



HAL
open science

Le paradoxe de Zénon ou la question du mouvement

Michel Mitov

► **To cite this version:**

Michel Mitov. Le paradoxe de Zénon ou la question du mouvement. *La Recherche*, 2025, 580, pp.80-85.
hal-04866169

HAL Id: hal-04866169

<https://hal.science/hal-04866169v1>

Submitted on 6 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

**Michel Mitov**

PHYSICIEN, NICE

Directeur de recherche CNRS à l'Institut de physique de Nice (Université Côte d'Azur/CNRS), ses travaux portent sur les cristaux liquides torsadés et le biomimétisme. Il est l'auteur de l'ouvrage *Matière sensible* (Seuil, 2010).

Le paradoxe de Zénon ou la question du mouvement

La somme d'un nombre infini de longueurs est-elle infinie ? Au V^e siècle avant notre ère, Zénon d'Élée discutait de cette question par un paradoxe menant à l'impossibilité du mouvement d'un marcheur. La série géométrique des mathématiciens du XIX^e siècle désamorçera les apories de Zénon. Sous toutes leurs facettes ?

MUSÉE ARCHEOLOGIQUE FLORENCE/GIANNI DAGLIORTI/
AURIMAGES - ROMAIN SAADA/OPALE

« **A**vant d'arriver au bout du chemin, il faut être arrivé au milieu. Puis, au milieu de ce qui reste. Et ainsi de suite à l'infini. L'infini ne pouvant être achevé, le mouvement est impossible », développait Zénon d'Élée (au V^e siècle avant notre ère). Cet argument du philosophe grec, connu sous le nom de *Dichotomie*, renvoie au problème de la division infinie d'une ligne. Il l'assortissait de trois autres apories – des difficultés logiques insolubles : *L'Achille*, *La Flèche* et *Le Stade* (lire l'encadré p. 90), connues depuis lors comme les paradoxes du mouvement. Ceux-ci reflètent la manière dont raisonnait Zénon : il produisait des arguments dans le champ de la pensée et des effets de langage pous-

sant la logique dans des impasses apparentes. Disciple zélé de Parménide (fin du VI^e siècle av. n. è. – milieu du V^e siècle av. n. è.), il visait ainsi à consolider la vision portée par son maître : celle d'un monde sans changement, où tout mouvement est illusion de nos sens.

Cependant, à la même époque, Héraclite d'Éphèse soutenait une vision opposée : « *Toute entité bouge et rien ne reste immobile* », écrivait Platon pour le citer. Aristote, au IV^e siècle av. n. è., compta lui aussi parmi les détracteurs de Zénon, dont il a rapporté les arguments pour mieux les réfuter selon le logicien et philosophe Bertrand Russell (1872-1970) (1). Son ouvrage *La Physique* constitue malgré tout la principale source – indirecte – sur la pensée de Zénon, qui aurait écrit un livre sur ses paradoxes sans que leur forme d'origine soit connue. Le portrait que brosent les auteurs anciens de Zénon est par conséquent celui d'un auteur mystérieux, occupé à élaborer une argumentation sophistiquée sans qu'une thèse claire puisse s'en dégager.

RÉPONSE ATOMISTE ET RÉPONSE POTENTIALISTE

Néanmoins, les paradoxes qu'il a élaborés ont été pleinement accueillis dans le débat philosophique durant l'Antiquité grecque. Deux types de réponse leur furent apportés à l'époque : une réponse atomiste et une réponse potentialiste. La réponse atomiste – reliée au concept antique d'atome, du grec *átomos* (insécable) – nie le caractère infini de la division : il ne saurait y avoir de division par moitié d'une longueur faite de petites grandeurs indivisibles. Tout comme il y a une fin à la division, il y a une dernière étape au cours de laquelle le marcheur est arrivé, un mouvement s'effectue donc en un nombre fini d'étapes.

