

L'union fait l'intelligence!

Rien de plus stupide qu'un insecte. Pourtant, en groupe, les fourmis et autres « insectes sociaux » font des merveilles. À tel point que les informaticiens et roboticiens n'ont rien trouvé de plus malin... que de les imiter.

Olivier Fèvre

Pour franchir un gouffre ou déplacer une charge, l'union fait la force ! Ces petits robots (*swarm-bots*) imitent collectivement la technique des fourmis en s'accrochant les uns aux autres pour joindre leurs efforts comme le font les fourmis de la photo de gauche. En guise de phéromones, ondes infrarouges ou wi-fi permettent de communiquer... et l'essaim de robots s'« auto-organise » sans intervention extérieure !

Chaque fois que vous décrochez votre téléphone portable ou surfez sur internet, vous pouvez remercier les fourmis ! Et les abeilles, les guêpes et les termites, pour ne pas faire de jaloux.

Rassurez-vous : aucune de ces bestioles ne batifole dans vos appareils dernier cri, ni ne déambule dans l'immense toile de câbles tissée sur la planète. Non, si ces insectes se sont révélés si utiles, c'est à cause de leur intelligence remarquable !

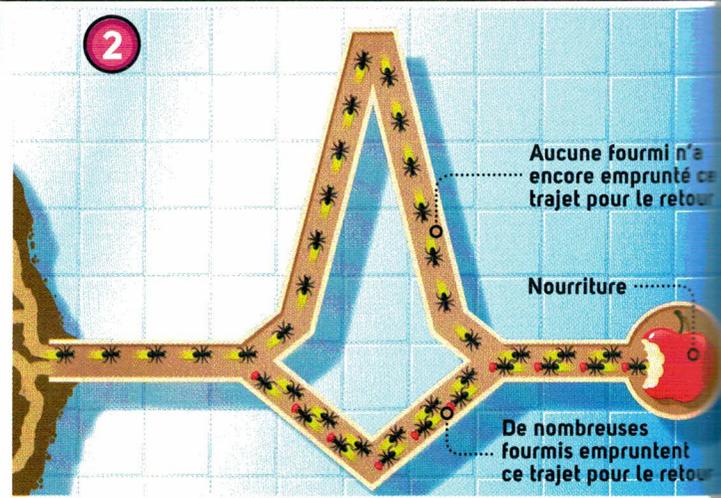
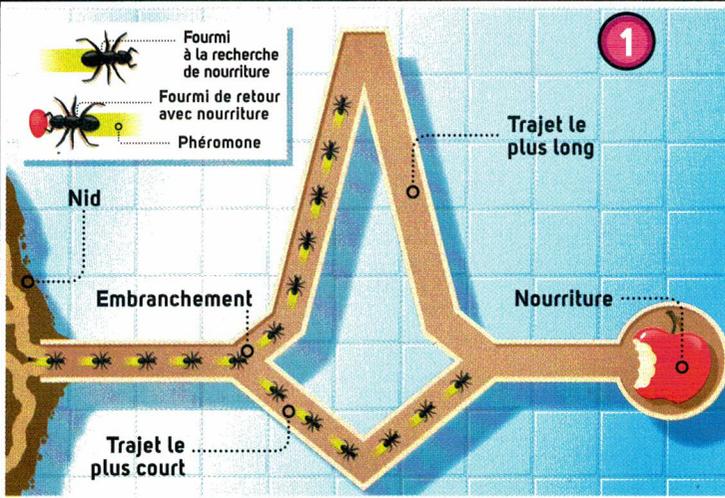
Toutes ces bestioles sont d'une bêtise crasse. Mais on parle d'« insectes sociaux », regroupés au sein de colonies très peuplées, ce qui fait toute la différence ! Car la force du nombre et des millions d'années d'évolution leur ont permis de mettre sur pattes des stratégies d'ensemble pour assurer leur survie, se nourrir, se protéger... ou même construire des cathédrales naturelles ! Une véritable « intelligence collective », si étonnante et féconde que des chercheurs s'en sont inspirés pour développer le concept d'« intelligence en essaim ». Le principe se résume ainsi : observons à la loupe ces bestioles qui vivent en société ; comprenons leurs comportements, leurs interactions et ce qui les anime ; tentons enfin de les imiter pour améliorer nos logiciels et nos technologies, voire développer des systèmes auxquels – cornegidouille ! – on n'avait carrément pas pensé. Bien sûr, pas question de créer de pâles copies d'insectes, à 6 pattes, 4 ailes et 2 antennes virtuelles dont ils ne sauraient que faire une fois lâchés dans un environnement numérique. Ni de construire des insectoïdes mécaniques qui imiteraient leurs courbes à la perfection. Ce qui compte, c'est de laisser interagir un grand nombre d'entités artificielles baptisées « agents ». L'aspect de ces bouts de programme ou de ces petits robots n'est dicté que par leurs seules fonctions : se déplacer,

