise le chemin suivi pour chaque zone élémentaire de l'espace. Si on limite la propagation à un temps fixé, on obtient l'extension de la zone visitable par un mobile en un temps donné.

Agripa est un modèle de calcul de courbes isochrones. A partir d'une carte du réseau routier, nous simulons la diffusion potentielle des individus sur l'espace. Nous utilisons pour cela un système multi-agent pour simuler de façon pertinente les modes de circulation des individus. Il permet de distribuer les calculs à un ensemble d'individus autonomes. Ceux-ci suivent des règles de circulation propres, selon qu'il s'agit de routes, d'autoroutes, d'échangeurs, qu'ils circulent en ville ou à la campagne... Leur propagation s'effectue donc de manière variée, à des vitesses différentes.

1. Système multi-agents : problématique de l'émergence

Un système multi-agent fait appel à la notion de système. Un système est composé d'un ensemble d'entités en interaction ; ces éléments évoluent, s'influencent, de telle façon qu'entre différents instants, il n'est pas le même et pourtant toujours lui-même. C'est un concept plus élaboré que celui d'ensemble, qui postule qu'on ne peut pas analyser les entités séparées de leur contexte.

Les entités actives d'un système multi-agent sont appelées des agents. Ils agissent, ils réagissent à des sollicitations, ils communiquent entre eux, ils raisonnent parfois, ils naissent, vivent, disparaissent. Les agents naviguent dans un milieu pouvant comporter des objets passifs, qui n'ont aucune activité, des obstacles par exemple.

Les agents sont généralement autonomes, plus ou moins ignorants de leur environnement et de ce que font leurs congénères. Certaines de leurs actions se rapportent au milieu physique comme se déplacer, poser un objet, s'alimenter ; d'autres à leur activité interne propre comme raisonner. Ils ont –mais pas obligatoirement– des comportements sociaux et disposent d'un ensemble de signaux conventionnels qui leur tient lieu de langage pour communiquer, se comprendre, se passer des informations, se coordonner.

Le milieu est en quelque sorte la scène de l'évolution collective de la population. On y observe les relations qui se créent entre les individus de façon aléatoire ou intentionnelle : cela s'appelle «l'émergence». On remarque ainsi que des actions qui paraissent intelligemment concertées, ou exécutées, peuvent ne pas avoir été planifiées. Une action crée les conditions favorables à une autre, de sorte qu'elles s'enchaînent spontanément. L'émergence naît de l'adéquation situationnelle : des comportements individuels peuvent favoriser la naissance de situations collectives ; cette notion introduit les idées de changement d'échelle et de cohérence entre niveaux d'organisation. Des actions individuelles, on passe à une série d'actions synchronisées, ressemblant à un plan d'action pouvant impliquer un seul ou plusieurs individus. C'est ainsi que les comportements individuels, qui vont nourrir l'intelligence de cet être abstrait –le groupe– amènent à parler d'intelligence collective.

Pour la conception en informatique, cette notion présente de grands avantages. La production d'une coordination spontanée et appropriée des actes individuels a en effet la propriété d'être tolérante aux perturbations. Elle permet donc d'assurer un certain niveau d'efficacité tout en réduisant en particulier la manipulation de connaissances et le nombre de communications destinées à concerter les actions. Ces dernières sont réputées lourdes à concevoir et à formaliser, difficiles et longues à traiter, fragiles vis-à-vis des modifications. De plus, la planification heuristique, basée sur l'extraction d'informations situationnelles et sur des mécanismes de traitements globaux, ne résiste pas à l'explosion combinatoire lorsque la taille de l'arbre de recherche augmente. L'intelligence artificielle distribuée y est peu sensible [1].

Toutes ces considérations expliquent l'intérêt que l'intelligence artificielle distribuée pour l'étude des systèmes naturels et sociaux [2] [4].

2. Analyse détaillée d'Agripa

A partir d'une carte du réseau routier, étant donné au moins un point de départ, Agripa calcule une carte des minima des durées de tous les trajets possibles vers tous les points d'arrivée accessibles.

L'algorithme de base répond à un principe élémentaire de propagation par contiguïté d'une collectivité d'agents. Au cours du processus, un coût local porté par chaque agent est cumulé puis déposé dans une mémoire collective, une surface vierge similaire à la carte routière. Ce coût représente le temps total de déplacement pour chaque lieu accessible. Le résultat final est issu de l'émergence de la dynamique collective régie par des comportements individuels au sein d'un monde gouverné par des lois.

