

et en allemand. Utilisant les entiers jusqu'à 100, L. Sallows a trouvé des carrés alphamagiques d'ordre 3 dans 19 langues, mais aucun en danois et en latin.

En français, il y a exactement un carré alphamagique n'utilisant que des nombres jusqu'à 200, mais 255 autres si les éléments peuvent aller jusqu'à 300. Trois d'entre eux ont pour logarithme neuf entiers consécutifs. L'un d'eux est donné dans l'encadré ci-dessous (le premier nombre entre parenthèses est le terme numérique, le second est son logarithme).

En allemand, il n'y a pas moins de 221 exemples utilisant des nombres inférieurs à 100. L'un d'eux est dans l'encadré. Le principe de base de construction se comprendra si l'on extirpe les syllabes «und» et «zig» et remplace les «mots» restants par des nombres, ce qui donne (9).

J'ai écrit le premier chiffre en rouge, car il doit être multiplié par 10 pour obtenir sa véritable contribution à la valeur numérique : ainsi «fünf-und-vierzig», signifiant cinq-et-quarante. Séparons à présent

les composantes bleues et rouges pour obtenir (10) et (11).

(10)

4	6	5
6	5	4
5	4	6

(11)

5	2	8
8	5	2
2	8	5

Chacun est un carré latin, les trois mêmes nombres apparaissant dans chaque ligne et chaque colonne (de sorte que colonnes et lignes ont mêmes sommes) et le carré étant aussi magique. C'est encore le cas lorsque les termes en rouge sont multipliés par 10 et lorsque ce dernier carré est ajouté, terme à terme, à celui à termes en bleu. Chacun des nombres obtenus a le même logarithme, 14, le carré initial étant nécessairement alphamagique.

Que dire des ordres supérieurs ? L'artifice des carrés latins orthogonaux fonctionne encore. Par exemple, en anglais, le carré dont les termes numériques sont (12) :

(12)

26	37	48	59
49	58	27	36
57	46	39	28
38	29	56	47

est alphamagique. Les chiffres bleus for-

ment un carré latin d'ordre 4, les rouges de même, et la régularité de la formation des noms des nombres entre 20 et 99, en anglais, fait le reste. L. Sallows baptise du nom «d'ersatz» de tels carrés, car ils ne sont pas trop faciles à trouver. Pour trouver les vrais, il faudra dénicher des cas autrement exceptionnels, tel que (13) :

(13)

31	23	8	15
17	5	21	34
26	38	13	0
3	11	35	28

Ce champ de recherche comporte au moins trois questions ouvertes, envisageables dans toute langue alphabétique.

1. Un carré est dit «normal» si ses termes sont, à l'ordre près, les entiers consécutifs à partir de 1 inclus. Pour l'ordre 3, il n'y a qu'un seul carré magique normal (à des notations ou réflexions près), et il n'est pas alphamagique. Et pour l'ordre 4 ? En anglais, le nombre total de lettres pour écrire les noms des 16 premiers entiers est 81, ce qui ferait une constante magique du carré logarithmique associé de... $81/4 = 20,25$. Ce n'est pas un entier et il n'existe donc pas, en anglais, de carré d'ordre 4 alphamagique normal. Il en est de même en français. Le même argument montre que le plus petit ordre envisageable pour un carré normal alphamagique, en anglais, est 14, avec une constante magique de 189. Personne, semble-t-il, ne sait si un tel carré existe effectivement, et c'est là la première question ouverte.

2. Existe-t-il un $3 \times 3 \times 3$ cube alphamagique ?

3. Le passage à l'associé logarithmique conduit d'un carré d'entiers à un autre et peut donc être itéré pour donner un dérivé second logarithmique, et ainsi de suite. Jusqu'où peut-on poursuivre le processus en n'obtenant que des carrés magiques ? Sans conditions autres, la réponse est : «indéfiniment». Pour voir cela, reprenons le carré alphamagique en allemand analysé précédemment. Son dérivé logarithmique, qui n'est formé que de 14, est trivialement magique. Alors son dérivé second logarithmique n'est, lui, formé que de 8, et ainsi de suite. Mais existe-t-il une langue et des exemples dans lesquels aucun des dérivés logarithmiques de tous ordres ne soit formé de termes tous égaux ?

SOLUTION DU PROBLÈME INDIQUÉ

8	19	18
25	15	5
12	11	22

Alphamagique internationale

Le premier nombre entre parenthèses indique la valeur numérique, le second le logarithme.

SWAHILI

arobaini na tano (45,14)	sitini na saba (67,12)	hamsini na tisa (59,13)
sabini na moja (71,12)	hamsini na saba (57,13)	arobaini na tatu (43,14)
hamsini na tano (55,13)	arobaini na saba (47,14)	sitini na tisa (69,12)

GALLOIS

chwech deg dau (62,12)	wyth deg (80,7)	saith deg pedwar (74,14)
wyth deg pedwar (84,13)	saith deg dau (72,11)	chwech deg (60,9)
saith deg (70,8)	chwech deg pedwar (64,15)	wyth deg dau (82,10)

FRANÇAIS

quinze (15,6)	deux cent six (206,11)	cent quinze (115,10)
deux cent douze (212,13)	cent douze (112,9)	douze (12,5)
cent neuf (109,8)	dix-huit (18,7)	deux cent neuf (209,12)

ALLEMAND

fünfundvierzig (45,14)	zweiundsechzig (62,14)	achtundfünfzig (58,14)
achtundsechzig (68,14)	fünfundfünfzig (55,14)	zweiundvierzig (42,12)
zweiundfünfzig (52,14)	achtundvierzig (48,14)	fünfundsechzig (65,14)

Créatures

CHRISTOPH PÖPPE

Grâce à ce logiciel, des êtres artificiels d'une étonnante complexité naissent, vivent et se reproduisent dans un ordinateur personnel.

