

> choisissant convenablement la vitesse d'un satellite, on peut lui conférer une orbite quasi circulaire où il est en perpétuelle chute quasi libre, ce qui permet d'allonger considérablement la durée des expériences.

UN ESPACE PAS SI VIDE

Ce tableau idyllique doit cependant être nuancé. D'abord, d'autres forces entrent en jeu, notamment la pression de radiation qu'exerce la lumière du Soleil sur la structure du satellite et qui peut varier le long de l'orbite selon son orientation et son ensoleillement.

On peut aussi penser aux impacts de micrométéorites. Ensuite, la force de traînée n'est pas si faible, car la vitesse d'un satellite en orbite basse est très élevée (de l'ordre de 7,5 kilomètres par seconde).

Dans le cas du satellite *Spot-4*, qui pesait 2,76 tonnes et qui était en orbite à 822 kilomètres d'altitude, la décélération due à la traînée était ainsi égale à $1,3 \times 10^{-8}$ mètre par seconde carrée. Cela ne faisait perdre que 2,5 mètres d'altitude par jour au satellite. En revanche, si le même satellite avait été placé à 250 kilomètres d'altitude, il aurait perdu 5 kilomètres par jour à cause de la prodigieuse augmentation de la masse volumique de l'air (même si elle reste très faible) ! Sa durée de vie se serait alors comptée en semaines.

On comprend mieux pourquoi tous les satellites doivent être munis de propulseurs d'appoint : ces derniers sont nécessaires pour corriger leurs trajectoires et leurs positions avec précision.

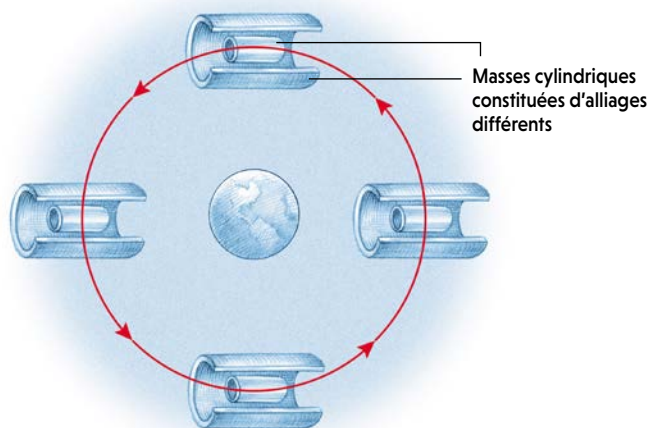
Alors, que faire pour s'approcher encore mieux de la chute libre ? Utiliser des moteurs pour compenser les forces perturbatrices agissant sur le satellite – et cela en continu et non pas en remontrant périodiquement le satellite sur son orbite nominale, comme cela se fait habituellement. C'est le principe de la traînée compensée, mis en œuvre avec le satellite *Microscope*.

Lancé le 25 avril 2016, ce satellite en cours d'exploitation a déjà permis de vérifier avec une précision record le principe d'équivalence, c'est-à-dire l'égalité de la masse pesante et de la masse inerte. L'expérience consiste à mesurer l'éventuelle différence d'accélération entre deux cylindres creux concentriques de compositions différentes (platine et rhodium pour l'un ; titane, aluminium et vanadium pour l'autre) en chute libre autour de la Terre (voir l'encadré ci-dessus).

Ce système de deux masses emboîtées est suspendu à l'intérieur du satellite

CHUTE LIBRE AU SEIN D'UN SATELLITE

Le satellite *Microscope* (acronyme de Microsatellite à traînée compensée pour l'observation du principe d'équivalence), lancé en 2016, contient un système de deux masses cylindriques concentriques constituées d'alliages différents. Le système est suspendu sans contact avec le reste du satellite, dont les moteurs assurent qu'il reste immobile par rapport au système des deux masses. Le mouvement du système des deux masses le long de son orbite s'effectue alors avec des forces aérodynamiques totalement négligeables, l'air résiduel à l'intérieur du satellite étant immobile par rapport au système en question. Il s'agit donc d'une véritable chute libre sous l'effet exclusif de la gravitation de la Terre. L'expérience consiste à vérifier qu'il n'y a pas de mouvement d'une masse par rapport à l'autre. Sinon, le principe d'équivalence serait violé : la chute libre différencierait selon la nature du corps.



sans qu'il y ait contact avec la structure de celui-ci, grâce à des forces électrostatiques bien contrôlées. Ainsi, contrairement au satellite, le dispositif n'est pas soumis aux perturbations de l'atmosphère résiduelle extérieure ni à la pression de radiation solaire.