Nous pouvons distinguer trois niveaux de lois :

– les « lois » statiques :

- 1. la topologie du support, propre au mode de codage des données cartographiques ; matricielle dans AGRIPA, elle aurait pu être triangulaire ou QuadTree ;
- 2. la topologie inférée par le programme, restriction de la topologie du support ; elle rend compte de la connectivité des éléments spatiaux ;

– les « lois » dynamiques :

- 3. la régulation de l'activité de la population ; ici, seuls les agents porteurs de coûts faibles ont le droit de se propager, ce qui permet d'éviter des vagues successives de révisions des coûts ;

– les « lois » individuelles ou comportements des agents :

- 4. la minimisation locale du coût ; une place est considérée comme accessible si l'agent peut minorer son coût d'accès ;
- 5. la propagation par multiplication sur les places contiguës accessibles ;
- 6. le cumul du coût personnel et son marquage sur la place courante ;
- 7. le « suicide », lorsque l'agent est rattrapé par un agent porteur d'un coût moindre.

Les agents sont obligés de se conformer aux lois du monde. La condition de minimisation du coût (4) assure la terminaison du traitement ; la révision des valeurs est possible tant que ce critère est respecté. La concurrence entre les agents (5) assure qu'ils tenteront d'aller partout où c'est possible. Si deux agents se trouvent simultanément sur une même place, c'est que l'un a minoré le coût spécifique d'un autre. Le comportement de suicide (7) sert de sélection naturelle des meilleurs éléments de la population ; le rattrapage des agents « lourds » par les agents « légers » dépend de l'efficacité de la sélection des agents activés par (3) ; la meilleure sélection est d'activer en priorité les agents qui révisent les valeurs de leurs prédécesseurs, ce qui demande de pouvoir partitionner la population en deux classes : les agents « pionniers » et les agents « réviseurs ». Les deux critères (4) et (5) permettent d'affirmer que le résultat final est une carte des minima des temps d'accès.

Détaillons les règles topologiques (2) qui servent à inférer la connectivité des éléments spatiaux. Elles sont traduites dans une relation f binaire dite « de passage » d'un élément à un autre. Cette relation est a priori quelconque. Elle n'a pas besoin d'être symétrique ; elle ne doit pas plus être réflexive ; elle n'est pas transitive. La non transitivité permet de définir des chemins obligatoires.

Par exemple : $f(\text{route}, \text{autoroute}) = \text{faux}$
 alors que : $f(\text{route}, \text{échangeur}) = \text{vrai}$
 et $f(\text{échangeur}, \text{autoroute}) = \text{vrai}$

Nous distinguons les entités spatiales par un type attribué à chacune : espace naturel, espace urbanisé, route, échangeur, autoroute, obstacle, pont. La relation de passage entre éléments se déduit des relations entre leurs types, sauf en ce qui concerne les ponts.

Pour construire la relation de passage, nous supposons deux règles :

- lorsque nous sommes sur un espace, nous utilisons le moyen de locomotion adapté ;
- nous ne pouvons effectivement aller à un autre espace que si nous disposons du moyen de locomotion adéquat (par exemple, sur route, on ne se déplace qu'en voiture).

Elles permettent de formaliser les communications (tab. 1).

Tableau 1 : Formalisation des communications dans AGRIPA

de : (type)		vers : (ensemble de types)
espace naturel	→	{espace naturel, espace urbanisé}
espace urbanisé	→	{espace naturel, espace urbanisé, route, échangeur}
route	→	{espace naturel, espace urbanisé, route, échangeur}
échangeur	→	{espace urbanisé, route, échangeur, autoroute}
autoroute	→	{échangeur, autoroute}
obstacle	→	{}

Notre modèle a actuellement une contrainte : aucun autre type n'est définissable par l'utilisateur, et les relations entre les types ne peuvent pas être modifiées. On ne peut donc pas créer de nouvelles relations entre des entités particulières. Notamment, si une route nationale est composée d'une succession de tronçons de natures différentes, tantôt à deux ou trois voies, tantôt à quatre voies à chaussées séparées, notre modèle impose d'intercaler entre eux des échangeurs...

