



erapictures/Shutterstock

Les orages violents charrient des sédiments, renforçant l'érosion des sols. La qualité de l'eau pourrait en pâtir.

Des stratégies pour l'adaptation

Les hydrosystèmes d'eau douce et les espèces qui les peuplent ont des capacités naturelles d'adaptation aux évolutions climatiques, notamment leur adaptabilité et la migration des populations. Néanmoins, de trop fortes pressions humaines locales (agricoles, industrielles et urbaines) sur le milieu réduisent ce potentiel adaptatif, les milieux se dégradant trop vite pour laisser le temps aux espèces de s'adapter, et rendant les hydrosystèmes vulnérables.

Les stratégies d'adaptation ont pour enjeu de restaurer la résistance des hydrosystèmes face aux contraintes climatiques, en privilégiant une gestion de la disponibilité en eau et de la biodiversité qui soit économiquement viable et fondée sur le partage des ressources et l'optimisation des usages. Il s'agit de réaliser des économies *via*

des actions techniques (réduction des fuites, recyclage), financières (tarification progressive encourageant les économies d'eau), un changement des pratiques (agricoles, industrielles ou domestiques) et une répartition plus équitable et responsable des ressources. Par ailleurs, l'aménagement du territoire doit être repensé pour éviter de concentrer les prélèvements dans les mêmes zones ou pour favoriser la rétention naturelle de l'eau.

Pour préserver la continuité du cycle de l'eau et répondre aux besoins de l'agriculture, il est nécessaire de veiller au maintien du bilan hydrique des sols, c'est-à-dire au bilan entre les entrées (précipitations, ruissellement, remontée capillaire à partir des nappes phréatiques) et les pertes (ruissellement, évaporation au niveau du sol et par évapotranspiration, drainage). On pourrait ralentir la vitesse des écoulements et favoriser l'infiltration par la création d'ouvrages spécifiques, la limitation des zones imperméabilisées, ainsi que le maintien des dépressions du sol et du tracé naturel des cours d'eau, des plaines inondables et des zones humides.

En ce qui concerne la biodiversité, il convient de favoriser les mécanismes naturels d'adaptation. Dans un premier temps, il apparaît essentiel de maintenir une taille et une diversité génétique suffisantes, maintien qui peut être assuré de différentes façons : limiter l'exploitation des composantes les plus vulnérables, contrôler les facteurs de stress (pollution, destruction des habitats, introduction d'espèces invasives) et renforcer les échanges des populations et des individus *via* l'entretien ou le rétablissement des voies de

migration (aménagements de passes à poissons, suppressions d'obstacles, par exemple). On peut conforter les mécanismes naturels d'adaptation par des interventions directes, par exemple aider à la migration des espèces les plus vulnérables. Soulignons que la stratégie d'adaptation la plus efficace consiste toujours à préserver les milieux de bonne qualité et à restaurer ceux qui ont été dégradés.

Une ressource vitale

L'adaptation des hydrosystèmes d'eau douce au changement climatique est un enjeu crucial dont la réussite nécessite l'engagement tant des usagers que des gestionnaires. En raison des nombreuses voies par lesquelles le climat perturbe les hydrosystèmes, il est nécessaire de combiner diverses méthodes dans le temps et dans l'espace (restriction saisonnière de l'utilisation de l'eau, gestion des épisodes pluvieux au quotidien, gestion raisonnée des fertilisants et des produits phytosanitaires), tant au niveau local (la parcelle cultivée) que plus global (le bassin versant).

Face à des intérêts parfois contradictoires, il est nécessaire de continuer à développer des modèles permettant de simuler le comportement des hydrosystèmes et celui des populations des espèces qu'ils hébergent, mais aussi l'effet des mesures de gestion prises pour favoriser leur adaptation. Ces modèles permettent également de comparer l'impact des mesures préconisées, qu'il s'agisse de protéger ou de restaurer les milieux, ou encore d'améliorer la connectivité et les interactions de tous les acteurs pour qui l'eau est simplement... vitale.