TRAÎNÉE COMPENSÉE

Par ailleurs, l'accélération moyenne du dispositif est mesurée et sert à piloter les moteurs du satellite de façon que celui-ci reste immobile par rapport au système expérimental. Tout se passe alors comme si le satellite était en chute libre, la traînée atmosphérique étant compensée par la poussée des moteurs. En outre, les masses d'épreuve restent immobiles par rapport à l'air résiduel présent à l'intérieur du satellite, ce qui garantit que les forces aérodynamiques agissant sur ces masses sont totalement négligeables.

Ainsi, avec cette traînée compensée, le satellite suit une trajectoire de chute libre. Sur sa durée de vie, l'expérience pourra alors cumuler de longues périodes de chute parfaitement libre, l'objectif étant d'améliorer d'un facteur 100 la précision du test du principe d'équivalence. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Touboul et al., **MICROSCOPE mission : First results of a space test of the equivalence principle**, *Physical Review Letters*, vol. 119, article 231101, 2017.

E. M. Gaposchkin et A. J. Coster, **Analysis of satellite drag**, *The Lincoln Laboratory Journal*, vol. 1, pp. 203-224, 1988.

J. P. Marec et al., **Contrôle d'orbite d'un satellite de navigation à traînée compensée**, *Acta Astronautica*, vol. 4, pp. 947-984, 1977.

Le principe d'équivalence, Wikipédia (fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d'équivalence).



Répondez
en quelques
minutes à notre
enquête sur Internet :

rebrand.ly/enquete-pls

DE NOMBREUX LOTS À GAGNER

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

Escherichia coli L'ÉVOLUTION EN MARCHÉ

En trois jours, une bactérie *Escherichia coli* produit 200 générations de descendantes. Combien de mutations accumule sa lignée ? Où ? À quelle fréquence ? Et avec quelles conséquences ? Des biologistes viennent d'apporter les réponses.

Suivre en direct, cellule par cellule, les mutations chez la bactérie *Escherichia coli*: ce rêve de Salvador Luria et Max Delbrück, pionniers de la biologie moléculaire et tous deux lauréats en 1969 du prix Nobel de physiologie et médecine, vient de se réaliser soixante-quinze ans après leurs premières expériences. Luria et Delbrück n'avaient pu traquer que des mutations sélectionnées. Mais en mars dernier, Marina Elez et Lydia Robert, du laboratoire Jean-Perrin de Sorbonne Université, à Paris, et leurs collègues ont réussi à suivre les mutations d'une bactérie et de ses descendantes sur plusieurs centaines de générations. Ils ont ainsi montré que, dans leur très grande majorité, ces mutations sont neutres.

En 1936, l'Allemand Max Delbrück, physicien théoricien converti à la biologie par Niels Bohr, fuit le nazisme et, grâce à la

fondation Rockefeller, rejoint le California Institute of Technology où il découvre l'intérêt des bactériophages, les virus de bactéries, pour comprendre les bases de la génétique. En 1940, l'Italien Salvatore Luria, médecin radiologue d'une grande famille intellectuelle juive, en stage à l'Institut Pasteur, à Paris, rejoint Marseille à bicyclette lors de l'invasion allemande et s'embarque pour les États-Unis, où le physicien italien Enrico Fermi, récemment lauréat du prix Nobel, lui obtient une bourse de la fondation Rockefeller.

Dès leur rencontre, Luria l'expérimentateur et Delbrück le théoricien fondent, avec Alfred Hershey (aussi lauréat du prix Nobel de 1969), le Groupe du phage, qui révolutionnera la biologie évolutive. Leur première publication commune, exceptionnelle, en 1943, vise à répondre à une question majeure posée dès 1932 par le généticien de la drosophile Thomas Morgan : quelle est la nature de la



Les bactéries *E. coli* constituent 80 % de la flore intestinale aérobie humaine ; elles peuvent néanmoins donner des lignées pathogènes, décrites à la fin du XIX^e siècle par le pédiatre Theodor Escherich, par acquisition de gènes de virulence.