Avez-vous déjà rencontré un *norn*? Ses yeux ovoïdes démesurés le font ressembler à E.T., mais il est plus petit, plus velu et plus vif. Il sautille comme un jeune chien, il observe avec curiosité tout ce qui bouge, se précipite dessus et s'y brûle parfois les doigts. Ne vous étonnez pas de ce comportement enfantin : le *norn* sort de l'œuf ; ultérieurement, quand il aura appris, il aura un comportement plus «intelligent».

L'œuf qui contenait le jeune *norn* était sur une disquette. Il a été couvé dans un fantastique engin qui tient à la fois du four à micro-ondes et du tube à essais... mais il est virtuel : tout comme la couveuse et le monde où évoluent les *norns*, il est le fruit d'un programme informatique nommé *Créatures*. Ce jeu n'est pas un de ces jeux de combat où l'on doit détruire des vaisseaux ennemis et des monstres, et ce n'est pas non plus un de ces jeux classés X qu'il faut interdire aux enfants : l'accouplement des habitants du monde virtuel est court et pudique. Ce monde, nommé *Albia*, est un paradis naturel : une petite éolienne tourne à côté d'une ruche entourée d'abeilles, des carottes pous-

sent, entourées d'autres plantes, et un funiculaire romantique conduit à une île isolée sur laquelle une foule de découvertes nous attendent (voir la figure 1).

Celui qui exécute le programme *Créatures* sur son ordinateur (à cette date, le programme ne fonctionne que sur les ordinateurs de type PC équipés de Windows 95 et d'un lecteur de disques compacts, mais une version française sortira en mars 1997 pour les ordinateurs Macintosh), n'a pas de mission spéciale, mais il peut être le démiurge d'*Albia* : le pointeur de la souris prend la forme d'une main avec laquelle on peut mettre les œufs dans la couveuse, protéger et soigner les *norns*, leur enseigner les bonnes habitudes par des caresses et par des fessées, les encourager à s'accoupler et les protéger contre les plantes empoisonnées, les bactéries et les *grendels*, qui sont des êtres semblables aux *norns*, mais malfaisants. L'éducation des *norns* doit commencer tôt : un *norn* qui n'a pas appris à respecter l'autorité du démiurge risque d'ignorer ultérieurement toutes les indications qui assureront sa survie. Le but du jeu n'est pas de marquer le plus de points pos-

sible en réussissant à élever des *norns* ; c'est surtout de découvrir les beautés des recherches sur la vie artificielle, généralement effectuées sur de gros ordinateurs.

Les jeux informatiques se fondent généralement sur un algorithme : les concepteurs envisagent toutes les situations que peuvent rencontrer les personnages conduits par l'utilisateur ; ils partent habituellement d'un scénario complexe et le décomposent en une suite d'opérations élémentaires, exécutables par l'ordinateur. Dans le cas de *Créatures*, au contraire, les spécialistes de la vie artificielle procèdent de bas en haut : le déroulement complet de la vie des *norns* et des *grendels*, tout comme l'évolution de l'écosystème d'*Albia*, n'ont pas été programmés explicitement, mais résultent d'un nombre de concepts élémentaires aussi réduit que possible.

LES CRÉATURES

Le rêve des spécialistes de vie artificielle serait d'observer, dans une soupe originelle numérique, l'apparition d'une vie qui ressemblerait à celle qui est née sur la Terre, il y a 3,5 milliards d'années. Comme cet objectif semble bien au-delà des possibilités actuelles de l'informatique, les *norns* et les *grendels* ont, d'emblée, été équipés de capacités qui les situent assez haut sur l'échelle de l'évolution : ils disposent d'un riche patrimoine héréditaire, qui code aussi bien les instincts que diverses fonctions mentales et organiques, des comportements innés ou la résistance aux maladies infectieuses.

La vie des créatures dure en moyenne 12 heures d'exécution du programme ; elle est abrégée quand un *norn* est empoi-



1. Le monde virtuel des *norns* est douze fois plus large et trois fois plus haut que les écrans d'ordinateur. La partie du monde qui apparaît sur l'écran suit automatiquement les mouvements de la créature que le joueur examine. La couveuse est dans la cuisine.

Si on y met un œuf, un enfant *norn* qui en sort 20 secondes plus tard explore aussitôt son entourage. Le monde contient des moyens de transport, tels des ascenseurs qui sont fabriqués en tige de bambou, un funiculaire et un sous-marin. Certains objets sont

sonné, par exemple, mais elle atteint 14 heures quand tout se passe bien. Le cas favorable est celui où, la créature ayant passé par six stades évolutifs successifs, avec des apparences et des comportements spécifiques, a en outre pondu ou fécondé quatre à six œufs.

L'activité instantanée des *norms* n'est pas entièrement fixée par leur hérédité et par les circonstances extérieures : leur passé et leur humeur jouent un rôle décisif dans leur comportement. Aussi les *norms* ont-ils parfois des comportements inattendus.