Bibliographie

- C. Piou et E. Prévost, *Contrasting effects of climate change in continental vs. oceanic environments on population persistence and microevolution of Atlantic salmon*, *Global Change Biology*, vol. 19, pp. 711-723, 2013.
- J.-P. Amigues et B. Chevassus-au-Louis, *Évaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels*, coll. Comprendre pour agir, ONEMA, 2011.
- Téléchargeable sur : <http://www.onema.fr/Evaluer-les-services-ecologiques>

HISTOIRE DES SCIENCES

Louis Pasteur et Claude Bernard, entre respect et controverse

Ou comment l'amitié et les querelles de deux figures majeures de la biologie du XIX^e siècle ont servi les sciences biomédicales.

Peter Wise

Il est rare qu'une découverte scientifique soit le fruit d'un unique chercheur. L'esprit d'équipe est tout aussi important que les compétences d'un chef. Les confrontations avec d'autres chercheurs de même. La compétition, les controverses améliorent les projets, révélant au passage la personnalité des protagonistes. La relation de Claude Bernard et de Louis Pasteur fut de cet acabit. Malgré des caractères opposés et des approches différentes de la recherche, ces deux grands scientifiques français, qui se sont côtoyés pendant 20 ans dans le Paris foisonnant du XIX^e siècle, ont construit une relation symbiotique, émaillée de désaccords et de respect, qui s'est révélée fructueuse à plus d'un titre.

Des arts à la biologie

Au moment de leur rencontre, à la fin des années 1850, leurs parcours les ont tous deux menés à la renommée – par des voies différentes. En 1832, Louis Pasteur, petit jurassien de dix ans, montre un talent certain pour les portraits en pastel. Plus tard, au Collège royal de Besançon, l'excentrique Charles Flajoulot – aussi professeur du peintre Gustave Courbet – aide le jeune garçon à développer ses compétences en pastel et lithographie. Mais les mathématiques et la physique l'attirent plus (« Avec de la science, on s'élève au-dessus de tous les autres » écrit-il à ses parents en 1840). Le baccalauréat de sciences en poche, Pasteur abandonne l'art et le Jura pour l'École normale supérieure, à Paris, où il suit un cours de physique et de chimie.

En 1848, il est déjà reconnu pour ses travaux sur la dissymétrie moléculaire (il a montré que certaines molécules existent sous deux formes images l'une de l'autre dans un miroir). En 1849, il obtient son premier poste : professeur de chimie à l'Université de Strasbourg. Dans les trois mois suivant son arrivée, il rencontre et épouse Marie Laurent, la fille du recteur de l'Université – un événement qui a pu faciliter sa progression de carrière.

Pas plus à Strasbourg que plus tard à Lille (où il occupe une chaire de chimie), Pasteur n'apprécie l'enseignement : cet engagement académique interfère avec ses recherches. En revanche, il est enthousiaste et ambitieux pour le développement des cours et leur organisation, et sait convaincre ses collègues du bien-fondé de ses projets. Il apprend aussi l'art de faire fructifier son argent, développe ses liens avec l'industrie et fait jouer son aura.

Dans ses recherches, la biologie et la médecine prennent peu à peu le pas sur la chimie. S'étant convaincu, par une étude systématique, que les substances non biologiques sont dominées par la symétrie et que la dissymétrie est la marque du vivant, il tente d'en déduire l'origine de la vie. Il synthétise aussi la quinine, un dérivé moins coûteux de la quinine, dont il teste (sans succès) le pouvoir thérapeutique pour le traitement des fièvres. La fermentation alcoolique, un phénomène mystérieux et objet de nombreuses discussions, l'introduit dans le monde des brasseries et des levures. En 1858, ses capacités d'administrateur sont récompensées par un poste de directeur d'études scientifiques à l'École normale supérieure. Il se bat pour

obtenir aussi un laboratoire équipé – une condition indispensable pour devenir compétitif en biologie. Dans ce domaine, Claude Bernard, de dix ans son aîné, est déjà un grand nom, qui enseigne et mène ses recherches au Collège de France et dans les facultés de science et de médecine de la Sorbonne.

Fils de viticulteurs du Beaujolais, Bernard a lui aussi d'abord été attiré par les arts. Adolescent, il rêvait de devenir auteur de théâtre. Mais en 1831, âgé de 19 ans, il commence, suivant le choix de son père, un apprentissage en pharmacie à Lyon. Obsédé par le doute cartésien, que lui ont enseigné ses professeurs de philosophie du collège, il est dépité par l'adhésion aveugle à la tradition et par le manque de preuves associées à la pratique de son nouveau métier. Démotivé, il se tourne vers ses premières amours – le théâtre – et écrit en secret une pièce, *La rose du Rhône*. Sa représentation, par une école de théâtre lyonnaise, est un succès et lui rapporte 100 francs. Renvoyé de son officine, il se consacre avec enthousiasme à l'écriture d'une nouvelle pièce en cinq actes, *Arthur de Bretagne*, dont il présente le manuscrit à un critique de théâtre parisien. Mais celui-ci coupe court à son élan artistique, lui conseillant de retourner à ses études de médecine.