Elle est capable de vivre avec ou sans oxygène.

EN CHIFFRES

20

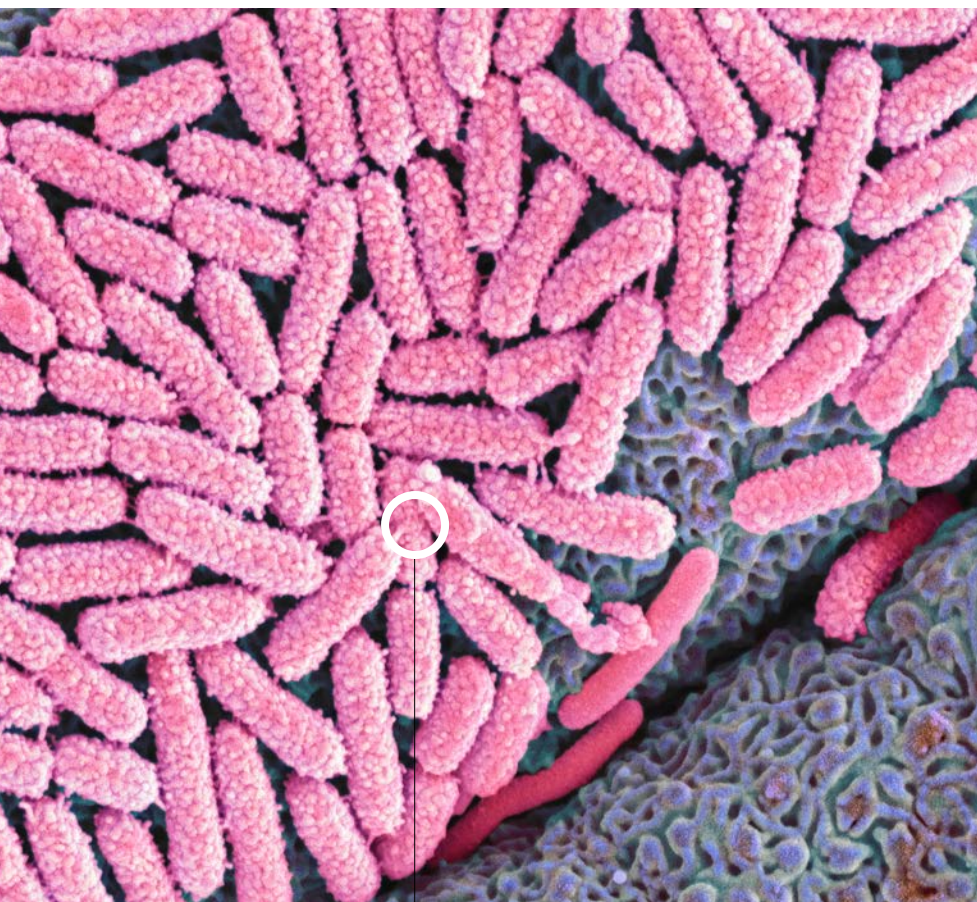
Une bactérie *Escherichia coli* se divise toutes les 20 minutes à 37 °C dans un milieu riche en nutriments.

4,6 millions

Le génome d'une bactérie *E. coli* mesure quelques millimètres et compte environ 4,6 millions de paires de bases – les constituants de l'ADN –, contre 2 mètres et 3,2 milliards de paires de bases chez les humains. *E. coli* comporte environ 4 200 gènes, un humain environ 23 000.

8 espèces

On connaît 8 espèces du genre *Escherichia*, dont la plus récente, *E. marmotae*, a été décrite en 2015. La plupart de leurs souches sont commensales : elles vivent associées à des animaux à sang chaud, dans leur tube digestif.



Elle se propulse à l'aide de plusieurs flagelles qui hérissent sa surface.



Escherichia coli
Taille : environ 2 µm

mutation? À l'époque, on ignorait que l'ADN était le support du matériel héréditaire, mais on savait que les gènes étaient localisés sur les chromosomes. On ne détectait la mutation d'un gène (un changement brusque d'un caractère héréditaire) que par son effet sur l'organisme.