L'idée du programme ne vient pas d'un spécialiste de vie artificielle ou d'un informaticien professionnel, mais d'un professeur en retraite, Stephen Grand, qui vit aujourd'hui dans le Sud-Ouest de l'Angleterre. Ayant commencé à programmer avec le système informatique *Logo*, mis au point pour un but pédagogique par Seymour Papert, S. Grand continua ses recherches personnelles, alors que l'enthousiasme général était retombé. Le programme *Créatures* a été édité par la Société *Millenium*, de Cambridge, et il est distribué en France par la Société *GT Interactive Warner*.

Comment transformer un jeu scientifique en un produit avec lequel on pourrait s'amuser ? Ceux qui ont repris le travail de S. Grand se sont un peu écartés des préoccupations des spécialistes de la vie artificielle, afin que les créatures survivent plus qu'un instant. Dans le programme actuel, rares sont les circonstances qui font mourir de faim tous les *norms*, et les bébé *norms* n'ont pas tout à apprendre par essais et erreurs : certains comportements (nommés instincts) ont été rendus innés, comme par exemple de porter à la bouche tout ce qui leur tombe sous la main (ils attra-

Procurez-vous le logiciel *Créatures* par la revue *Pour la Science* (voir page 65).

pent ainsi de la nourriture avec une plus grande probabilité) ; progressivement ces comportements sont remplacés par des comportements appris. Et le créateur du monde artificiel a, dans sa grande sagesse, disposé la cafetière, les bouteilles d'eau-de-vie et les citrons suffisamment haut pour que les plus jeunes ne puissent pas les attraper.

Inversement les *norms* ne prolifèrent pas excessivement, car les bactéries grouillent dans *Albia* ; et les *norms* malades peuvent transmettre leur infection par la toux ou par l'éternuement. Or, sans une plante guérissante absorbée au moment approprié, la fièvre tue les *norms*. Le joueur peut, en conséquence, administrer la médecine nécessaire (il lui suffit de mettre le *norm* en présence des plantes guérissantes, qui seront mises en bouche, par exemple) ou, s'il craint la surpopulation, les attirer vers les dangers.

L'hérédité *norm* est également inspirée de l'hérédité réelle, mais les règles ont été assouplies. La plupart des mutations ne sont pas mortelles : grâce à un codage approprié, les informations génétiques ne peuvent jamais contenir de « fautes de grammaire », même après une mutation. S. Grand utilise ici des idées provenant de la technique des algorithmes génétiques, qui recombinaient des programmes, tout comme l'évolution naturelle recombine les génomes des individus.

Lors de la fécondation de certains organismes réels, des séquences s'échangent entre le chromosome maternel et le chromosome paternel : après la juxtaposition de ces deux chro-

mosomes, ces derniers sont découpés, et les morceaux correspondants s'échangent. Par ce moyen, l'enfant hérite d'attributs de ses deux parents. Cette recombinaison a également lieu lors de la reproduction des *norms*. Et, comme chez les véritables êtres vivants, des caractères se retrouvent associés, alors qu'ils n'ont initialement rien à voir. Par exemple, après quelques générations, les *norms* agressifs pourront tous avoir un visage bleu foncé.

Dans la nature, lorsque les points de coupure des chromosomes ne correspondent pas exactement, des gènes peuvent être doublés ou perdus. Ce phénomène se retrouve dans les créatures d'*Albia* : seuls quelques gènes vitaux sont protégés des mutations, de la disparition ou du dédoublement, afin que le joueur puisse jouir de nouveaux *norms* en bonne santé. Pour simplifier la génétique des *norms*, les créateurs de *Créatures* ont décidé que le patrimoine génétique des créatures artificielles serait contenu sur un seul brin, chez le mâle comme chez la femelle ; les gènes spécifiques d'un sexe sont passifs quand ils sont présents chez un individu qui n'est pas de ce sexe, mais ils peuvent redevenir actifs chez leurs enfants.