s'associer, se transformer, etc. Il ne reste alors plus qu'à les instruire de quelques règles élémentaires pour espérer les voir développer, par la force du nombre, une forme d'intelligence collective.

Les règles du jeu de société

Mais quelles règles au juste ? Pour le comprendre, les chercheurs ont scruté le comportement d'insectes vivant en colonies. Au-delà du chaos, sont apparus quelques principes de base qui permettent à l'ensemble de s'« auto-organiser ». Tordons ainsi le cou à cette idée tenace que la reine des fourmis ou des abeilles régirait tout son petit monde en distribuant des ordres en veux-tu, en voilà, du genre « *Pose-moi un œuf ici !* » ou « *Hep ! toi là-bas, va butiner la jolie pâquerette n° 8215 !* ». En fait, les reines sont aussi stupides que leurs congénères et n'ont aucune vision globale du développement de la colonie. Pour tout dire, leur rôle se limite surtout à pondre des œufs et elles ne doivent souvent leur couronne qu'au plus grand des hasards (voir encadré p. 93).

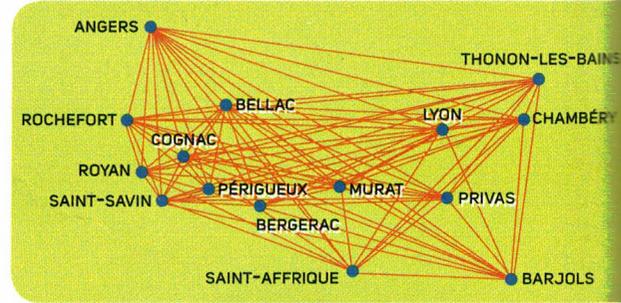
En réalité, tout l'échafaudage repose sur un éventail de comportements simples, « inscrits » dans chaque individu au point de devenir quasi automatiques : de même que vous retirez vivement la main quand vous vous brûlez, les insectes ne réfléchissent pas, n'ont pas la moindre intention. En termes savants, on parle de « stimuli » (pluriel de « stimulus ») qui provoquent des « réponses » adaptées de la part des bestioles. Et comme leurs petites têtes n'abritent qu'un nombre limité de neurones (de dix à cent mille contre 100 milliards chez nous), ces comportements sont en nombre très réduit : une vingtaine chez les ouvrières fourmis. Et surtout très simples, du type : « *Je marche ou vole tant que je ne trouve rien d'intéressant* », « *Je fais ceci si je sens l'odeur d'un copain* » ou « *J'arrête de faire ça si le trou est bouché* ». Et s'il y a échange d'informations, c'est sans autre langage qu'une odeur laissée ici, ou une danse endiablée entreprise là. En fait, pour une colonie, le plus grand donneur d'ordre



Comment trouver le chemin le plus court entre le nid et une source de nourriture? Dans cette expérience, deux chemins sont proposés à des fourmis, l'un étant deux fois plus long que l'autre. Arrivées au premier embranchement ①, les premières fourmis empruntent au hasard l'un

ou l'autre chemin, s'emparent du gueuleton, puis reviennent au nid ②. Or durant leur périple, elles ont aussi régulièrement déposé des phéromones (traces jaunes) pour marquer le chemin. Résultat des courses: les fourmis qui ont emprunté la voie la plus courte sont

rentrées le plus vite et ont marqué la piste avec davantage de phéromones ③. Au gré des allers retours, les fourmis sont davantage attirées par la piste riche en phéromones, la renforcent à leur tour, si bien que seul le chemin le plus court est finalement sélectionné ④.



