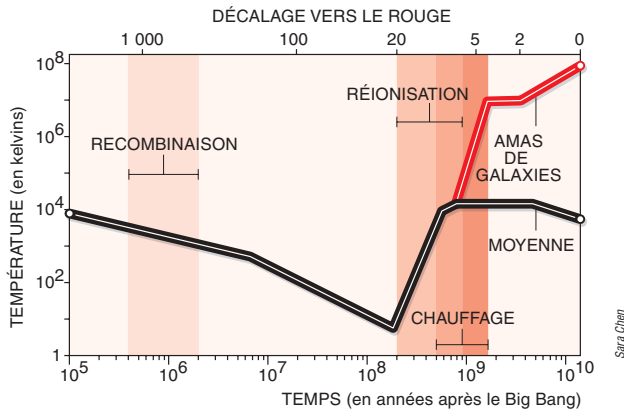




4. L'HISTOIRE THERMIQUE du milieu intergalactique révèle trois transitions importantes : la recombinaison, la réionisation et une phase de chauffage qui a commencé un peu avant la formation des amas de galaxies, probablement sous l'effet des premières supernovae qui explosèrent dans les galaxies naines, 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 réionisation. 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 réionisé l'Univers ont engendré assez de pression thermique pour ralentir la formation d'objets compacts leur ressemblant, ce qui a mis fin à la réionisation. 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 !

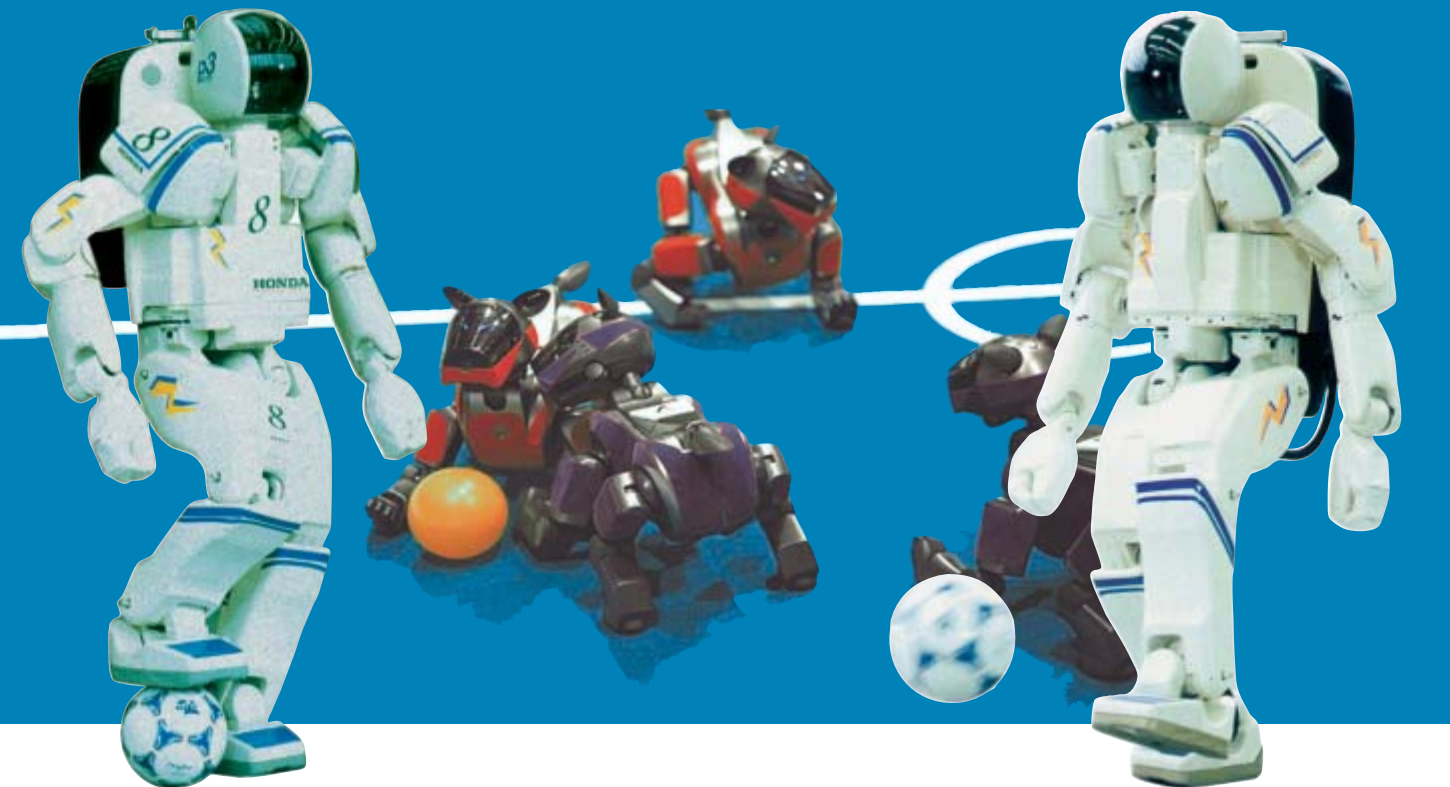
Si la première équipe du championnat gagne avec un point de plus que la deuxième, on peut douter de sa primauté : nombreux sont les cas où, pendant la saison, elle a marqué un but « par un hasard heureux », à la suite d'un rebond inattendu, d'une erreur inhabituelle du gardien de but ou d'une erreur d'arbitrage. Ainsi, il s'en est fallu d'un rien que l'équipe classée deuxième ne gagne le championnat. Inversement, si