Luria et Delbrück mettent au point une méthode leur permettant d'observer, chez *E. coli*, l'apparition des mutations qui confèrent une résistance au bactériophage α . Dans des tubes de culture, Luria inocule un petit nombre de bactéries sensibles au virus. Après leur multiplication, il les étale dans des boîtes de Petri sur un gel

nutritif contenant des bactériophages en excès qui devraient tuer toutes les bactéries. Mais si une bactérie est devenue résistante, elle se multiplie et donne une colonie circulaire sur le gel. Or très peu de bactéries survivent, et compter les colonies revient à compter les occurrences de telles résistances.

DES MUTATIONS ALÉATOIRES?

Pour expliquer l'apparition de mutations qui confèrent ces résistances, Luria et Delbrück veulent tester deux hypothèses. Selon la première, chaque bactérie a une faible probabilité, indépendante de la présence du virus, de muter et de devenir résistante; chaque descendant du mutant sera résistant – sauf mutation inverse. Selon la seconde, chaque bactérie a une faible probabilité d'acquérir une immunité en présence du virus et de survivre à son attaque, immunité elle aussi conférée à sa descendance.

En substance, dans le premier cas, on s'attend que, dans une culture en croissance, la proportion des colonies résistantes augmente avec le temps puisque de nouveaux mutants apparaissent constamment. Dans le second cas, au contraire, on obtiendrait une proportion constante de colonies résistantes puisque cette résistance apparaît au contact du virus. Il suffit donc de déterminer la proportion de bactéries résistantes dans la culture et ses sous-cultures. Mais si la première hypothèse est la bonne, les résultats ne seront pas reproductibles d'un jour à l'autre. C'est pourquoi Delbrück quantifie et interprète ➤

> ces fluctuations à l'aide d'un outil statistique performant issu de la mécanique quantique. Le test, dit de fluctuation, fournit un résultat en faveur de la première hypothèse: les mutations surviennent de manière aléatoire, indépendamment de la présence du virus.

Dans leur expérience, Luria et Delbrück étudient la mutation, certes, mais de façon très indirecte. Ils n'ont pas accès à la cellule qui a muté, mais à la colonie qui en résulte des générations plus tard. Ils ne suivent pas non plus la mutation elle-même, mais déduisent son occurrence de la résistance qu'elle confère. Enfin, la mutation recherchée est sous forte sélection, puisque la survie de la bactérie en dépend. C'est donc une prouesse qu'ont réalisée Marina Elez, Lydia Robert et leurs collègues.

DES ERREURS LUMINEUSES

Le système expérimental permet de suivre en temps réel, sur cellules isolées d'*E. coli*, la dynamique des mutations et leurs effets sur le succès reproducteur des bactéries, caractérisé ici par leur vitesse de division. Il a nécessité la mise au point d'une structure microfluidique élaborée où il est possible de suivre les générations bactériennes pendant plusieurs jours (voir l'encadré ci-contre). On y visualise par ailleurs les mutations à l'aide d'une technique biologique inventive.

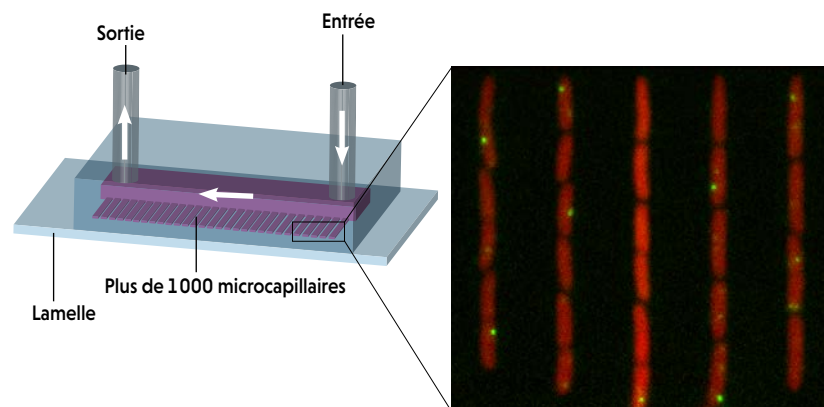
La majorité des mutations sont dues à des erreurs de lecture lors de la réplication – la duplication du chromosome bactérien. Or un système moléculaire reconnaît ces erreurs et les répare. Il est constitué de plusieurs protéines qui agissent séquentiellement. La protéine MutS reconnaît une erreur sur un brin d'ADN, ce qui recrute la protéine MutL, laquelle confirme l'erreur. Puis l'enzyme MutH interagit avec MutL et coupe le brin, qui est ensuite réparé.