La dissection, l'anatomie et la toute récente physiologie fascinent Bernard, mais les médecins des hôpitaux parisiens s'appuient encore plus sur les hypothèses et la tradition que les pharmaciens de Lyon. Bernard ne s' imagine pas clinicien : seule la recherche pourrait satisfaire sa quête de preuve cartésienne et de vérité. Tout juste diplômé, il

rate son agrégation, nécessaire pour entrer dans la recherche universitaire. La perspective de devenir médecin de campagne l'accable. Cependant, ses mentors ont reconnu son potentiel et arrangent son mariage avec Fanny Martin, la fille d'un riche médecin. Sa dot lui permet de mettre en œuvre ses projets de recherche : traquer la vérité et la preuve en physiologie et médecine au Collège de France sous la coupe de François Magendie, professeur de médecine.

Fanny, cependant, s'oppose vite à sa pratique de la vivisection. Elle déchaîne sa colère dans son engagement au sein de la Société protectrice des animaux, plus tard rejointe par leurs deux filles. La vie familiale de Bernard devient un calvaire. Son seul refuge est le sous-sol froid et humide de son laboratoire, au Collège de France.

Désaccord sur le rôle des microbes

En 1856, Bernard, âgé de 43 ans, a succédé à Magendie comme professeur de médecine expérimentale au Collège de France. Il a découvert l'effet émulsifiant du jus pancréatique, la fonction thermorégulatrice des nerfs vasomoteurs, le mécanisme de transfert gazeux dans le sang et le mode d'action du curare, et il utilise à présent des poisons comme bistouris chimiques pour mieux comprendre la physiologie de l'organisme. Il a aussi montré que le glucose est synthétisé dans le foie et proposé que sa surproduction soit la cause du diabète (l'effet inhibiteur de l'insuline dans ce processus ne sera découvert que 70 ans plus tard). Il aime enseigner au Collège de France, tant aux étudiants qu'au grand public, qui assiste gratuitement à ses cours. L'enthousiasme de Bernard, la clarté de sa pensée et les expériences qu'il réalise devant son auditoire – ponctuées de conclusions logiques et non de déclarations infondées – convainquent et impressionnent. Médecins, scientifiques, nobles, journalistes, ecclésiastes ou simples curieux affluent du monde entier pour l'écouter et le regarder travailler. À partir de 1858, Pasteur fait partie des auditeurs réguliers. De retour depuis peu à Paris, il revient sur les bancs de la Faculté, notant avec attention



Collection BIU Santé Médecine



1. LOUIS PASTEUR (1822-1895, ci-dessus) et Claude Bernard (1813-1878, en haut sur une similigravure de La leçon de Claude Bernard peinte par Léon Lhermitte) se sont cotoyés pendant 20 ans à Paris, à partir de 1858. Bernard est ici représenté entouré notamment de ses disciples, Paul Bert, Albert Dastre et Arsène d'Arsonval.

chaque fait et idée présentés par le renommé Bernard, au cas où ils lui seraient utiles.

Les deux hommes se rencontrent enfin... et se découvrent bientôt en désaccord. Pasteur est persuadé que les microbes sont souvent à l'origine des maladies. Bernard, en revanche, ne voit dans les microbes qu'un facteur qui y contribue : selon lui, la plupart des maladies sont dues à un dérèglement sous-jacent du fonctionnement de l'organisme. Prenant l'exemple de la régulation de la concentration de glucose dans le sang, il souligne l'importance du concept de « milieu intérieur » : stable et intégré à l'organisme, le milieu intérieur le protège contre les influences toxiques et déstabilisantes du milieu extérieur – les éléments néfastes de l'environnement. La polémique se poursuivra pendant 20 ans, chacun restant sur sa position, fondée sur l'interprétation de ses propres recherches. Pasteur n'admettra que Bernard avait raison que durant sa dernière année.