Imaginons un championnat où toutes les équipes se valent et la probabilité qu'une équipe gagne un match est la même pour toutes les équipes. Quel sera le classement final? Il est clair que toutes les équipes n'auront pas le même nombre de points – il y aura un (ou des gagnants) –, mais les écarts entre les équipes seront déterminés uniquement par le hasard.

D			PROBABILITÉS AUTRES ÉQUIPES ENTRE ELLES
RÉSULTATS	POINTS	PROBABILITÉS MEILLEURE ÉQUIPE	
GAIN	3	9/20 (45%)	3/8 (37,5%)
NUL	1	1/4 (25%)	1/4 (25%)
DÉFAITE	0	6/20 (30%)	3/8 (37,5%)

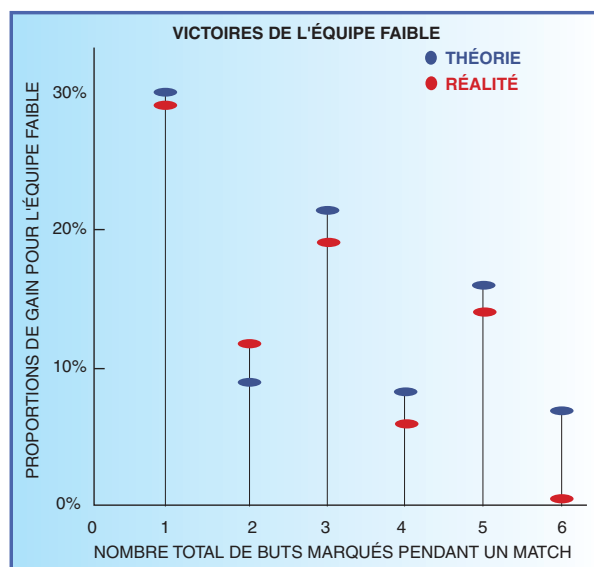
	GAINS	NULS	DÉFAITES	POINTS
1	18	10	8	64
2	15	15	6	60
3	16	11	9	59
4	16	7	13	55
5	16	5	15	53
5	15	8	13	53
5	15	8	13	53
5	14	11	11	53
9	13	11	12	50
10	12	12	12	48
10	11	15	10	48
12	12	11	13	47
13	12	10	14	46
14	12	9	15	45
14	11	12	13	45
16	12	7	17	43
16	9	16	11	43
18	9	7	20	34
19	8	7	21	31

équipe de force supérieure dans un tel championnat (b) ne gagne pas nécessairement (elle termine dans cette simulation, deuxième), car une équipe (celle qui est première) peut avoir beaucoup de chance.



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.

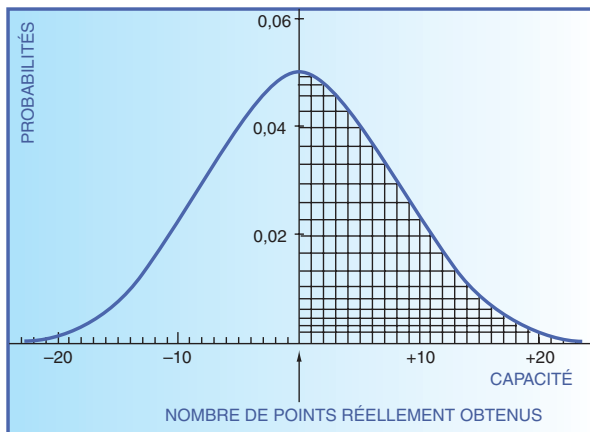
3. POUR SIMULER LE RÔLE DU HASARD, on pourrait faire jouer des robots de force égale comme dans cette compétition de robots footballeurs quadrupèdes. Les Humanoides de Honda sont des robots de taille humaine. Des versions de ces robots pourraient, selon leurs concepteurs, participer aux Championnat du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