UN COUP D'ŒIL DANS LES COULISSES

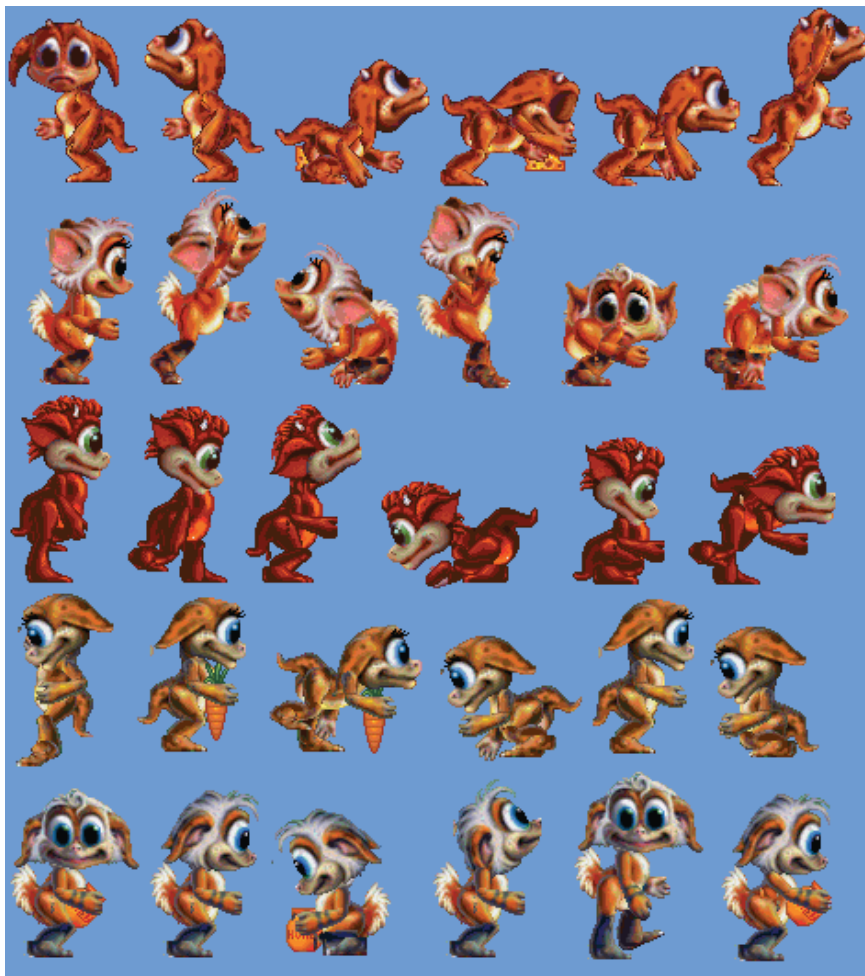
Quelle est la vie interne des *norms* ? On apprend progressivement en observant les *norms* parcourir leur monde. Un peu d'attention montre rapidement que le stress raccourcit leur vie.

La capacité de calcul d'un petit ordinateur personnel suffit pour calculer, toutes les dix secondes, un nouvel état



des jouets, tel un ballon, et une machine qui enseigne automatiquement quelques mots aux créatures. Quelques aliments de base, tels des carottes, du fromage et du miel, fournissent aux créatures l'énergie vitale nécessaire. Une douche règle leur température,

le café dans le pot aide à lutter contre la fatigue, un projecteur de diapositives les divertit. Grâce à la souris de l'ordinateur, qui apparaît à l'écran sous la forme d'une main, l'utilisateur peut intervenir dans le monde des créatures.



Millennium Interactive Ltd. - Kasten

2. Cinq norns dans six attitudes différentes. Des caractéristiques telles que la couleur du corps, l'allure ou la forme des oreilles sont déterminées génétiquement et peuvent changer avec l'âge. L'expression du visage donne une information sur l'état d'esprit des créatures.

du monde où évoluent les *norns*, tant que leur nombre n'est pas excessif (dix est une limite, en pratique). Une grande partie de ce temps est consacrée à la représentation graphique (très précise et réaliste) du nouvel état. Comment les concepteurs du jeu ont-ils obtenu ce remarquable résultat, malgré les limitations des petits ordinateurs ?

Tout d'abord, le monde représenté n'est pas aussi compliqué qu'il le paraît. C'est un monde à deux dimensions seulement, où les créatures ont peu de liberté. L'impression de variété est donnée parce qu'une même action, appliquée à des objets différents, peut signifier des choses très différentes : manger une carotte, boire un café, mettre en marche une éolienne ou un sous-marin, ou bien brancher la couveuse.

Le système de perception des créatures est extrêmement simplifié. Les informations de l'extérieur parviennent au cerveau sous une forme abstraite : un objet envoie une information sous la forme de quelques bits, lorsqu'il apparaît dans le champ visuel d'un *norn*, quand il bouge

ou bien quand il se transforme. On parle avec les créatures en tapant des mots au clavier de l'ordinateur.

Naturellement les *norns* semblent des êtres complexes, puisqu'ils peuvent même apprendre quelques mots ; toutefois, la programmation de cette capacité n'a rien d'extraordinaire : dans le cerveau des *norns*, une toute petite place sert à stocker les noms des objets et des actions. Quand un *norn* perçoit suffisamment souvent un mot en même temps qu'il tient un objet ou qu'il fait une action, le mot est mémorisé. Et si l'on n'a pas le courage d'enseigner aux *norns* à parler, on peut toujours utiliser une machine d'enseignement, au rez-de-chaussée de la maison qui contient la couveuse.

La langue primitive des *norns* leur permet de se parler de leur environnement ou d'apprendre de nouveaux mots en s'écoulant mutuellement. Ainsi un langage primitif peut se transmettre de génération en génération.

Les deux éléments centraux qui déterminent la vie d'un *norn* sont, d'une

part, son cerveau et, d'autre part, une foule de paramètres qui dirigent son métabolisme et son comportement. Le cerveau des *norns* est un réseau de 1 000 neurones artificiels (ce nombre, déterminé génétiquement, peut être modifié dans la descendance par mutation) : ces unités de calcul rudimentaires sont groupées en structures assurant des fonctions variées (voir l'encadré page 103). Malgré sa simplicité, le cerveau des *norns* trouve de l'ordre dans les données qui lui sont soumises, et il mémorise les relations découvertes ; comme il s'agit d'un réseau de neurones formels, les associations et les mémorisations sont implicitement codées. Pour chaque situation, le cerveau enregistre aussi les comportements qui seraient utiles dans les diverses situations rencontrées, par exemple assouvir un besoin urgent ou calmer une douleur.