La communication entre éléments de même type stipule que deux routes qui se touchent communiquent toujours entre elles. Cette relation entre genres plutôt qu'entre objets eux-mêmes peut avoir des effets indésirables. Dans le cas ordinaire, le croisement de routes sur le terrain correspond à un carrefour. Pour que deux routes se croisent sans communiquer, un pont doit être introduit. Par contre, si nos routes sont parallèles dans la réalité, mais jointives dans la représentation pour une question d'échelle, alors le traitement sera erroné. Il faut, soit augmenter la résolution de manière à faire apparaître une bande séparatrice, soit écarter manuellement les deux routes l'une de l'autre, comme le

font les cartographes. La solution envisagée en perspective consiste à donner à l'utilisateur la possibilité de définir lui-même les objets, les types et les relations de passage, mais aussi des cas particuliers au sein des types. Quoiqu'il en soit, la meilleure solution est de résoudre par algorithme les conflits locaux. Stéphane Viviand a réalisé au LAMA un opérateur de rasterisation Quadtree qui fournit un résultat de granularité appropriée à la distinction d'éléments risquant d'être jointifs, voire confondus.

3. Contraintes du codage matriciel

Détaillons les impacts du codage matriciel sur la qualité de la représentation des informations topologiques. Bien qu'il soit très ordinairement utilisé, il montre certaines lacunes dans la représentation des connaissances. Chacune d'entre elles a dû être comblée dans le modèle de calcul pour conduire les traitements.

La topologie intrinsèque de la représentation est liée à la forme des éléments qui la composent et à leur disposition relative. La matrice est formée d'éléments indivisibles dont l'extension spatiale est similaire et dont la forme carrée est standard. Dans ce format, chaque élément admet au maximum 8 voisins, par les côtés et les coins, sa place dans la matrice lui confère un repérage qui trouve une correspondance spatiale sur le terrain. Ce codage a de multiples conséquences :

- a. Il ne représente pas les entités elles-mêmes, mais signale leur présence, sélectionnée en fonction d'un ordre de préférence établi sur les entités réelles. Les objets n'existent pas, c'est une notion d'un autre niveau.
- b. Il détruit l'intégrité des données en morcelant les objets de taille supra-parcellaire et en confondant ceux de taille sub-parcellaire :
 - les objets cohérents empiétant sur plusieurs unités élémentaires perdent leur intégrité ; une autoroute se trouve parcellisée de la même manière que des champs ;
 - des entités nombreuses de taille réduite se verront agrégées au sein de parcelles indivisibles, seront donc perdues au profit d'une unité technique qui pourra éventuellement les faire confondre avec une entité cohérente : à l'extrême, une juxtaposition de flaques d'eau pourrait être confondue avec un lac.

La cohérence d'un objet supra-parcellaire est acceptée a priori lorsque les pixels sont en contact par les côtés. Mais comment décide-t-on de la cohérence de cet objet si les pixels se touchent par les coins ? C'est ainsi que la diffusion, pour être correcte, exige d'inférer ce que la représentation a perdu : l'intégrité des entités spatiales. Le truchement d'une connaissance externe est indispensable pour résoudre ce conflit.

Pour cela nous avons introduit une information supplémentaire qui ordonne les types d'entités spatiales prédéfinis. Nous les avons classés par ordre de priorité en fonction de leur cohérence a priori. Une autoroute est un élément continu non traversable, alors qu'un champs l'est : nous lui attribuons une préférence dans le processus de diffusion, codée par une priorité plus élevée.

- c. Il n'y a pas coïncidence entre la forme et l'extension spatiale de l'élément matriciel et celles de l'objet. Il n'y a donc pas non plus de rapport de surface non plus entre les deux, ni de respect de leur échelle. Si l'on représente une route, un chemin, ou une autoroute dans une matrice dont les éléments occupent 100 mètres au sol, tous seront de la même largeur. Comme les agents sautent du centre d'une entité spatiale à un autre, la précision du chemin suivi dépend aussi de la finesse de la résolution. On pourrait affiner la résolution si elle dépendait moins de l'occupation mémoire, du temps et des possibilités de calcul, ainsi que du coût d'acquisition des données. Le choix de l'échelle de travail est un compromis entre ces critères.
- d. Par elle seule, une matrice reste muette. Pour la faire parler, il faut en décrire le contenu par une légende externe. Aux éléments matriciels sont associés une qualité, le type, et si nécessaire une valeur, la vitesse de circulation.

La matrice est une forme de représentation bi-dimensionnelle. C'est pourquoi les ponts doivent faire l'objet d'un traitement spécial pour simuler une dimension verticale.

En somme, le codage matriciel ajoute des contraintes (perte d'intégrité des grands objets), impose un processus de calcul (propagation par voisinage, approximation de la précision des calculs, taille mémoire), et nécessite une description additionnelle des données (qualification, règles de cohérence par priorité). Ces remarques ne sont pas directement transposables aux deux autres modes de codage, triangulaire et Quadtree.