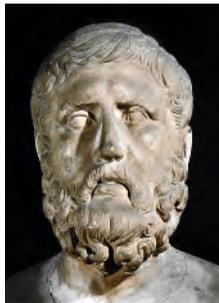
Le défaut de cette position, qui était une qualité selon les atomistes, est de refuser les conditions de départ. Les atomistes (dont Démocrite et Épicure faisaient partie) rejetaient par exemple le caractère continu du mouvement, impliquant l'infinie divisibilité du chemin. Leurs idées seront reléguées au second plan pendant l'Antiquité tardive, quand les théories d'Aristote s'imposeront dans le monde

gréco-romain. Certaines de ces intuitions auront néanmoins préfiguré des concepts fondamentaux de la science moderne (les travaux sur la mécanique quantique montreront que le mouvement à l'échelle subatomique est fondamentalement discontinu, et probabiliste). L'autre réponse aux paradoxes de Zénon, dite potentialiste, est celle d'Aristote. Elle met l'accent sur la réalisation d'un potentiel latent. Aristote admet ainsi le caractère infini de la division mais soutient qu'une longueur, formant une unité, n'est porteuse d'aucune possibilité d'être divisée. Si une division advient, elle ne peut qu'être extrinsèque et comporter un nombre déterminé d'étapes. Un observateur peut donc décider d'un acte arbitraire de divisions, mais cet acte sera nécessairement fini. Le marcheur achèvera son parcours sans paradoxe.

La réponse potentialiste tombera à son tour en désuétude lors de l'introduction du calcul infinitésimal, qui changera la manière d'appréhender l'infini et le mouvement. Elle mériterait sans doute d'être réinterprétée en s'interrogeant sur les raisons qui ont poussé les Anciens à préférer l'infini potentiel – toujours divisible – à l'infini actuel – représentant une infinité complète et réalisée –, qui devint un concept accepté à la suite des développements des mathématiques modernes. Les subtilités des débats anciens pourraient sans doute avoir été dissimulées par des interprétations modernes anachroniques (2).

La Dichotomie implique une suite infinie de points à mi-chemin d'une ligne. Le cadre dans lequel le paradoxe est exposé est continu car cette ligne est infiniment divisible par deux.

Cependant, le texte d'Aristote a été différemment interprété au fil des siècles, selon le contexte intellectuel. Au XIII^e siècle, les philosophes scolastiques comme Thomas d'Aquin cherchent à concilier l'expression d'Aristote avec la théologie chrétienne. Aux XVI^e et XVII^e siècles, les concepts de mouvement et de continuité sont reformulés dans un cadre mathématique et mécaniste ; les paradoxes de Zénon sont donc revisités sous un angle analytique. Au XIX^e siècle, les travaux sur les séries infinies et les nombres réels appréhendent le mouvement comme continu : l'interprétation du texte d'Aristote est supplantée



▲ Buste en marbre de Zénon d'Elée, conservé aux musées du Capitole, à Rome.

par l'usage de méthodes mathématiques. Au XX^e siècle, le philosophe Henri Bergson explore la notion de temps vécu par opposition au temps mathématique, en abordant le mouvement non pas uniquement à travers la logique formelle mais à partir de l'expérience humaine de la continuité.

INTERPRÉTATION PROGRESSIVE VERSUS INTERPRÉTATION RÉGRESSIVE

Deux versions du paradoxe de *La Dichotomie* peuvent en fait être distinguées : progressive et régressive. Dans une interprétation progressive, on commence par diviser le parcours en deux, puis la distance jusqu'à l'arrivée en deux à nouveau, et ainsi de suite dans une démarche itérative. Il existera toujours une distance restante $l = 1/2^n$, où n est le nombre de divisions. Le mouvement apparaît alors comme impossible, car la destination finale ne peut pas être atteinte. L'interprétation progressive ne suggère pas qu'un mouvement nécessiterait un temps infini pour être accompli, mais qu'il faudrait un nombre infini d'étapes pour l'achever. Mais comment concevoir un nombre infini d'actions à accomplir lors d'une durée finie ?