Les deux scientifiques s'accordent néanmoins sur un point : la nécessité d'éliminer le concept de génération spontanée – une notion aristotélicienne persistante selon laquelle les nouvelles espèces se développent à partir d'autres espèces en décomposition (par exemple, les asticots seraient produits par la chair pourrissante). Au XVIII^e siècle, les expériences de deux

savants italiens, Francesco Redi et Lazzaro Spallanzani, avaient déjà suggéré que ces organismes qui semblaient surgir d'autres organismes n'étaient pas le fait du transformisme des espèces, mais provenaient de l'air. Il restait cependant à le prouver. En 1857, utilisant du glucose et de la gélatine comme milieu de culture, Bernard a lui-même montré qu'en supprimant l'air, rien ne pousse dans ce milieu, mais il n'a pas poursuivi dans cette direction, absorbé par d'autres recherches.

Contre l'idée de génération spontanée

En 1859, Pasteur décide à son tour de prouver que la génération spontanée est une illusion – et de contrer ainsi les arguments de son ennemi, Félix-Archimède Pouchet, fervent partisan de cette hypothèse. Il demande à Bernard son aide pour concevoir des expériences dans ce sens, avec l'espoir de remporter le prix Alhumbert, fort bien doté, qui récompense l'élucidation du mystère. Le système imaginé par Bernard est un flacon contenant du milieu de culture, dont l'ouverture est reliée à un tube chauffé à très haute température pour éliminer les éventuels microbes de l'air entrant dans le flacon. Mais après nombre de discussions et d'expériences, Pasteur opte pour un long tube en « col-de-cygne » (voir la figure 2), dont la forme devrait favoriser le dépôt des poussières portant les microbes le long de la paroi du tube. Ses expériences sont un

L'AUTEUR



Peter WISE est historien de la médecine, ancien chef de clinique et de recherche en endocrinologie de l'École de médecine de l'Imperial College à Londres.

BIBLIOGRAPHIE

P. Wise, *Un défi sans fin. La vie romancée de Claude Bernard*, Société des Écrivains, 2011.

P. Debré, *Louis Pasteur*, Flammarion, 2010 (1^{re} éd. 1994).

L.-L. Lambrichs, *La vérité médicale*, Hachette, 2008.

P. Dri, *Pasteur, microbes et controverses*, *Les Génies de la Science*, n° 33, 2007.

M. D. Grmek, *Le legs de Claude Bernard*, Fayard, 1997.

F. Dagognet, *Pasteur sans la légende*, Les Empêcheurs de penser en rond, 1994.

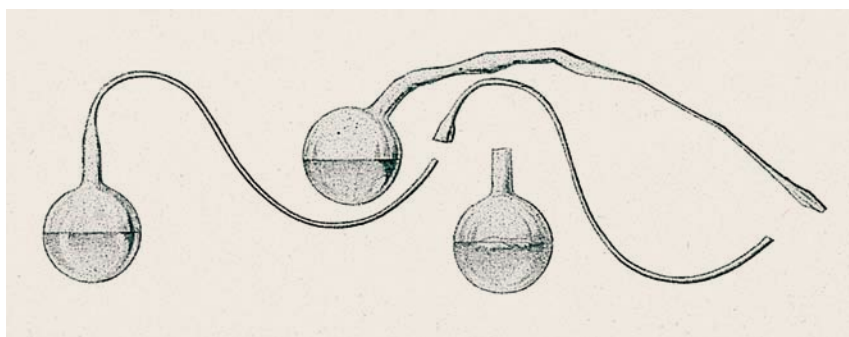
Claude Bernard (biographie, images, citations et liens aux articles), site web bilingue : www.claude-bernard.co.uk

succès et lui permettent, en décembre 1862, de réaliser deux rêves : il remporte le prix Alhumbert et est élu membre de l'Académie des sciences. Bernard est dans les deux comités de sélection.

Pasteur devient une figure publique. Il sollicite l'attention de l'empereur Napoléon III, de l'impératrice Eugénie et de la cousine influente de l'empereur, la princesse Mathilde. Il se lie aussi d'amitié avec le ministre Victor Duruy, chargé d'allouer des fonds pour la recherche (leurs filles sont dans la même école). Une lettre de Pasteur à l'empereur ou au ministre, et il obtient des fonds supplémentaires, du personnel, une extension de son laboratoire ou un supplément de salaire. Gardant toujours un œil vers l'avenir, Pasteur invite des personnalités célèbres à assister à ses conférences.