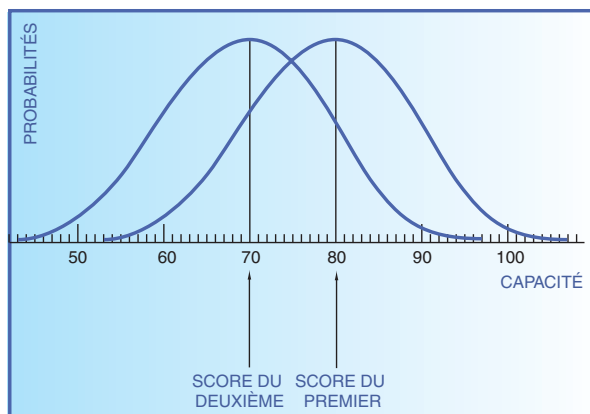
Il est patent que des différences de force entre équipes augmentent la dispersion des résultats, mais nous voyons déjà que la contribution du hasard est notable. Lyon, qui a gagné le championnat l'année dernière, avait 66 points et l'écart avec le dernier, Lorient, était de 35 points. Donc la question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

La force supérieure peut être inopérante

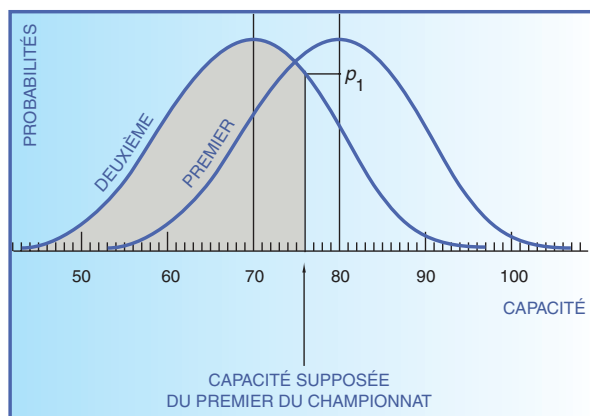
Avant d'examiner des cas réels, nous allons faire une nouvelle simulation où, à notre championnat égalitaire d'équipes de même force, nous ajoutons une équipe dont la probabilité de victoire est supérieure. Nous conservons la probabilité de match nul égale à $1/4$; l'équipe meilleure, que nous dénommerons 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 $36(3 \times 9/20 + 1 \times 1/4)$,



4. COURBE LISSÉE DES CAPACITÉS d'une équipe. Cette courbe donne la dispersion du nombre de points qu'aurait pu obtenir cette équipe (et les probabilités associées) autour d'une valeur moyenne égale au score qu'elle a obtenu. La capacité est ainsi une «variable aléatoire gaussienne».



5. PROBABILITÉS DES CAPACITÉS, c'est-à-dire des valeurs réelles de l'équipe gagnante du championnat et de l'équipe deuxième, pour un écart des scores obtenus égal à 10. Même pour des scores aussi différents, il se peut que la deuxième équipe soit meilleure que la première et que son score inférieur soit dû à la malchance.



6. LE DEUXIÈME A UNE CAPACITÉ INFÉRIEURE AU PREMIER du championnat dans la zone grisée, dans le cas où l'on suppose que le premier a une capacité de 76, soit 4 points, inférieure à son score de championnat. En additionnant toutes ces aires qui correspondent à des probabilités, on détermine la probabilité totale pour que la capacité du premier soit supérieure à celle de tous les autres.

soit 57,6 points contre 47,90 pour les autres équipes. Lors de la simulation, Parenlyon a fait un meilleur résultat que la moyenne espérée et marqué 60 points, mais, en dépit de cela, n'a pas gagné le championnat : elle a terminé seconde, derrière une équipe ayant totalisé 64 points ! D'autres simulations, avec les mêmes probabilités, donnent des résultats différents, et quelquefois Parenlyon gagne. Toutefois, comme nous l'avons vu, pas toujours : les mathématiques nous montreront que, dans la plupart des simulations ou des championnats, la meilleure équipe ne gagne pas !