Les représentations du cerveau des créatures s'inspirent largement du comportement, non pas parce que les auteurs étaient convaincus par cette théorie, mais parce que celle-ci postule une structure du cerveau très simple, qui permet de réduire le temps de calcul. Selon cette théorie, le comportement des individus est déterminé par leur vécu : au cours de leur vie, les individus apprennent à répéter les comportements avantageux et à éviter les réactions pénalisantes. Dans cette hypothèse, une représentation détaillée du monde, des sentiments, des buts et des stratégies pour atteindre ces buts est inutile.

Munis de leur petite capacité intellectuelle, les *norns* n'ont pas spontanément l'idée de cultiver des carottes ou de séduire l'autre sexe en offrant des présents appropriés (un tel comportement peut toutefois apparaître à l'occasion d'une association, sans interprétation explicite), mais ils ont une idée primitive de l'espace : ils savent où ils ont déjà trouvé à manger et se dirigent spontanément vers ces endroits.

EN PASSANT PAR LA CHIMIE

La digestion des *norns*, leur fatigue, leur agressivité, leurs «envies» et leurs «sensations» de douleur ou de plaisir, leurs maladies et leur mort sont déterminées par des paramètres qui sont présentés dans le jeu comme des concentrations en diverses molécules : certaines ont des noms connus, tels «glucose», «glycogène» ou «adrénaline», mais d'autres sont plus globales, telles «chaleur», «sommolence», «récompense» ou «punition». Le nom importe peu, car les «sentiments», les «substances chimiques» ou les «températures» ne sont que des

Le cerveau des *norns*

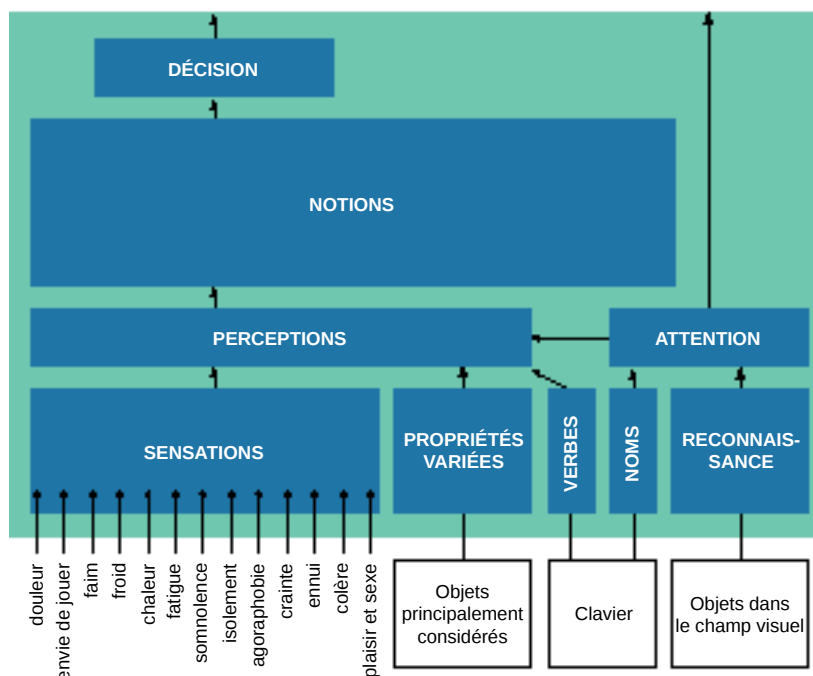
Les *norns* et les *grendels* sont capables d'apprendre, parce qu'ils ont, en guise de cerveau, un réseau de neurones artificiels, qui transforme les stimuli externes et les sensations en un état interne, lequel est ensuite converti en actions. La structure de ce «cerveau» est déterminée génétiquement, comme la plupart des caractéristiques des *norns*. Il est possible que, par suite de mutations, les générations futures de *norns* disposent d'un cerveau plus gros, plus petit ou construit différemment. La structure de base décrite ici est celle dont sont pourvues les créatures de la première génération.

Les réseaux de neurones formels, tel celui qui constitue le «cerveau» des *norns*, sont composés d'unités élémentaires de calcul nommées neurones formels. Comme les vrais neurones, ces derniers reçoivent des signaux des autres neurones formels. Les réseaux de neurones classiques sont généralement organisés en couches, l'information circulant d'une couche à la couche immédiatement supérieure. Elle passe ainsi de la couche d'entrée (les organes sensoriels) jusqu'à la couche de sortie, où se manifeste le résultat de l'activité neuronale. Chaque neurone convertit le signal entrant en un nombre (qui représente l'activité du neurone), qu'il transmet ensuite aux neurones plus en aval ; l'information ne tourne pas en rond.

Les neurones formels des *norns* sont équipés d'une petite mémoire à court terme et d'une petite mémoire à long terme : de la sorte, les informations mémorisées ne déterminent pas entièrement le comportement, mais ce qui s'est déjà produit intervient avec un effet qui s'amenuise progressivement. Enfin, dans la couche de sortie du réseau, le neurone dont l'activité est maximale bloque tous les autres.

Ce modèle des couches, légèrement modifié, a été repris pour la construction des *norns*. Les couches se nomment ici des lobes de cerveau (les rectangles de la figure). Tous les neurones d'un lobe sont semblables, mais leurs caractéristiques et la structure de leurs liaisons sont très différentes selon les lobes. Le principe du blocage par le neurone le plus actif oblige les créatures à ne s'intéresser qu'à un seul objet à la fois et à faire seulement ce dont elles ont le plus envie parmi les nombreuses choses qu'elles voudraient parfois faire.