est l'environnement! Il provoque des stimuli chez chaque insecte, qui agit dès lors comme un automate... jusqu'à ce qu'il perçoive un autre « ordre » qui déclenche une nouvelle tâche. Les spécialistes parlent de « stigmergie » (du grec *stigma*, « signe », et *ergon*, « travail ») depuis que le biologiste Pierre-Paul Grassé l'a définie comme la « stimulation des travailleurs par l'œuvre qu'ils réalisent ». Au bout du compte, le grand secret de l'intelligence collective, c'est qu'environnement et individus tissent à chaque instant un réseau complexe d'interactions qui permet aux insectes d'échanger des informations et de coordonner leur activité: chacun participe à l'œuvre commune en réagissant bêtement à ce que cette œuvre devient!

SUR LE CHEMIN, UN MESSAGE: « PAR ICI LA BONNE SOUPE! »

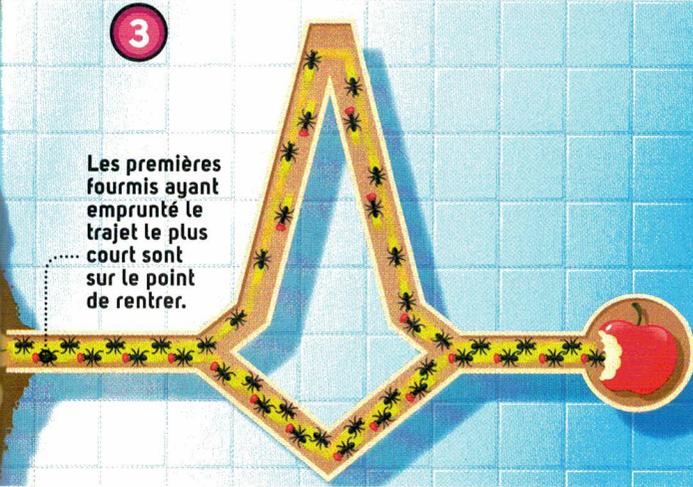
Les humains copient!

Calquée sur ces modèles vivants, l'« intelligence en essaim » reprend donc ce principe: une sarabande d'agents lâchés au hasard dans un environnement réel ou virtuel interagissent avec leur proche voisinage en suivant des règles simples. Résultat? Un b.a.-ba qui rend béat: des ordinateurs ou des robots instruits à cette sauce peuvent générer une forme d'intelligence collective! Prenez par exemple cette tâche essentielle: « Nourrissons la colonie ». Il s'agit d'être efficace, autrement dit de rapporter un maximum de nourriture en un minimum de temps. Or ces stupides fourmis s'en sortent à merveille en découvrant – comme par magie – le plus court

chemin qui sépare leur nid d'une bonne grosse pomme. Elles ne discutent pas, ne connaissent pas le coin et se contentent de libérer des substances chimiques – les phéromones – de temps en temps. Rien d'autre que des « bouteilles à la terre » jetées au hasard et sans destinataire précis! Mais une fois conjugués à l'échelle de la nation Fourmi, ces dépôts de phéromones prennent l'allure d'un message très explicite: « Par ici la bonne soupe! » (voir *Modèle à suivre n° 1 ci-dessus*). Et si un obstacle se dresse sur ce chemin balisé, *no problemo*: la multiplication des points chimiques aménage un itinéraire de contournement aux petits oignons. Miam! Cuisiné à la sauce numérique, ce comportement collectif permet par exemple de résoudre une tâche extrêmement complexe, baptisée « problème du voyageur de commerce ». Il consiste à déterminer le chemin le plus court qui relie des villes ou un ensemble de points (voir « Voyage expresse » ci-dessus). La question se résout facilement pour quatre ou cinq points: il suffit de mesurer tous les chemins possibles et de retenir le meilleur. Mais quelques dizaines de points suffisent pour multiplier le nombre de chemins jusqu'à ce qu'il devienne astronomique! Solution: utiliser un « algorithme de colonies de fourmis », un programme informatique calqué sur leur comportement. Des agents fourmis sont alors lâchés au hasard entre les points, déposent des phéromones virtuelles et, petit à petit, trouvent le chemin le plus court. Les exemples d'applications sont, dès lors, très nombreux. De tels algorithmes permettent de planifier les livraisons pour un transporteur,