La santé de Bernard se détériore dans les années 1860. De ses longues heures passées à travailler dans son laboratoire humide, il a récupéré une infection récurrente. Il souffre aussi de son conflit sans fin avec sa femme et ses filles. Enfin, des polémiques avec des adversaires de la Sorbonne, jaloux de ses progrès et embarrassés par son cartésianisme, lui pèsent. Il se retire souvent dans le Beaujolais, où, grâce à ses nombreuses récompenses et promotions, il a acheté un manoir adjacent à la maison de famille. Loin de Paris, il récupère toujours. Il installe un petit laboratoire dans une aile du manoir, où il poursuit l'étude comparative des physiologies animale et végétale. Il rédige aussi son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), où il pose les principes de la recherche en biologie et en médecine, fondée sur la méthode expérimentale. Réputé pour la clarté et la lucidité de ses écrits et de ses cours, il devient membre de l'Académie française.

En 1866, voyant l'état de santé de Bernard empirer, Pasteur publie une lettre ouverte dans le *Moniteur universel*, louant sa « rare sagacité », son « grand art des recherches originales » et « sa bonté aimable ». Peu après, un télégramme de l'empereur arrive à Bernard dans le Beaujolais, lui souhaitant un bon rétablissement, suivi de la commande d'un rapport sur l'état de la recherche française en physiologie.



2. BALLONS À COL-DE-CYGNE utilisés par Pasteur pour démontrer que la fermentation d'un liquide fermentescible stérile est engendrée par les germes de l'atmosphère, extraits d'une planche illustrant les travaux de Pasteur sur la génération spontanée (1875). Les poussières portant les microbes sont piégées le long du tube et n'atteignent pas le liquide.

Les conditions de travail de Bernard s'en trouvent quelque peu améliorées. Trois ans plus tard, Bernard rend la pareille à Pasteur, victime d'une attaque qui l'a partiellement paralysé : il devient le plus assidu de ses visiteurs, lui apportant soutien et réconfort.

De l'alcool à partir du sucre

Quand il était à Lille en 1856, Pasteur avait résolu un problème à la fois scientifique et économique : il avait découvert pourquoi la bière tournait parfois, devenant aigre. Le coupable était une levure, *Lactobacillus*, qui produisait de l'acide lactique au lieu de l'alcool attendu. Le remède était simple : cette levure étant sensible à la chaleur, il suffisait de chauffer la bière pour l'éliminer et laisser les « bonnes » levures fermenter le sucre céréalière en alcool. Dix ans plus tard, Pasteur revient sur ce sujet, cette fois pour prendre part à un vif débat aux implications tant scientifiques qu'industrielles, entourant le principe même de la fermentation : la fermentation alcoolique est-elle activée par la levure elle-même ou par une substance chimique soluble qu'elle produirait ? Tout comme il croit à l'origine microbienne des maladies, Pasteur est persuadé que la levure entière, vivante, est nécessaire à la fermentation. Il s'oppose avec véhémence au jeune chimiste Marcellin Berthelot – et de façon plus mesurée à son ami Bernard. Les deux hommes sont convaincus que les principes actifs du processus sont des « ferments » solubles dérivés de la levure (plus tard nommés enzymes), et non les levures elles-mêmes. Bernard soutient que tout phénomène biologique est le fruit d'un processus physique ou chimique (il s'oppose ainsi à la notion de vitalisme – cette force éthérée invoquée pendant des siècles pour expliquer les éléments autrement inexplicables de la vie et de la maladie). La querelle autour de la fermentation se poursuit pendant 20 ans, principalement entre Pasteur et Berthelot, sans aucune preuve ni d'un côté ni de l'autre. Critiquant sans cesse les opinions et les capacités de Berthelot, Pasteur dépose même une plainte officielle sur la nomination de son adversaire en tant que professeur