Toutefois, si on inactive le gène *mutH*, la réparation n'a pas lieu, bien que tout le jeu des protéines en amont se déroule normalement. La protéine MutL s'accumule alors transitoirement à l'endroit de l'erreur, le temps de la synthèse locale de l'ADN qui, comme la réparation n'a pu se produire, présentera une mutation ponctuelle. Les biologistes ont utilisé cette accumulation pour visualiser les mutations à venir en fusionnant le gène *mutL* avec celui d'une protéine fluorescente, visible quand on l'éclaire à une certaine longueur d'onde.

En suivant des bactéries ainsi modifiées sur 200 générations (trois jours), ils ont détecté 3000 points fluorescents, survenant à une vitesse de 0,32 mutation par

UNE POUPONNIÈRE DE BACTÉRIES

Pour suivre pendant plusieurs jours l'évolution de bactéries isolées, les chercheurs ont cultivé ces cellules dans plus d'un millier de microcapillaires si étroits que les cellules en division y restent alignées. Une cellule mère a été placée au fond de chaque capillaire. À chaque fois qu'elle se divise, elle donne une nouvelle génération : deux cellules filles dont une reste au fond. Ce sont ces cellules « du fond » qui sont observées toutes les 4 minutes pendant 3 jours, ce qui correspond à 200 générations. Les mutations apparaissent sous la forme de points fluorescents.



heure. En revanche, la bactérie non modifiée, capable de réparer son ADN, ne subit que 0,0022 mutation par heure (le spot lumineux y dure plus longtemps quand l'ADN n'est pas réparé, ce qui distingue les erreurs conduisant à des mutations). Ainsi, en 60 heures, une lignée issue d'une cellule mère unique incapable de réparer ses mutations en a accumulé 20, tandis qu'une lignée issue d'une cellule normale n'en a acquis que 0,1 – ce qui montre la performance du système de réparation.

Mais comment vivent des cellules qui ont accumulé 20 mutations en 60 heures? En analysant la vitesse de croissance de chaque lignée, les chercheurs ont estimé leur succès reproducteur. Résultat : 1% seulement des mutations étaient létales. Les mutations non létales, quant à elles, ne modifiaient la vitesse de croissance des lignées que de 0,32%, ce qui est insignifiant. Ainsi, les mutations, dans leur grande majorité, sont neutres ou quasi neutres, c'est-à-dire qu'étant ni favorables ni défavorables à la bactérie, elles ne portent pas à sélection.

Il y a un demi-siècle, le généticien japonais Motoo Kimura proposait sa théorie neutraliste de l'évolution, alors controversée. Si celle-ci est aujourd'hui communément admise, Marina Elez, Lydia Robert et leurs collègues en ont désormais apporté une preuve expérimentale éclatante. On attend avec impatience le suivi des mutations dans un environnement changeant, plus drastique... ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Robert et al., **Mutation dynamics and fitness effects followed in single cells**, *Science*, vol. 359, pp. 1283-1286, 2018.

M. Elez et al., **Seeing mutations in living cells**, *Curr. Biol.*, vol. 20, pp. 1432-1437, 2010.

S. Luria et M. Delbrück, **Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance**, *Genetics*, vol. 28, pp. 491-511, 1943.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482



N° 481 (nov. 17)
réf. PL481



N° 480 (oct. 17)
réf. PL480



N° 479 (sept. 17)
réf. PL479



N° 478 (août 17)
réf. PL478



N° 477 (juil. 17)
réf. PL477



N° 476 (juin 17)
réf. PL476



À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,50 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ x 9,50 € = 9,50 €

2^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

3^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

4^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

5^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

6^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2018 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**