Donc, quand les équipes sont de même force, il y a des écarts de score notables et quand il y en a une meilleure, elle ne gagne pas toujours le championnat. Pourquoi ces injustices ? À cause des règles du football : au contraire des sports comme le basket ou le rugby, les scores d'un match de football sont très bas, et cela affecte les résultats des rencontres.

Les faibles scores atténuent les différences de force entre équipes

Quand il y a peu de buts, l'équipe la plus faible a quand même des chances de gagner. Supposons que Parenlyon marque en moyenne deux fois plus de buts que son adversaire Auxaco (moyenne calculée sur les matchs précédents entre les deux équipes). Si le résultat du match est 1-0, score assez fréquent dans le football professionnel, la probabilité que Parenlyon ait marqué le but victorieux est $\frac{2}{3}$, mais Auxaco a $\frac{1}{3}$ de chance de gagner en marquant le but. L'équipe la moins forte a une bonne chance de gagner en dépit de son infériorité marquée.

Quand le nombre de buts augmente, les chances de victoire de la moins bonne équipe diminuent. Dans le cas d'une partie où trois buts sont marqués, Auxaco n'a qu'une chance sur quatre de vaincre Parenlyon et, n'a plus que 15 chances sur 100 pour une partie à neuf buts (toutefois les parties avec ce grand nombre de buts marqués sont rarissimes). Donc, les faibles scores du football augmentent la part du hasard dans les résultats...

Qu'en est-il dans la réalité et les vrais championnats ? Nous avons étudié, dans le championnat anglais, les matchs entre les cinq premières équipes et les cinq dernières pendant quatre années. En moyenne, les meilleures équipes battaient les moins bonnes 7 fois sur 10 (et perdaient 3 fois sur 10). Nous utiliserons ces chiffres pour calculer l'espérance de gain par l'équipe la plus faible et pour la comparer avec les résultats réels des matchs sur les quatre saisons. Les résultats sont représentés sur la figure 3.

Les résultats observés sont en bon accord avec la théorie et les équipes les plus faibles gagnent plus souvent les matchs à petit nombre de buts que les matchs à gros scores. Les «creux» pour les matchs à nombre pair de buts, 2, 4, 6..., sont dus au fait que l'écart doit être de deux buts au moins : l'équipe la plus faible gagne donc moins souvent quand le nombre de buts marqués au cours du match est pair. Donc nous avons montré que les règles du football créent la dispersion et font que le hasard joue un grand rôle dans la décision.

Il va de soi que le calcul fait pour le premier vaut aussi pour le dernier. L'équipe classée dernière peut avoir été plus malchanceuse qu'incompétente. Il est à noter, à ce propos, que le renvoi des entraîneurs dont les équipes

n'ont pas eu de bons résultats peut être ainsi parfaitement injuste. Nous aborderons maintenant une question plus délicate : quelle est la probabilité que le vainqueur soit le meilleur ?

Le premier est-il le meilleur ?

Lyon, qui a gagné le championnat de France, méritait-il d'être premier ? Il existe plusieurs méthodes mathématiques pour analyser cette question. Nous allons choisir la plus simple qui réponde à trois contraintes de bon sens.

D'abord si deux équipes finissent premières ex aequo, les probabilités que l'une ou l'autre soit la meilleure sont égales. Ensuite, la probabilité que le gagnant soit le meilleur est d'autant plus grande qu'il a plus de points d'avance sur les suivants. Enfin, si la différence des points entre le premier et les suivants devient très grande, la probabilité que le premier soit le meilleur doit approcher 100 pour cent.

Comme nous l'avons vu, le score réalisé par une équipe ne traduit qu'imparfaitement sa vraie valeur, que nous dénommerons sa «capacité». Cette capacité est dispersée autour du score (qui est néanmoins sa valeur la plus probable) comme elle l'est dans la simulation décrite précédemment qui est un tirage à pile ou face généralisé, un pur «hasard».

Nous prendrons pour la distribution des valeurs des capacités la courbe en cloche de la figure 4, la distribution dite «normale». La dispersion des probabilités est celle que le hasard aurait donnée. La probabilité que la capacité soit juste égale au score obtenu est 5 pour cent, une différence de 8 points a pour probabilité 3 pour cent, et la probabilité que la différence soit 16 est inférieure à un pour cent.

