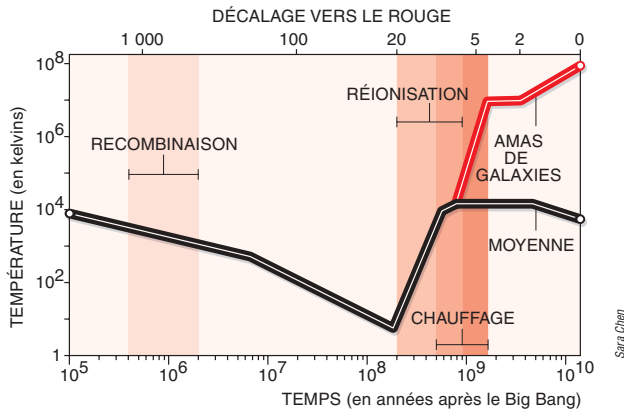




4. L'HISTOIRE THERMIQUE du milieu intergalactique révèle trois transitions importantes : la recombinaison, la reionisation et une phase de chauffage qui a commencé un peu avant la formation des amas de galaxies, probablement sous l'effet des premières supernovae qui explosèrent dans les galaxies naines, engendrant des « tempêtes cosmiques » de gaz chaud.

Lorsque les conditions d'observation le permettaient, on a observé ce type de spectre pour toutes les galaxies naines très lointaines. Ceci confirme qu'autrefois, de tels vents cosmiques, probablement propulsés par des explosions de supernovae, étaient monnaie courante. De plus, dans certaines galaxies plus proches, les astronomes ont détecté de gigantesques jets de matière propulsée dans le milieu intergalactique. Récemment, Crystal Martin et ses collègues de l'Université de Santa Barbara ont constaté que la galaxie naine NGC 1569 laisse s'échapper dans le milieu intergalactique d'énormes quantités d'oxygène et d'autres éléments lourds sous forme de bulles de gaz chauffé à plusieurs millions de kelvins.

Une activité autorégulée

Les vents cosmiques émis par les plus petites des galaxies primordiales sont certainement responsables du réchauffement et de la dilatation du gaz dans les régions les plus denses du milieu intergalactique. De ce fait, les plus petits grumeaux du milieu intergalactique ont été dans l'incapacité de s'effondrer davantage et ce mécanisme a empêché la formation des galaxies de masse trop faible. Ainsi, les transformations induites par cette troisième transition ont été plus importantes encore que celles qui ont suivi la reionisation. Cette dernière a entravé la formation de galaxies de masse inférieure à quelques centaines de millions de masses solaires, tandis que les vents galactiques ultérieurs ont certainement dispersé des embryons galactiques dix fois plus massifs. Ce mécanisme explique peut-être l'un des mystères de la cosmologie moderne : toutes les simulations numériques de la formation des structures prédisent beaucoup plus de petites galaxies qu'il n'en existe effectivement.

Ainsi, chaque génération d'objets a agi sur le milieu intergalactique qui, en retour, a déterminé les propriétés des objets de la génération suivante. Étoiles supergéantes, quasars ou simples galaxies, les sources qui ont reionisé l'Univers ont engendré assez de pression thermique pour ralentir la formation d'objets compacts leur ressemblant, ce qui a mis fin à la reionisation. Par la suite,

les vents cosmiques émis par les galaxies naines ont chauffé le gaz intergalactique dans les amas de galaxies... et empêché la formation de nouvelles générations de galaxies naines. De tels mécanismes de rétroaction qui régulent l'activité du cosmos se produisent également, à plus petite échelle, dans les galaxies elles-mêmes où les supernovae et les rayons ultraviolets émis par les jeunes étoiles massives agissent sur le milieu interstellaire et ralentissent la formation de nouvelles étoiles massives. L'idée de rétroaction devient un concept unificateur en astronomie, car il semble se répéter à différentes échelles.

Que nous réserve l'avenir ? De nouvelles techniques sont mises au point pour le découvrir. Nous observons le fond de rayonnement cosmologique à travers le milieu intergalactique proche où baigne notre galaxie. Ce milieu imprime au fond de rayonnement un léger flou que nous sommes désormais en mesure de déceler. On pense que la présence de grumeaux dans ce milieu devrait aussi diffuser les photons du rayonnement fossile et que des zones de température élevée dans les amas de galaxies le déforment encore davantage. Ce dernier mécanisme, nommé effet Sunyaev-Zeldovich, a été observé dans certains amas et l'on pense que les images fournies par l'expérience d'imagerie du rayonnement de fond cosmologique (*Cosmic Background Imager Experiment*) l'ont également mis en évidence. Par ailleurs, à l'aide d'une méthode analogue à l'étude des spectres de quasars, Kenneth Sembach, de l'Institut scientifique du télescope spatial, ainsi que Blair Savage, Bart Wakker et leurs collègues de l'Université Wiskonsin-Madison ont sondé le milieu intergalactique dans le voisinage immédiat de la Voie lactée. Leurs observations suggèrent que le gaz intergalactique proche est réparti de façon hétérogène selon un motif très semblable, quoi qu'à plus petite échelle, à celui de la toile cosmique de filaments qui s'étend entre les amas de galaxies. Ce milieu assez froid évolue lui-même dans un plasma porté à un million de kelvins qui est semblable au gaz chaud des autres amas. Ainsi, le Groupe local de galaxies, l'amas dont fait partie la Voie lactée, serait entouré d'une couronne de gaz dont les propriétés sont semblables à la fois à celles des régions les plus denses du milieu intergalactique et à celles des régions les plus ténues. Serait-il possible qu'à très grande échelle, les bulles vides qui s'étendent entre les nuages du milieu intergalactique soient, elles aussi, emplies d'un gaz très chaud que nous n'aurions pas encore observé ? Ce gaz pourrait-il constituer une partie importante de la masse du milieu intergalactique ? De nouvelles études seront nécessaires, car nous commençons tout juste à reconstituer l'histoire du milieu intergalactique.