Le cerveau des *norns* leur permet surtout d'apprendre grâce à leurs expériences. Ainsi les neurones du lobe sensoriel se spécialisent dans la détection de combinaisons d'événements qui se produisent souvent. Le lobe de compréhension, qui contient la majorité des neurones, combine ceux-ci en «notions». Ici sont stockées les expériences que la créature a déjà vécues, ainsi que la situation et ses propres réactions : si un *norn* s'est brûlé à un moment où il voyait le ballon rebondir et où il s'intéressait à un four, son cerveau stocke une règle empirique du type : «si le ballon rebondit et que le four est là, alors il ne faut pas toucher le four.» Une telle association s'établit

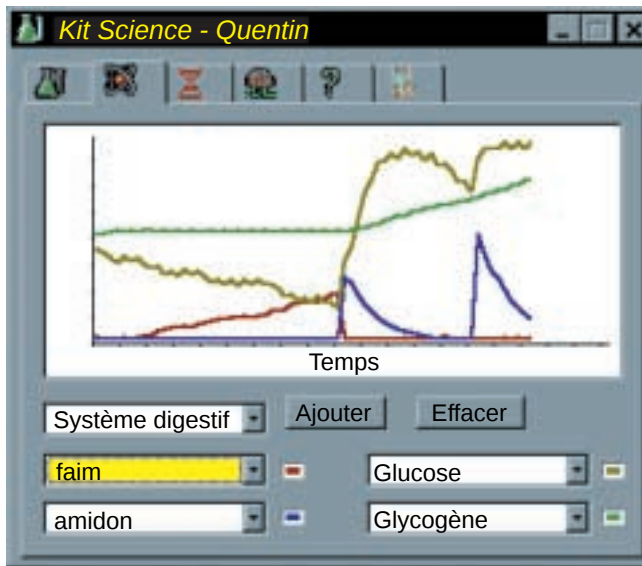


automatiquement ; de plus, si, ultérieurement, le *norn* voit le four sans le ballon, il reconnaîtra la situation comme semblable à la précédente, et il éloignera ses doigts du four.

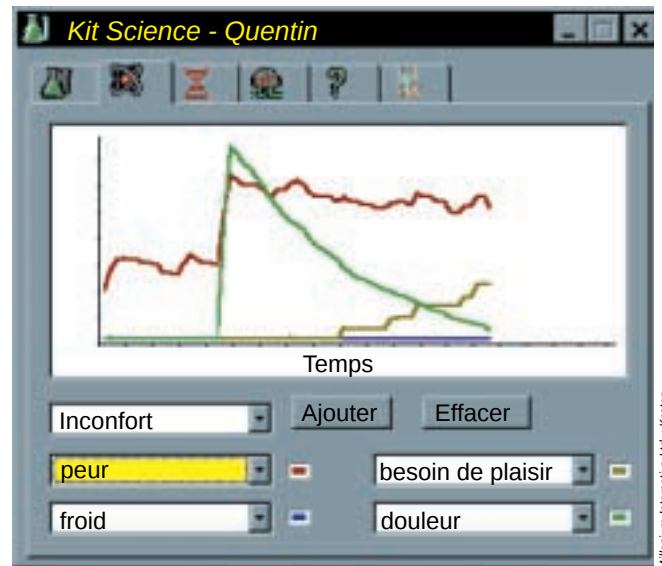
De telles règles expérimentales ne sont pas mémorisées explicitement dans le réseau de neurones, mais dans ce qu'on nomme les poids des connexions synaptiques, c'est-à-dire des facteurs d'amplification qui déterminent à partir de quelle intensité et pour quel signe l'activité d'un neurone a des conséquences sur le neurone suivant. L'apprentissage est assuré par un changement des poids synaptiques.

Ce changement est assuré par un algorithme de rétro-propagation, qui permet un transfert d'information à contre courant du flux général. Chez les créatures, ce ne sont pas des synapses qui font ce travail, mais les changements sont assurés par voie chimique : une expérience agréable, par exemple, libère une substance de récompense. Une synapse qui a participé à une décision effectivement prise par la créature reste pour quelque temps réceptive à cette substance : son poids augmente lorsque le succès se répète. De même, une substance de punition diminue le poids des synapses qui ont emporté pour la décision, lorsque la décision a été mauvaise. Pour les synapses qui avaient pris position contre la décision, les substances ont l'effet opposé. Les noms des substances qui règlent ainsi le comportement des *norns* révèlent l'origine behavioriste du codage utilisé. L'instance de récompense ou de punition n'est plus ici un expérimentateur qui donne de la viande à un chien en faisant sonner une cloche ; elle siège dans le cerveau même de la créature.

Les neurones et les synapses des créatures ne sont pas assez nombreux pour enregistrer toutes les situations imaginables. C'est pourquoi le système veille à ce qu'il y ait toujours suffisamment de neurones et de synapses disponibles. À cette fin, les liaisons peu utilisées diminuent progressivement et peuvent même disparaître.