Cela étant, le calcul pour déterminer si le vainqueur est effectivement le meilleur est assez subtil : nous devons considérer toutes les valeurs possibles de la capacité du vainqueur et, pour chacune de ces capacités, prendre en compte toutes les capacités possibles de toutes les autres équipes. Détaillons courageusement ce calcul sur un exemple : pour une valeur donnée de la capacité supposée de l'équipe gagnante, nous calculerons la probabilité que l'équipe classée deuxième ait une capacité inférieure à celle de la première, puis la probabilité que l'équipe classée troisième ait une capacité inférieure à celle de la première, etc. Puis nous additionnerons toutes ces probabilités pour toutes les équipes afin d'obtenir la probabilité que le vainqueur ait la meilleure capacité.

Lyon n'était pas meilleure équipe que l'une des quatre suivantes

Dans notre exemple, nous prendrons le cas où le vainqueur a marqué 80 points à la fin de la saison, et le deuxième 70. Pour déterminer la probabilité que l'équipe gagnante ait une capacité supérieure à celle de la deuxième, nous utiliserons les courbes en cloche de chacune, comme représenté sur la figure 5. La probabilité que le vainqueur ait une capacité de 4 points inférieure à la valeur qu'il a obtenue est mesurée par la hauteur p_1 de la courbe en cloche, soit 0,044. Le vainqueur restera meilleur que le deuxième si la capacité de celui-ci est inférieure à 76 : le domaine où cela est vrai est représenté en grisé sur la figure 6. La probabilité que le deuxième soit dans cette région grisée est

ÉQUIPES	POINTS	PROBABILITÉS QUE CE SOIT LA MEILLEURE ÉQUIPE
LYON	66	42 %
LENS	64	30 %
AUXERRE	59	12 %
PARIS S. G.	58	10 %
LILLE	56	6 %

7. NOMBRE DE POINTS OBTENUS par les cinq premières équipes du championnat de France 2001-2002 et probabilités que ces équipes soient véritablement meilleures que les autres. Comme les écarts entre les cinq premiers sont faibles, il y a 58 chances sur 100 que l'une des quatre équipes, Lens, Auxerre, Paris-Saint-Germain ou Lille soit meilleure que l'équipe gagnante, Lyon.

ici égale à 0,77. La probabilité que l'équipe gagnante ait la capacité 76 et que l'équipe deuxième, une capacité inférieure, est égale au produit $p_1 p_2$, soit ici, $0,044 \times 0,77$ soit 0,034 ou 3,4 pour cent.

Nous devons faire un calcul analogue pour une capacité du vainqueur ... -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, etc. La probabilité que la capacité de cette équipe gagnante soit supérieure à la capacité de l'équipe classée deuxième est la somme de toutes ces probabilités. Dans notre exemple, où l'équipe gagnante a un score 10 points supérieur à celui de la deuxième, cette probabilité est de 81 pour cent et la probabilité que la deuxième soit la meilleure équipe égale à 19 pour cent.

Mais cela n'est pas tout, car il se pourrait que l'équipe ayant la plus forte capacité, et donc la «meilleure», soit la troisième du classement, ou la quatrième, etc. Il faut recommencer le calcul pour toutes ces équipes et additionner toutes les probabilités que chacune des équipes ait une capacité inférieure. On pourra ensuite réitérer le calcul pour chacune des équipes afin de calculer la probabilité qu'elle ait la meilleure capacité. Voyons ce que cela donne pour la saison 2001-2002.

Le championnat a été gagné par l'Olympique Lyonnais. Le RC Lens avait deux points de moins, l'AJ Auxerre, sept, suivie du Paris-Saint-Germain et de Lille. Comme l'équipe suivante, Bordeaux, est loin derrière, il suffit de ne considérer que les cinq premières équipes.

La conclusion du calcul est représentée sur la figure 7 : la probabilité que Lyon soit la meilleure équipe n'est que de 42 pour cent ! Il est probable que la meilleure équipe n'est pas celle qui a gagné le championnat ! Cela ne devrait pas trop nous surprendre, car Lyon n'a gagné que par deux points d'avance. En regardant mieux les scores, on observe que dans 14 matchs de Lyon sur 34 le résultat aurait été changé par une variation d'un but. Et ce but aurait pu être le résultat d'une cause minime : souvenons-nous, un rebond, une erreur d'arbitrage, un penalty manqué, une rafale de vent...

Cela diminue-t-il l'intérêt du football ? Certainement pas : si le résultat des parties était prévisible, plus personne ne regarderait les matchs : la justice dans le sport n'est pas une qualité primordiale et c'est une certaine incertitude qui fait l'intérêt du football.

John WESSON est physicien théoricien et praticien du football depuis de nombreuses décennies. Il est l'auteur de : *The Science of Soccer* (Institute of Physics Publishing, Bristol, 2002).