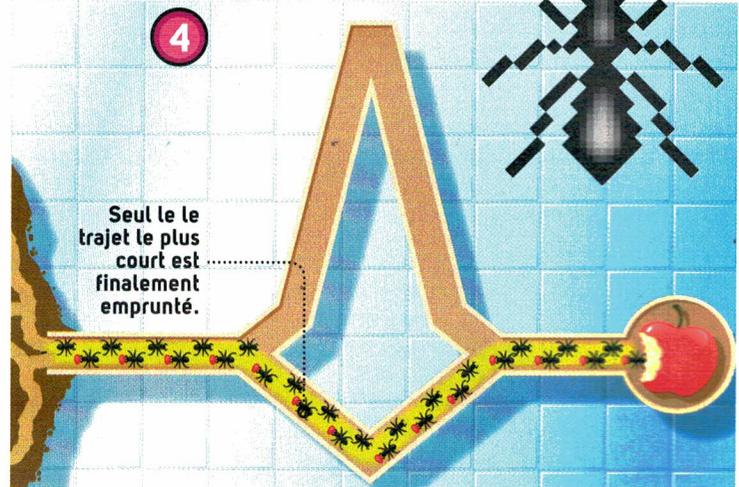
3

Les premières fourmis ayant emprunté le trajet le plus court sont sur le point de rentrer.



4

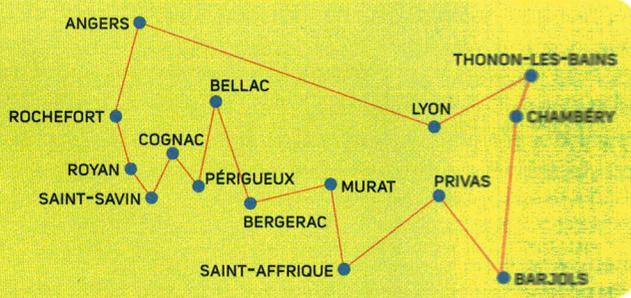
Seul le trajet le plus court est finalement emprunté.



Voyage express

Pour relier 15 villes, en passant seulement 1 fois par chacune, il y a des milliards de chemins possibles (schéma de gauche). Pour trouver le plus court, on a créé des fourmis virtuelles. Après avoir relié les villes en laissant des phéromones, chaque fourmi revient par le

même chemin. La phéromone s'évaporant, les parcours longs sont moins chargés en phéromones et les plus courts, plus chargés, sont les plus suivis. Le chemin de droite, obtenu ainsi, n'est peut-être pas le plus court, mais au moins l'un des plus courts.



ANTOINE LEVESQUE POUR SVJHS

ZOOM

Un **bit** (pour *binary digit*), est un nombre écrit avec seulement deux chiffres: 0 et 1. C'est la quantité minimale d'information transmise par un message.

Le **nectar** est un liquide sucré produit par les fleurs.

d'optimiser la position de robots et d'ateliers dans une usine, de minimiser le temps de perçage ou de découpe d'un matériau, etc. Mais ce n'est pas tout! Nos fourmis réagissent au quart de tour pour contourner un obstacle. Une « adaptativité » qui, mise en œuvre au cœur d'un réseau, permet d'éviter son engorgement. Le premier à en bénéficier fut celui des lignes téléphoniques: quand l'une d'elles était coupée ou encombrée, un algorithme permettait d'établir sans délai un nouveau chemin pour contourner le problème. Aujourd'hui, grâce à des **bits** d'information déposés en guise de phéromones par des agents virtuels, des descendants de ces algorithmes de fourmis permettent de gérer le trafic sur internet ou entre les antennes et relais du réseau cellulaire de nos téléphones portables.