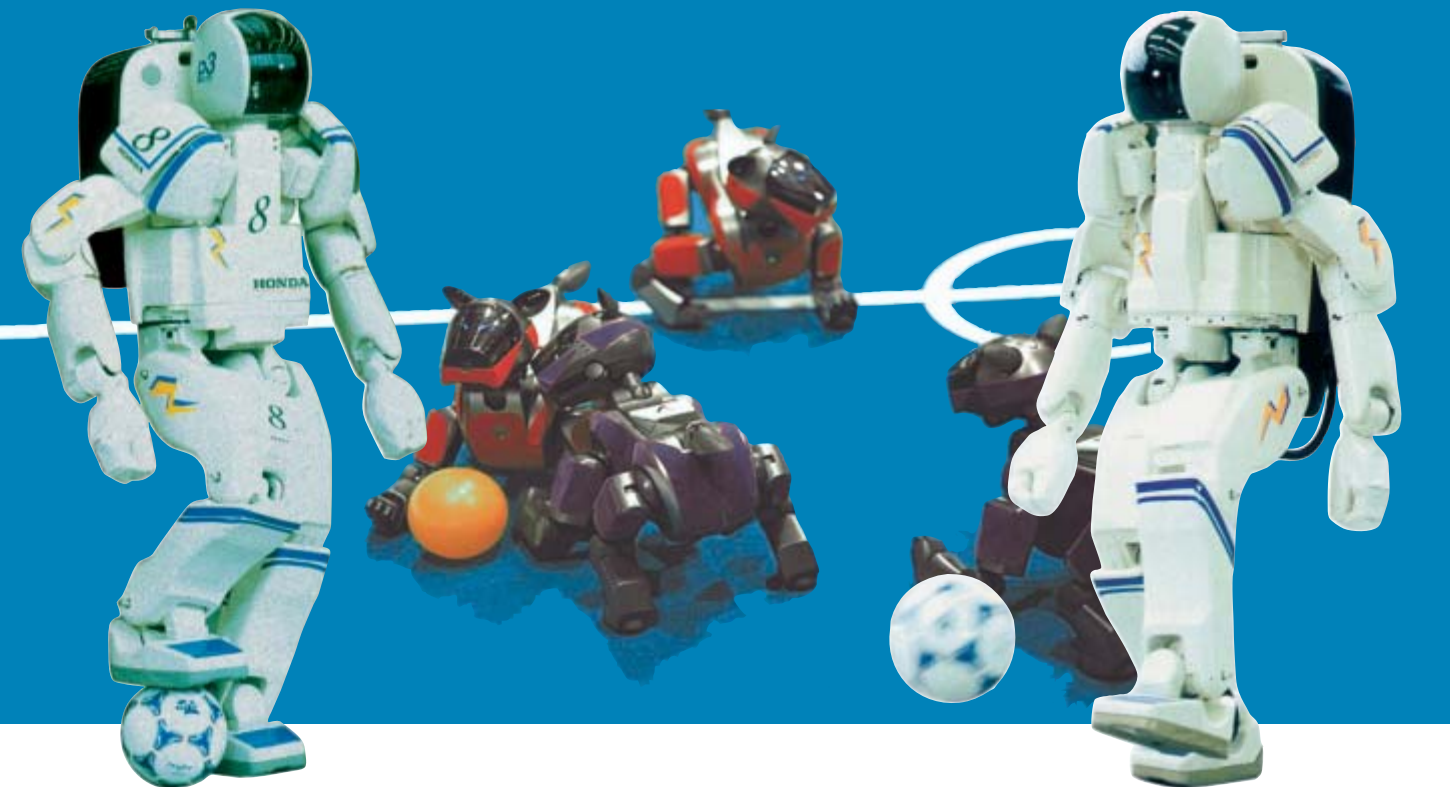
Evan SCANNAPIECO est astronome à l'Observatoire Arcetri de Florence. Patrick PETITJEAN est astronome à l'Institut d'astrophysique de Paris-CNRS. Tom BROADHURST est professeur à l'Université de Jérusalem.