3. Une partie du programme nommée *Kit Science* montre l'état interne des *norns*. Ici le *Kit Science* montre l'état interne du *norn* nommé Quentin. Lors d'un effort, la concentration en glucose dans le sang diminue, et la faim augmente (à gauche). Quand Quentin mange une carotte, la concentration en amidon croît soudainement et rediminue peu à peu en se transformant en glucose, qui, lui-même, se transforme – bien plus lentement – en glycogène. Simultanément la



faim diminue brusquement. La deuxième carotte, que Quentin mange peu avant la fin de l'intervalle de temps représenté, est plus grosse et élève la concentration en glucose jusqu'à son maximum. Quand Quentin touche le four brûlant (à droite), la douleur augmente rapidement, mais se calme assez vite aussi, alors que le niveau de peur, qui a aussi monté, diminue plus lentement. Après un moment, l'instinct du jeu renaît.

nombres qui satisfont des systèmes d'équations. Ainsi le «glucose» est produit à partir de l'«amidon» ; il se transforme réversiblement en «glycogène» et il est indispensable à la bonne «santé» des *norns* (voir la figure 3). En outre, il libère une «substance» nommée «diminution de la faim», qui diminue la quantité de substance «faim». L'«alcool» des *norns* est une substance qui produit une démarche chancelante et qui augmente l'agressivité des mâles et la disposition à l'accouplement des femelles.

À chaque instant, ces substances se modifient conformément aux équations initialement programmées. Le changement est calqué sur ce que les chimistes nomment la loi d'action de masses, de sorte qu'il engendre des comportements plausibles.

Dans le programme, chaque substance, chaque neurone et chaque objet sont des objets, au sens de la «programmation orientée objet» : ce sont des constructions indépendantes, qui exécutent leurs propres règles de calcul lorsque le programme principal le leur permet. L'indépendance des objets facilite la construction de nouveaux objets : ils ne viennent pas gêner ceux qui existaient déjà.

LE FUTUR D'UN MONDE

Les concepteurs du jeu ont fait en sorte que les *norns* se comportent comme des animaux domestiques, vifs et sympathiques, mais la construction ascendante ne leur permet pas de prévoir

l'évolution de ces créatures. Déjà, *Albia* leur a réservé quelques surprises : ils ont vu deux *norns* se mettre à jouer spontanément au ballon, parce qu'ils avaient découvert que le jeu leur procurait du plaisir. Une autre fois, ils ont vu un *norn* mâle poursuivre une femelle qui s'enfuyait, parce qu'elle n'avait manifestement pas envie de se reproduire ; finalement le mâle a abandonné et s'est endormi, frustré. Et, un jour, un joueur qui revenait de déjeuner, après avoir laissé son ordinateur branché, a retrouvé une ribambelle d'enfants qui étaient nés en son absence : une des créatures avait découvert qu'elle pouvait se procurer des camarades de jeu en mettant les œufs dans la couveuse pour les faire éclore plus vite.

Après de nombreuses générations de *norns*, les évolutions surprenantes ne devraient pas manquer. Vraisemblablement des *norns* seront plus robustes ou plus fertiles que leurs ancêtres, en raison de mutations favorables. Comme on peut envoyer des *norns* par courrier électronique, ces *norns* évolués devraient se propager, et le distributeur de programmes devrait en voir de toutes les couleurs.

Une culture albiannaise se développera-t-elle ? Les *norns* finiront-ils par apprendre ce que savent leurs parents ? Des groupes de créatures se différencieront-ils au point que les individus de deux groupes différents ne pourront plus se reproduire ? Ce serait la naissance de nouvelles espèces... Ou bien l'évolution des *norns* s'éloignera-

t-elle de plus en plus de l'évolution biologique, parce que le modèle théorique a été mal choisi ?

Toutes les équations programmées peuvent muter. Aucune loi n'empêche une mutation qui conduirait à une meilleure conversion du glucose en glycogène : des créatures pourraient progressivement, si cette conversion devenait extrêmement efficace, disposer d'une réserve de glucose quasi inépuisable. De même, l'immortalité ou la production illimitée d'œufs sont envisageables.

Dans un texte devenu célèbre, le mathématicien anglais Alan Turing (1912-1954) avait imaginé un test pour savoir si une machine pouvait penser : il proposait qu'on déclare intelligente une machine qui pourrait dialoguer avec un être humain au point que ce dernier ne puisse pas deviner qu'il converse avec une machine.

De même, si les créatures artificielles présentent toutes les caractéristiques que l'on attribue habituellement aux organismes vivants, doit-on admettre qu'elles sont vivantes ?

Christoph Pöppe est éditeur à la revue *Spektrum der Wissenschaft*, à Heidelberg.

From Animals to Animats 3 : Proceedings of the 3rd International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior (SAB94), sous la direction de D. Cliff, P. Husbands, J.-A. Meyer et S.W. Wilson, MIT Press, 1994.

Site Web de la Société *Millenium Interactive* : <http://www.cyberlife.co.uk>.

Une comète par la queue

SHAWN CARLSON

Participez à la recherche cométaire en observant la comète Hale-Bopp.

Le 9 mars 1997, quand il sera 0h 41 en temps universel, quelques âmes courageuses braveront l'hiver sibérien pour assister à une éclipse totale de Soleil. Tandis que l'ombre de la Lune hâtera sa course vers le Nord, les observateurs intrépides verront, outre la spectaculaire couronne solaire, un rai de lumière zébrant le ciel assombri. La comète Hale-Bopp, la plus brillante comète depuis 20 ans, sera à 22 jours seulement de sa plus courte distance au Soleil (périhélie) et à 13 jours de sa plus courte distance à la Terre. Sa queue brillante offrira un spectacle mémorable.