Les abeilles ont développé d'autres stratégies grâce à trois qualités essentielles: leur bon goût, un chouïa

de mémoire... et leur penchant pour le *dance floor*. Certes, pas question de danser avec des stars du **nectar**, mais grâce à des comportements de base, les abeilles parviennent collectivement à explorer de nouveaux lieux de butinage, à se communiquer leurs positions et, surtout, à optimiser la collecte de nectar pour le plus grand bien de la ruche, en adaptant leur rôle – ouvrière, éclairceuse, butineuse – à leur âge et aux besoins (voir *Modèle à suivre n° 2, p. 94*).

Et si l'on ajoute mémoire et communication...

Du coup, les chercheurs s'en sont inspirés pour améliorer leurs agents numériques: là où ils se contentaient de réagir à leur environnement comme les fourmis, les voici dotés d'une petite dose de mémoire et d'une capacité sommaire de communiquer des infos à leurs congénères. Ce qui permet une approche plus « qualitative » de certains problèmes: la recherche de la qualité peut alors primer sur la seule quantité.

En simulant ces comportements, plusieurs « algorithmes d'abeilles » ont ainsi été développés. Par exemple, pour répartir au mieux des tâches entre ingénieurs, en tenant compte de leurs compétences et de leurs préférences. Gain d'efficacité garanti! Un autre algorithme optimise la structure des barres entrecroisées qui forment le squelette de ponts ou d'avions, pour en augmenter la résistance aussi bien que la légèreté. Des résultats bluffants ont aussi été obtenus dans l'analyse d'images, par ///

Le rôle essentiel du hasard

Le hasard est un élément indispensable au bon développement d'une colonie. Certes, faute de plan ou d'ordres stricts, il arrive souvent qu'une fourmi déambule sans le moindre but ou qu'un termite détruit le mur qu'un autre vient tout juste de construire. Mais sans le hasard, impossible de trouver de nouvelles sources de nourriture, ni de multiplier les rencontres aléatoires, donc les interactions... Quand ils développent un modèle d'intelligence en essaim, les

chercheurs prennent donc bien garde de laisser agir le hasard. Un « agent » va emprunter telle ou telle route numérique sur le Web, commencer par prélever une information aléatoire dans une gigantesque base de données, ou un petit robot va déambuler n'importe où jusqu'à rencontrer un obstacle. Par nature, le comportement des agents doit rester aléatoire... jusqu'à ce qu'un stimulus leur commande d'agir. L'intelligence en essaim est fille du hasard et du temps qui passe!

!!! exemple pour reconstruire un visage en 3D à partir de photographies ou pour visualiser le fonctionnement de notre cerveau par imagerie médicale (IRM). Même le design de nano-puces électroniques en a bénéficié : l'architecture et l'efficacité de leurs circuits ont été améliorées grâce à des abeilles artificielles virevoltant jusqu'à trouver la meilleure configuration possible.

D'autres insectes sociaux sont aussi étudiés de très près pour leurs talents de bâtisseurs. Comme les termites, qui frôlent le génie (collectif) quand ils construisent une termitière de plusieurs mètres de haut : poumon démesuré qui surmonte leur nid, elle permet d'en réguler la température et d'oxygéner le sous-sol. Sans plan ni compas, à l'aide de leurs seules mandibules, d'un cerveau rikiki et de comportements simplissimes, ils érigent un habitat si remarquable que des architectes humains s'en inspirent pour construire des immeubles (voir p. 82). Quant aux guêpes, elles illustrent à merveille les subterfuges de la nature pour varier les plaisirs. Au lieu de changer les règles de construction d'un nid, elle laisse simplement le hasard s'exprimer un peu plus ici ou là : par une sorte d'effet papillon qui se propage à l'ensemble, des architectures très différentes sont observées selon l'espèce qui les a bâties (voir *Modèle à suivre* n° 3, p. 95). Les spécialistes de l'intelligence

LA TERMITIÈRE EST UN CLIMATISEUR COLLECTIF GÉANT!