P. PETITJEAN, J. MÜCKET et R. KATES, *The Lyman-alpha Forest at Low-Redshift : Tracing the Dark Matter Filaments*, in *Astronomy & Astrophysics*, vol. 295, n° 1, pp. L9-L12, mars 1995.

E. SCANNAPIECO et T. BROADHURST, *The Role of Heating and Enrichment in Galaxy Formation*, in *Astrophysical Journal*, vol. 549, n° 1, pp. 28-45, mars 2001.

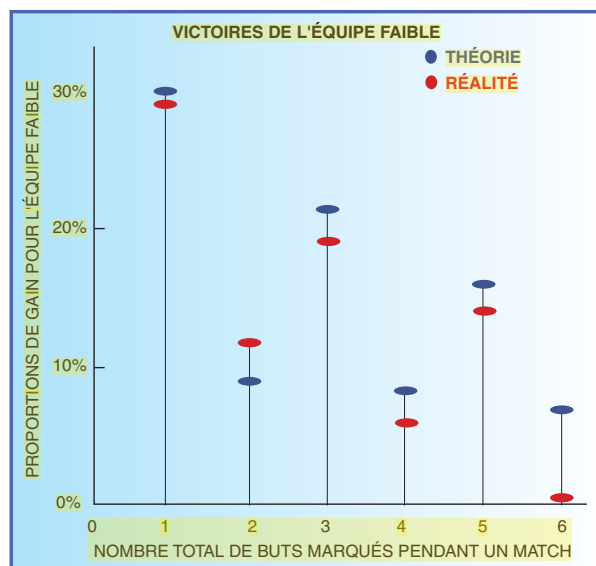
Les faibles scores du football font que les résultats des matchs sont plus aléatoires que dans d'autres sports. Aussi est-il rare que la meilleure équipe gagne le championnat!

© POUR LA SCIENCE - N° 301 NOVEMBRE 2002



Simulation d'un championnat égalitaire

Poursuivant notre expérience de pensée, nous allons allouer des probabilités à chaque résultat. Il y a environ un match nul tous les quatre matchs dans les championnats professionnels aussi prendrons-nous, pour notre simulation, la probabilité d'un match nul égale à $1/4$. La probabilité qu'un match se termine par une victoire de l'une des équipes est donc égale à $3/4$ et comme les équipes sont de même force, chacune d'entre elle a trois chances sur huit de gagner. Un match gagné rapporte trois points, un match nul, un point, et un match perdu aucun.



2. LES ÉQUIPES PLUS FAIBLES GAGNENT évidemment moins souvent que les équipes fortes, mais plus fréquemment quand le score total de la partie est faible, car le hasard se manifeste alors plus fortement.

3. POUR SIMULER LE RÔLE DU HASARD, on pourrait faire jouer des robots de force égale comme dans cette compétition de robots footballeurs quadrupèdes. Les Humanoides de Honda sont des robots de taille humaine. Des versions de ces robots pourraient, selon leurs concepteurs, participer aux Championnats du monde de football en 2050.

Nous allons maintenant faire «jouer» les équipes pendant une saison ; pour cela, nous utilisons un programme qui engendre des nombres aléatoires et décidons du résultat selon les probabilités indiquées. Nous avons 18 équipes qui jouent chacune 34 matchs contre les 17 autres (match aller et retour) ; les résultats sont indiqués sur la figure 1a. L'équipe gagnante à la fin du championnat, a 60 points et l'écart entre le premier et le dernier (la dispersion des résultats) est de 30 points. Et tout cela avec des équipes de même force ! Notons que la moyenne des points calculée selon les probabilités est de $34(3 \times 3/8 + 1 \times 1/4)$, soit 46,7.

Il est patent que des différences de force entre équipes augmentent la dispersion des résultats, mais nous voyons déjà que la contribution du hasard est notable. Lyon, qui a gagné le championnat l'année dernière, avait 66 points et l'écart avec le dernier, Lorient, était de 35 points. Donc la question est posée, Lyon a-t-il gagné parce qu'elle était la meilleure équipe, ou était-ce un hasard ?

La force supérieure peut être inopérante

Avant d'examiner des cas réels, nous allons faire une nouvelle simulation où, à notre championnat égalitaire d'équipes de même force, nous ajoutons une équipe dont la probabilité de victoire est supérieure. Nous conservons la probabilité de match nul égale à $1/4$; l'équipe meilleure, que nous dénommerons Parenlyon, a (quand le score n'est pas nul) 3 chances sur 5 de gagner ses matchs, ce qui fait neuf chances sur vingt ($3/5 \times 3/4$) de gagner contre chacune des 18 autres équipes. Dans cette instance, l'espérance mathématique, c'est-à-dire le score moyen à la fin de la saison du score de Parenlyon est égal à $36(3 \times 9/20 + 1 \times 1/4)$,