Des philosophies de recherche différentes

La meilleure contribution de Bernard à la méthode de la recherche a été son principe de déterminisme expérimental : si, répétée plusieurs fois, une expérience donne des résultats différents, alors les conditions expérimentales associées étaient elles aussi différentes. C'est sur ce point que réside la principale divergence de vue de Pasteur et de Bernard. Les carnets de notes de Pasteur révèlent qu'il répétait parfois une expérience jusqu'à ce

que le résultat confirme sa théorie. Bernard, en revanche, ne se faisait aucune illusion. Dans ses *Principes de la médecine expérimentale* (publiés de façon posthume en 1947), il critique son confrère de façon à peine voilée : « Pasteur suit ses idées et il veut soumettre les faits : moi, je suis les faits, et je cherche à en faire sortir des idées [...]. Pasteur veut diriger la nature ; moi, je me laisse diriger par elle ; je la suis [...] »

Dans ses derniers jours, Pasteur admit que « Bernard avait raison [...] la graine n'est rien ; le sol est tout ». Se référait-il à la théorie de Bernard sur l'origine des maladies (une déstabilisation du milieu intérieur et non un microbe) – ou à son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, où la graine représente l'idée et le sol, la performance de l'expérience ? Nous ne saurons jamais. Quoi qu'il en soit, l'analogie a un sens profond dans les deux cas.

au Collège de France, se proposant comme candidat plus méritant !

Après la mort de Claude Bernard, en 1878, son assistant de laboratoire, Arsène d'Arsonval, se voit confier le classement des derniers documents académiques de son maître. Dans un tiroir du bureau de son appartement parisien, il découvre un rapport détaillé d'expériences menées dans le Beaujolais quelques mois plus tôt. Les résultats de Bernard révèlent que des ferments solubles de la levure suffisent bien à activer la fermentation alcoolique. La conclusion de Bernard est sans appel : « La

ans plus tard, le chimiste allemand Eduard Büchner confirme que Bernard avait raison. La découverte de Büchner sera récompensée du prix Nobel de chimie en 1907.

Pasteur et Bernard étaient de caractères bien différents. Même s'il savait répondre à ses détracteurs, Bernard était un homme vulnérable, modeste et plutôt timide. Tester l'inconnu avec les modestes ressources dont il disposait et former ses assistants à ses préceptes rigoureux lui suffisaient. Pasteur était audacieux, voire arrogant, recherchant le succès et la fortune (comme dans ses travaux sur la maladie du charbon et la rage, les maladies des vers à soie et des vignes ou la corruption du vin). Il utilisait ses assistants pour promouvoir son image. On a aussi émis l'hypothèse

EN ENTERRANT SES RÉSULTATS dans son bureau, Bernard aurait-il voulu épargner son vieil ami ?

formation de l'alcool est indépendante de toute cellule. » Sans surprise, Berthelot publie ces résultats. La réaction de Pasteur est amère. Bernard était encore à ses côtés un mois plus tôt, lors d'une session de l'Académie des sciences. Pourquoi n'avait-il rien dit de son importante découverte à son ami ?

L'année suivante, Pasteur publie une série de réfutations peu étayées des travaux de Bernard, dont plusieurs tentatives infructueuses de reproduire ses résultats. Lui qui avait si longtemps vénéré publiquement Bernard, critique à présent avec âpreté ses techniques et ses interprétations, allant même jusqu'à blâmer son acuité visuelle. Lorsque, 17 ans après, en 1895, Pasteur meurt à son tour, la question n'est toujours pas résolue. Deux

que les efforts de Pasteur pour reproduire les résultats de Bernard sur la fermentation n'avaient pas été très poussés, tout effrayé qu'il était à l'idée qu'il devrait alors admettre son erreur. D'autres se demandent si Bernard, en enterrant ses résultats dans son bureau, n'a pas simplement voulu épargner son vieil ami.

Chacun à leur façon, et bien qu'avec des principes de recherche – attitudes, méthodes et morale – aux antipodes, les deux hommes furent de brillants scientifiques. Leur interaction fut fructueuse bien au-delà des découvertes qu'elle permit, par les leçons qu'elle nous donne, encore aujourd'hui, sur les sciences médicales et la nature humaine. ■

LOGIQUE & CALCUL

Une théorie rêvée du calcul

Les mathématiciens créent des mondes imaginaires et s'interrogent sur ce qui s'y passe. Celui conçu par Jérôme Durand-Lose concilie simplicité et richesse infinie.

Jean-Paul DELAHAYE

De simples particules interagissant selon des règles fixées permettent-elles de réaliser des calculs et, si oui, lesquels ?