Si vous n'avez pas prévu de randonnée en Sibérie à cette période, rassurez-vous : la comète Hale-Bopp sera visible de toute la Terre. Elle donnera aussi aux amateurs l'opportunité de contribuer à la recherche cométaire : le Centre d'astrophysique de Cambridge, dans le Massachusetts, coordonne un réseau mondial d'observateurs auquel tout le monde peut participer.

L'intérêt des astronomes pour cette comète réside dans l'activité exceptionnelle attendue pour son noyau (voir la figure 1). Un noyau cométaire est une boule de glace et de roches dont la surface s'évapore à l'approche du Soleil.

Les jets de gaz et de poussières qui en résultent forment les queues de la comète. La poussière éjectée suit un chemin incurvé, tandis que les gaz ionisés s'éloignent en ligne droite, à l'opposé du Soleil. L'émission des jets par le noyau a commencé lorsque la comète a croisé l'orbite de Jupiter, à environ sept unités astronomiques du Soleil (une unité astronomique, ou UA, est la distance moyenne du Soleil à la Terre, soit 150 millions de kilomètres). Les amateurs entraînés suivent la comète Hale-Bopp à l'œil nu depuis mai 1996, alors que la plupart des comètes sont observables à l'œil nu quelques mois seulement avant leur passage au périhélie. Pour la majorité des amateurs, Hale-Bopp est visible depuis le mois de janvier 1997.

Les queues des comètes (celle de poussière et celle de gaz) révèlent leur composition et leur structure. Elles fournissent aussi aux observateurs ravis sur Terre un laboratoire spatial pour cartographier le vent solaire, car les queues de gaz s'ornent parfois de structures produites par l'interaction avec ce vent. En 1974, la comète Kohoutek avait ravi les astronomes en exhibant deux structures proéminentes, fruits de ces interactions turbulentes.

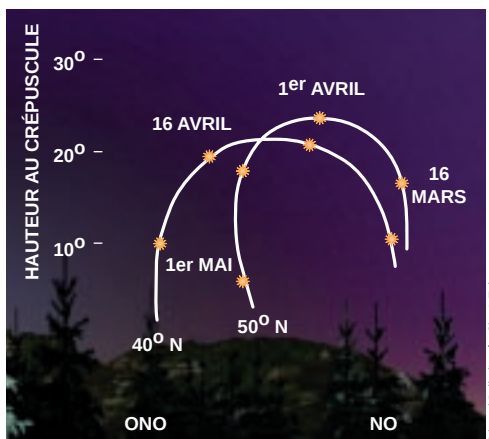
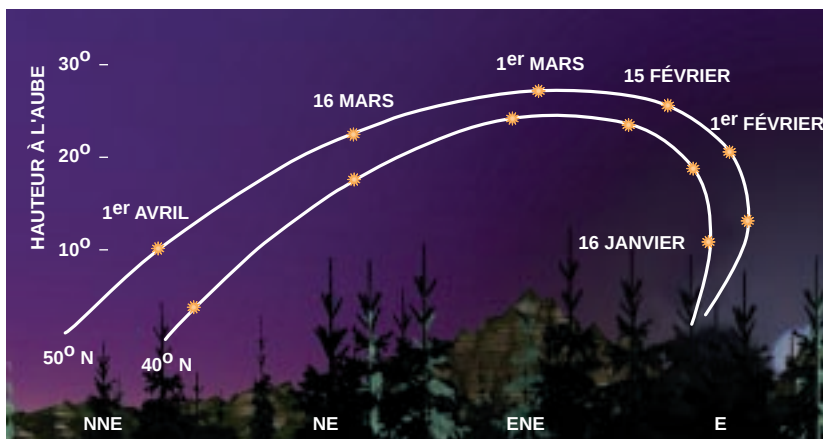


1. Au mois d'octobre 1996, le noyau de la comète Hale-Bopp était déjà très actif, comme l'attestent les jets de gaz qui s'en échappent.

Tout amateur peut enregistrer ces caractéristiques des queues de comète. Vous aurez d'abord besoin d'un bon atlas stellaire (*Uranometria*, aux éditions Willmann-Bell, coûte 455 francs), qui indique la position des étoiles en ascension droite et en déclinaison (l'équivalent de la longitude et de la latitude sur la sphère terrestre). Vous aurez également besoin d'un compas et d'un arc pour mesurer les écarts angulaires. L'arc, construit avec une règle graduée flexible et un long morceau de bois (voir l'encadré ci-contre), permettra de localiser les détails des queues à environ 0,1 degré près.

Localisez la tête de la comète en mesurant la distance angulaire entre cette tête et les trois plus proches étoiles dans l'atlas. Les cartes célestes indiquent les positions des étoiles en termes de déclinaison et d'ascension droite ; pour convertir les angles en distances sur la carte, notez qu'une heure d'ascension droite est égale à 15 degrés à l'équateur céleste. Partout ailleurs, divisez la distance angulaire à l'équateur par le cosinus de la déclinaison.

Pour chaque mesure, ouvrez le compas de l'angle approprié et inscrivez un petit arc de cercle là où vous pensez trouver la tête de la comète. La position



2. La comète Hale-Bopp sera visible durant plus de quatre mois dans le ciel matinal (avant son périhélie) et en soirée (après son périhélie). Plus la latitude de l'observateur sera grande, meilleure sera la visibilité (Paris est à 49 degrés de latitude Nord, Bordeaux à 45 degrés).