L'incohérence interne de *La Dichotomie* est également à relever : l'existence du mouvement est admise pour atteindre les différents points d'étape, puis niée, puisque la destination finale ne sera pas atteinte. Si un corps en mouvement parcourt l'entièreté de la première moitié du chemin, pourquoi n'en serait-il pas de même pour l'autre moitié ?

Dans une interprétation régressive, avant de parcourir la seconde moitié du trajet, il s'agit de parcourir la première moitié. Avant celle-ci, le premier quart. Avant celui-ci, il faut traverser le premier huitième, et ainsi de suite à l'infini. Avec l'interprétation régressive, le mouvement n'a pas démarré.

Depuis le XIX^e siècle, l'aporie de *La Dichotomie* est considérée comme résumant les autres et résolue par les mathématiques, de par les notions de convergence d'une infinité d'étapes en un temps fini et de continuité, envisageant une divisibilité non problématique. Les mathématiques énoncent que la somme S d'une série géométrique de terme général $1/2^n$, avec n variant

de 1 à l'infini, converge vers 1 et non vers l'infini. Dans une série géométrique, chaque terme après celui qui le précède est obtenu en multipliant le terme précédent par une constante appelée ratio r . Elle s'exprime donc sous la forme $S = a + ar + ar^2 + ar^3 + \text{etc.}$, où a est le premier terme. En multipliant cette série par r , on obtient $rS = ar + ar^2 + ar^3 + ar^4 + \text{etc.}$. Retrancher rS à la série S fournit : $S - rS = a$, soit $S(1 - r) = a$, ou encore : $S = a/(1 - r)$. La condition de validité de cette formule est que la valeur absolue de r soit strictement inférieure à 1, ce qui assure la convergence de la série vers une valeur finie. Dans le cas de *La Dichotomie*, impliquant itérativement une moitié de chemin restant à parcourir, a est égal à $1/2$, et r aussi (puisque l'on divise de moitié de façon répétée). D'où $S = 1/2 / (1 - 1/2) = 1/2 / 1/2 = 1$.

Comme une conséquence pour des commentateurs récents, soit le problème ne s'est jamais posé d'un point de vue rationnel, soit les avancées mathématiques ont permis de le résoudre. Pourtant, la formule énoncée n'est pas une résolution logique du paradoxe mais une formulation mathématique du problème initial. De plus, ce serait omettre le fait que les paradoxes de Zénon ne sont pas uniquement des problèmes mathématiques mais également philosophiques. Maurice Caveing (1923-2019), philosophe et spécialiste des mathématiques de l'Antiquité, soutient par exemple que les mathématiques sont indispensables. Mais il met également en garde : un attachement trop fort aux mathématiques peut se révéler un obstacle à la compréhension, dans leur entièreté, de problèmes énoncés dans l'Antiquité (3).

Il faut donc reconnaître que la perplexité demeure depuis vingt-cinq siècles. Selon certains auteurs contemporains, ils devraient être approchés comme des paradoxes de l'immobilité plutôt que du mouvement. Maël Bathfield,

Un attachement trop fort aux mathématiques peut se révéler un obstacle à la compréhension, dans leur entièreté, de problèmes énoncés dans l'Antiquité

chercheur indépendant en histoire, épistémologie et philosophie des sciences, l'explique : «*La notion de mouvement n'est plus problématique, tandis que celle de l'immobilité le devient. Ceci est tout sauf embêtant puisqu'il est facile de concevoir le fait que de l'immobilité apparente puisse dissimuler du mouvement réel, et ainsi la proposition "l'immobilité n'est qu'une illusion de nos sens" semble bien plus crédible que la thèse inverse soutenue par Parménide*» (4). Une proposition que le chercheur estime en outre «*en conformité avec la description moderne des objets matériels*». Et de donner l'exemple de l'agitation thermique dans la matière. Celle-ci, trouvant son origine dans le mouvement aléatoire et incessant des atomes, «*peut offrir une explication rationnelle*» à l'allégorie de l'illusion d'immobilité. Entreprendre d'identifier