Pour le savoir, Jérôme Durand-Lose, professeur à l'Université d'Orléans, a proposé le modèle mathématique d'un univers ne contenant que des particules mobiles qu'il nomme « signaux ». Dans ce monde imaginaire, l'espace est une droite (un espace à une dimension). La droite où les signaux circulent est assimilée à la droite mathématique, c'est-à-dire à l'ensemble infini des nombres réels $\{1, -7, 23/11, \sqrt{3}, \text{etc.}\}$. Le temps est lui aussi continu et représenté à l'aide de nombres réels. Cette idéalisation n'est pas sans conséquence, mais elle est habituelle en physique où ces nombres sont utilisés en particulier dans les représentations de l'espace et du temps.

Les résultats obtenus par J. Durand-Lose et ses étudiants nous montrent les risques inhérents au passage de modèles où tout est discret – espaces composés de points isolés, temps représenté par des entiers – à des espaces continus envisagés sans restriction, avec toutes les richesses que les mathématiciens y découvrent et qui n'ont pas toutes de correspondance en physique.

Pour saisir les mondes étudiés par J. Durand-Lose depuis plus de dix ans, observons en détail l'un d'eux, qui aura la propriété de se reproduire périodiquement. Les signaux qu'il utilise sont au nombre de sept. Ce sont des points mobiles. On les dessine de cou-

leurs différentes et on les désigne par leur couleur. Chaque signal a sa propre vitesse et il n'en change jamais. Cette vitesse est un nombre réel. Dans notre exemple :

- le signal *noir* a la vitesse nulle ;
- le *bleu* et le *jaune* ont la vitesse 1 ; ils se déplacent vers la droite d'une unité de longueur par unité de temps ;
- le *vert* a la vitesse 2 ;
- le *rouge* a la vitesse -2 ; il se déplace vers la gauche de deux unités de longueur par unité de temps ;
- l'*orange* et le *violet* ont la vitesse -1 .

Les signaux interagissent quand ils se rencontrent et, après annihilation, donnent naissance à de nouveaux signaux. On peut voir ces signaux comme des particules ponctuelles. La situation est analogue à celle de la physique des particules, à la nuance près que le mathématicien conçoit et étudie en toute liberté les particules qui l'intéressent, alors que le physicien mène des expériences pour savoir quelles sont les particules existant réellement.

Dressons la liste des interactions possibles des sept types de signaux de notre exemple. Chaque ligne indique ce que la collision de deux signaux (*à gauche*) produit comme nouveaux signaux (*à droite*).

- Règle 1 : *bleu, noir* → *noir, vert*
- Règle 2 : *vert, noir* → *noir, jaune*
- Règle 3 : *jaune, noir* → *orange, noir*
- Règle 4 : *noir, orange* → *rouge, noir*
- Règle 5 : *noir, rouge* → *violet, noir*
- Règle 6 : *noir, violet* → *noir, bleu*

Quand une collision entre deux signaux n'est pas mentionnée – c'est le cas pour *jaune, orange* – les deux signaux se croisent sans interagir. Quand plus de deux signaux se rencontrent en un point, on considère que toutes les règles correspondant à deux signaux présents et interagissants s'appliquent. Par exemple, si les signaux *orange, vert* et *noir* se rencontrent, les règles 2 et 4 s'appliquent, d'où la règle :

vert, noir, orange → *noir, jaune, rouge*.

De telles super-règles peuvent être introduites si on le souhaite. L'évolution de l'univers à une dimension se visualise à l'aide d'un schéma où, par convention, l'écoulement du temps correspond au déplacement vers le haut. Le schéma *a* de l'encadré 1 montre ce qui se produit dans le cas particulier que nous venons de définir quand on place sept signaux aux positions initiales suivantes : quatre signaux *noir* en 0, 1, 3 et 4 ; un signal *bleu* en 0 ; un signal *vert* en 1 ; un signal *jaune* en 3.

Éternel recommencement

On observe qu'après une unité de temps, le signal *bleu* parti de la position 0 rencontre le signal *noir* qui est immobile en position 1. Leur collision donne naissance (d'après la règle 1) à un signal *noir* (qui prolonge donc le signal *noir* en position 1) et un signal *vert* deux fois plus rapide que le *bleu*, qui disparaît. Il y a de même interaction, à l'instant 1, entre le signal *vert* parti de la position 1 et