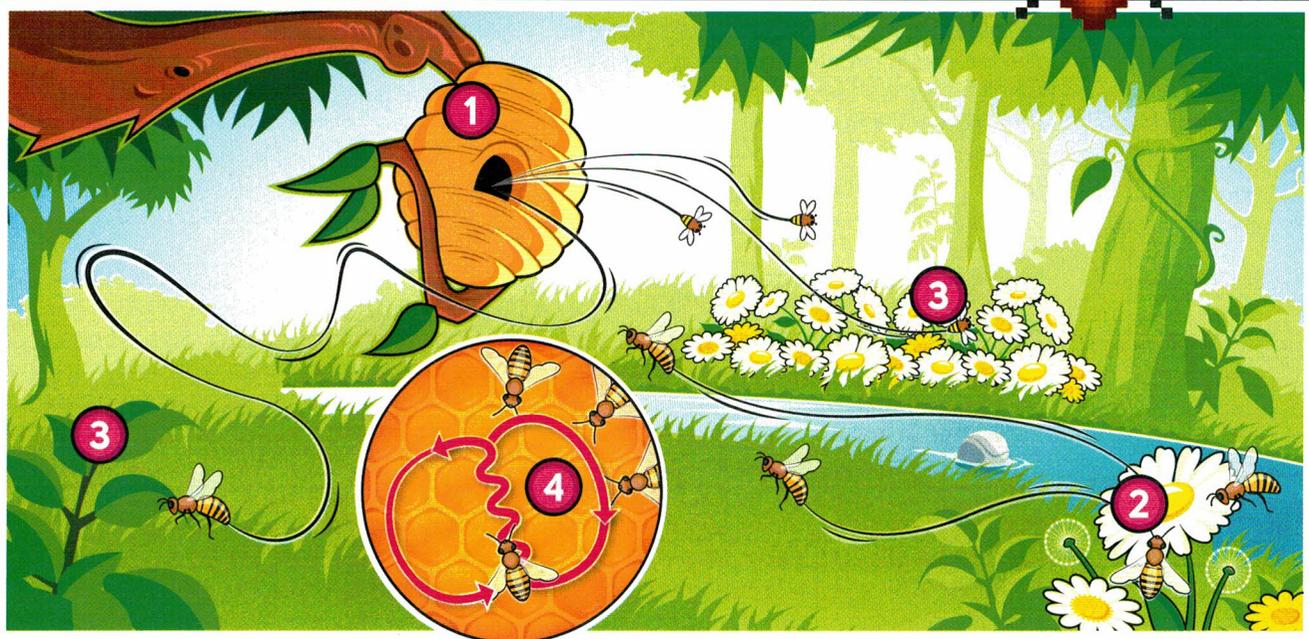
en essaim le vérifient d'ailleurs constamment en développant leurs simulations numériques. Changer un iota des paramètres qui déterminent le comportement de ses agents peut modifier du tout au tout l'activité de la « colonie ». Des programmes ou des robots se révèlent alors assez inefficaces, voire totalement ridicules... Mais rien de plus normal : nos insectes sociaux ont mis des millions d'années à tester, peaufiner et intégrer les comportements élémentaires qui les animent. Imiter Dame Nature ne se fait pas en un claquement de mandibules!

Fille naturelle de l'intelligence en essaim, la « robotique en essaim » a connu un essor spectaculaire ces dernières années. Objectif : combiner les talents de légions de petits robots – parfois baptisés *swarm-bots* (contraction de *swarm*, « essaim », et *bot*, pour « robot ») – pour qu'ils s'auto-organisent et agissent dans notre environnement. Pour vérifier ce concept, les premières versions ont mis en jeu des robots identiques, capables d'imiter les comportements basiques d'insectes sociaux (comme le projet européen *Swarmanoid*, photo p. 91). Mais le fin du fin, c'est désormais d'associer une sarabande de *swarm-bots* spécialisés dans des tâches différentes : des robots

ou des robots se révèlent alors assez inefficaces, voire totalement ridicules... Mais rien de plus normal : nos insectes sociaux ont mis des millions d'années à tester, peaufiner et intégrer



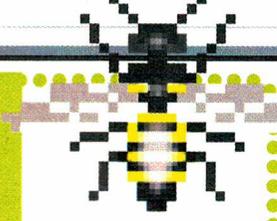
MODÈLE À SUIVRE N° 2 L'ABEILLE



Les abeilles sont un formidable exemple de flexibilité au travail : elles jouent différents rôles selon leur âge et les besoins de la ruche. Elles stockent le pollen et le nectar, nourrissent les larves, construisent et nettoient les cellules, protègent l'habitat contre les intrus... Puis, devenues butineuses, elles sont actives, passives ou éclaireuses. Elles suivent alors cet « algorithme » naturel : pendant que les butineuses actives vont et viennent