4. Applications

Nous avons traité quatre exemples à visée pédagogique. Pour chacun d'eux, la vitesse est identique sur l'espace naturel. Il y a chaque fois un seul point de départ que repère un point sombre. La zone a 12 km de côté ; les classes de temps s'échelonnent toutes les 10 mn. Elles donnent des classes d'équivalence des lieux vis-à-vis de la circulation. Elles révèlent la structure de l'espace au regard de notre phénomène. La carte résultant du traitement est en quelque sorte la représentation mentale qu'a un robot de son environnement.

La figure 1 donne le résultat d'une diffusion depuis un point de départ central vers l'espace uniforme. Les courbes isochrones se disposent régulièrement en auréoles autour du point d'origine. En fait, il ne s'agit pas de cercles, comme il devrait être, mais d'octogones réguliers. C'est la conséquence de la topologie propre de la représentation matricielle, dans laquelle les places de dimension identique ont généralement huit voisins. Pour arrondir la forme générale et augmenter la précision des calculs, il faudrait s'extraire d'une ou plusieurs de ces contraintes.

La figure 2 montre deux routes orthogonales sur un espace homogène. Le point de départ se situe au croisement des deux routes. La vitesse de circulation y est environ vingt fois celle sur l'espace naturel. Les isochrones s'étirent le long des voies, en s'amenuisant progressivement.

La figure 3 montre un point de départ central, un obstacle linéaire et deux percées excentrées, qui sont comparables au cas d'une rivière et de deux ponts. Nous pouvons observer un contraste prononcé, en formes de propagation et en valeurs, de part et d'autre de l'obstacle. Entre les deux côtés, les courbes sont pratiquement orthogonales, et au maximum, huit classes de temps séparent les bords distants de 100 m. La propagation au niveau des percées prend la forme circulaire typique du déplacement d'une onde qui lèche l'arrière d'un obstacle pris de face. Elle rappelle la forme que prennent les vagues lorsqu'elles dépassent la jetée d'un port. Chacune des percées paraît être une pseudo-source de diffusion qui se met en concurrence avec l'autre pour se partager l'espace caché par l'obstacle. C'est ainsi que le résultat ressemble à une diffraction d'onde.

La figure 4 : Elle représente deux centres urbains que relie une route (70 km/h) et une autoroute (130 km/h). L'aspect le plus remarquable de cette carte est l'effet de l'autoroute : la première isochrone enferme les deux villes ; elle s'allonge le long de la route, à tel point qu'il semble y avoir deux origines. Du point de vue spatial nous avons deux villes bien distinctes, alors que du point de vue spatial, deux villes se distinguent, alors que du point de vue temporel elles se confondent en un seul. Comme pour l'exemple précédent, nous observons une rupture de part et d'autre de l'autoroute dans la forme des isochrones. Ceci est dû à l'effet d'obstacle produit par l'autoroute pour quiconque souhaite la traverser.

La sensibilité d'AGRIPA à la qualité des données demande qu'on lui associe une interface de mise au point des cartes. Nous introduirons bientôt un facteur de modération de la vitesse en fonction des pentes et de la sinuosité de la route. Nous ouvrirons la définition des communications entre objets aux utilisateurs.