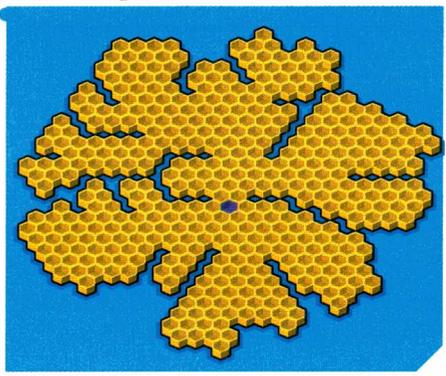
entre la ruche ① et une source de nourriture ②, les passives attendent à la maison. Les éclaireuses, elles, partent explorer les environs ③, guidées par le hasard. Quand l'une d'elles découvre une source de nectar, elle la goûte et, si elle ne s'avère pas plus profitable que celle qu'exploitent les butineuses actives, elle en cherche une autre. Dans le cas contraire, la nouvelle source remplace dans sa mémoire la position de l'ancienne.

Une fois revenue à la ruche, l'éclaireuse transmet cette position aux abeilles passives grâce à une danse ④. Et cette information sera répercutée au fur et à mesure du retour des butineuses actives, de sorte que – de proche en proche – elles délaisseront l'ancienne source pour ne retenir que la plus profitable. Résultat : entre butinage et recherche de secteurs plus prometteurs, les abeilles optimisent sans cesse la collecte pour la ruche.



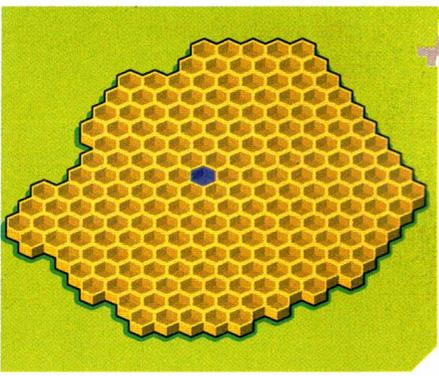
cellules à six côtés (hexagones). Chaque guêpe sociale, quelle que soit son espèce, est obsédée par une seule question : où vais-je bâtir une nouvelle cellule ? Pour y répondre, elle maîtrise quelques règles de base, un « logiciel » rudimentaire.

À gauche, la représentation de la coupe d'un nid de guêpe du sud-est de l'Asie, *Parapolybia varia*. À droite, celle d'un nid de guêpe européenne *Polistes dominulus*. Notez bien la différence d'architecture : le modèle asiatique présente des arborescences invisibles sur l'autre. Les deux nids ont pourtant été construits à partir



de simples règles communes à toutes les espèces, seule la place laissée

au hasard diffère ! En effet, les guêpes sociales construisent leur

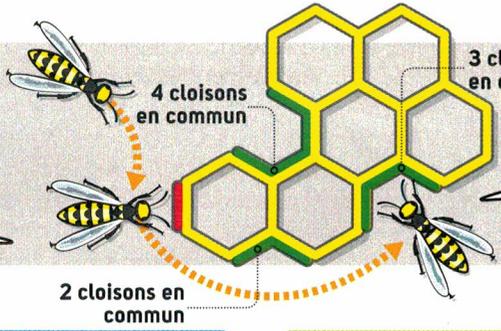


nid à l'aide de fibres de bois cimentées par des sécrétions salivaires. Elles

forment de petites boulettes de carton avec lesquelles elles créent des

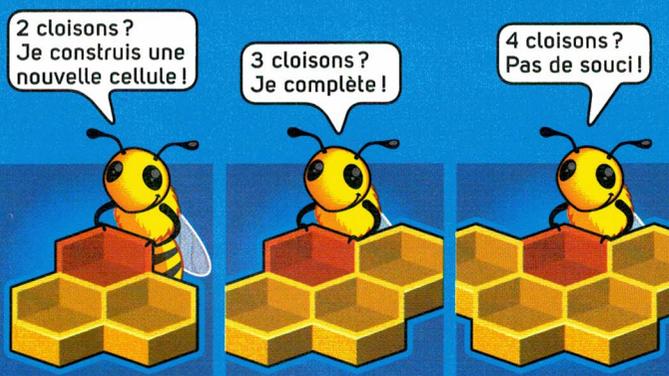
Règle n° 1 Quand j'arrive à un espace libre au bord du nid, je compte avec mes antennes le nombre de cloisons déjà en place.

Règle n° 2 S'il n'y a qu'une seule cloison en commun avec ma future cellule (ici, en rouge), je vais voir ailleurs.



Règle n° 3 Selon la possibilité d'avoir 2, 3 ou 4 cloisons en commun, j'ai plus ou moins de chances de construire une nouvelle cellule.

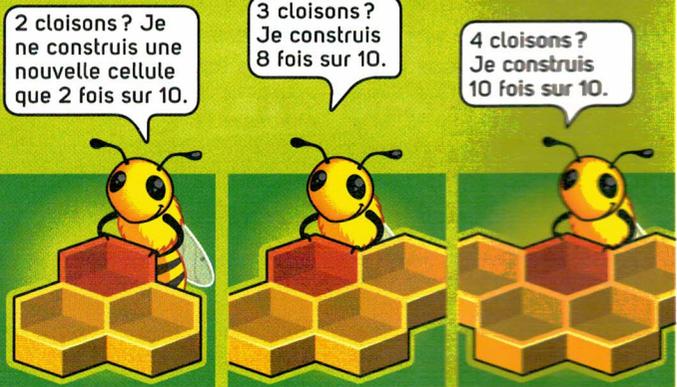
C'est l'application de cette règle n°3 qui fait toute la différence ! Chez les guêpes d'Asie *Parapolybia varia*, quel que soit le nombre de cloisons déjà en place, la probabilité de construire une nouvelle cellule sont les mêmes : il y a quasiment 100 % de chances qu'elles se mettent au travail !



CONCLUSION : il suffit qu'une espèce de guêpe adopte une toute petite palette de chance d'agir ici ou là pour qu'émerge

une forme de nid adaptée à ses besoins. C'est le moyen le plus économique qu'a trouvé la nature pour que, à partir

En revanche, en étudiant des guêpes d'Europe *Polistes dominulus*, puis en simulant leur comportement avec des « guêpes virtuelles », on a découvert que la probabilité de construire une nouvelle cellule augmente à mesure que le nombre de cloisons adjacentes est plus important.



de simples règles communes à tous ces insectes sociaux, tout un éventail d'architectures leur soit accessible !

marcheurs pour se déplacer, des robots mains pour saisir des objets ou se hisser à l'aide d'un grappin, des drones volants en guise de robots œil pour percevoir l'environnement et guider les autres... À chacun ses compétences, afin qu'émerge de l'ensemble la capacité de s'adapter à quantité de problèmes. Mais l'avenir est aux essaims de robots capables de nous servir utilement. Une équipe étasunienne du MIT (Massachusetts Institute of Technology) a développé l'intelligence collective d'une dizaine de drones. Une fois lâchés au-dessus d'une région, ils rempliraient des tâches variées, sans opérateur ni plan de vol : prise de vue aérienne, relevés atmosphériques, création d'un réseau local de communications, recherche de

victimes, etc. Des *swarm-bots* miniatures seraient aussi très utiles pour se glisser dans des environnements risqués ou inaccessibles à l'homme, par exemple après un tremblement de terre ou une catastrophe nucléaire. À plus long terme, des équipes comme celles du Wyss Institute (États-Unis) envisagent d'utiliser des essaims de « nanovéhicules », des robots si infimes qu'on pourrait les injecter dans le corps humain ! Grâce à leurs circuits biologiques, ils s'auto-assembleraient pour remplir des fonctions médicales ciblées, comme favoriser la régénération de tissus, délivrer un médicament ou même attaquer des tumeurs cancéreuses. Inspirés par les insectes sociaux, des nano-essaims pourraient bien nous sauver la vie !