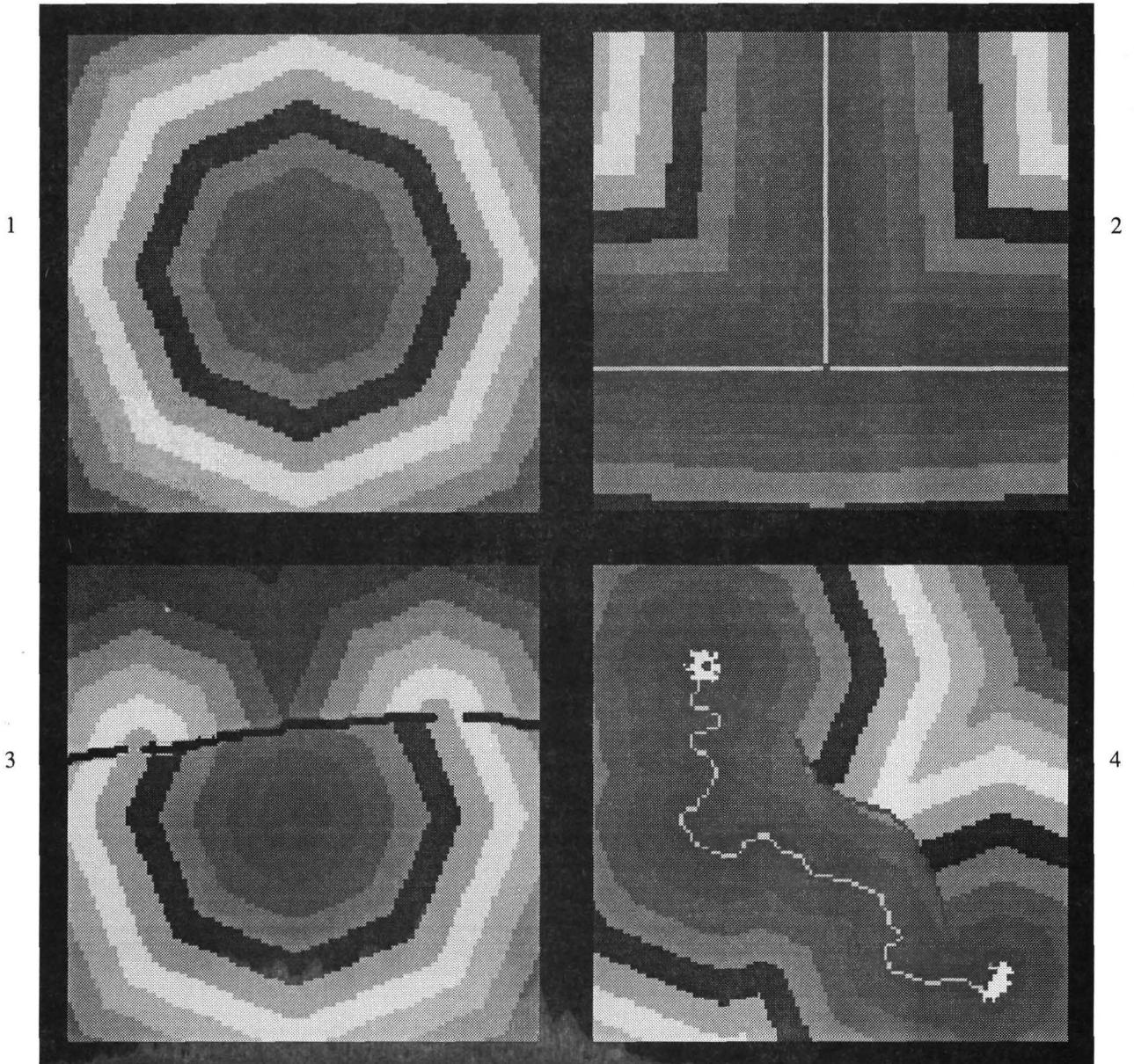
D'ores et déjà, AGRIPA se greffe sur le système d'information géographique GRASS, en tant que nouvel opérateur spatial. Il est utilisé au LAMA [5] et à l'Ecole des Mines de Sophia Antipolis [3].

Figure 1 : Diffusion à partir d'un point central dans un espace uniforme

Figure 2 : Diffusion dans un espace doté de deux routes perpendiculaires

Figure 3 : Diffusion à partir d'un point central en situation complexe : présence d'un obstacle linéaire et de deux percées excentrées

Figure 4 : Diffusion avec effet d'autoroute



Bibliographie

- [1] DROGOUL A. : *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agent*, Thèse de doctorat de l'Université PARIS VI, 1993, 358 pages
- [2] FRESNEAU D. : *Biologie et comportement social d'une fourmi ponérine néotropicale (Pachycondyla Apicalis)*, Thèse de doctorat d'Etat es sciences de l'Université PARIS XIII, 1994, 331 pages
- [3] GUARNIERI F. : « Aide à la décision à référence spatiale dans le domaine de la prévention des incendies de forêts : le système Wilfried », in *Revue Internationale de Géomatique*, 1994, vol. 4, n° 3-4, pp. 257-269
- [4] TOURET A. : *Stratégie individuelle et organisation émergente*, Rapport de stage de DEA Intelligence Artificielle Distribuée, LAFORIA, Université de PARIS VI, 1992, 37 pages
- [5] VIGNERON V. : « Risque de périurbanisation et accessibilité routière : aide à la décision dans le cas de l'autoroute Grenoble-Sisteron », *Actes des Journées de la Recherche CASSINI*, Lyon, octobre 1994, pp. 65-74