des failles dans les arguments de Zénon ne se poserait donc pas, puisque faire relever de l'illusion le concept d'immobilité sort le concept de mouvement d'un problème de logique. D'autres travaux récents invitent eux aussi à admettre l'impasse de la pensée quand elle aborde la question du mouvement, et la persistance du problème, plutôt que de proposer de le résoudre. Il ne s'agit pourtant pas de nier une certitude sensible évidente – celle du mouvement –, ni d'opposer nos représentations du mouvement à cette action en elle-même. Quelle serait une approche pertinente ? Le philosophe Pierrot Seban défend l'idée que l'aporie de Zénon n'est ni une erreur de raisonnement du penseur, ni un sophisme, et qu'elle est éminemment moderne, en ce sens que «*ce problème philosophique se pose encore*

L'Achille, La Flèche et Le Stade

L'Achille a pour cadre la division par deux, déjà présente dans *La Dichotomie*. Le paradoxe met en scène le coureur grec Achille qui décide de faire une course avec une tortue – choisie pour augmenter l'effet fabuleux de l'histoire par Simplicius, philosophe grec du VI^e siècle et commentateur tardif d'Aristote – et, afin de donner une chance supplémentaire à l'animal, lui laisse une avance. Or, Zénon explique qu'Achille ne rattrapera pas la tortue : à chaque fois qu'il arrivera au point où celle-ci se trouvait, elle aura dans le même temps de nouveau avancé d'une distance. Le paradoxe va même plus loin : la course ne finira pas car, même en



▲ Achille poursuivant la tortue. Illustration tirée des *Institutions de physique*, d'Émilie du Châtelet (éd. Prault, 1740).

devenant de plus en plus petite, la distance ne sera jamais égale à zéro. La Flèche émane de traductions contestables du texte d'Aristote perpétuées au siècle dernier. Son interprétation repose sur le choix du repère spatiotemporel et une hypothèse erronée. La flèche de l'archer ne

parviendra pas à la cible car, à chaque position instantanée du vol, elle demeure immobile en occupant un espace égal à son volume. Un corps animé serait ainsi au repos durant la durée de son mouvement. Mais le temps ne procède pas d'un composé d'instant, le raisonnement est vicié. Le Stade est l'aporie la plus difficile à appréhender, elle est aussi la moins commentée. La vitesse $V_{B/A}$ d'un corps B par rapport à un corps A au repos n'égale pas la vitesse $V_{B/C}$ de B par rapport à un corps C en déplacement à une vitesse $V_{C/A}$ par rapport à A. Cette affirmation est valable dans un cadre continu, lorsque les variables peuvent prendre n'importe

quelle valeur dans un intervalle donné : $V_{B/A} = V_{B/C} + V_{C/A}$, et si $V_{C/A} \neq 0$ alors $V_{B/A} \neq V_{B/C}$. Elle n'est pas valable dans un cadre discret, lorsque les variables ont des valeurs particulières et disjointes, la notion de vitesse relative n'y étant pas acceptée. Une explication est avancée par le philosophe des sciences Maël Bathfield (1). Un référentiel absolu, celui de A, doit exister et seulement une seule valeur de vitesse est possible pour un corps en mouvement par rapport à A, ce que l'expérience contredit. Le Stade conduit à un paradoxe mais cette aporie-là ne nie pas l'existence du mouvement. M. M. (1) M. Bathfield, *Found. Sci.*, 23, 649, 2017.

à nous tous et toutes aujourd'hui, avec une force identique à celle qu'il avait au V^e siècle av. n. è., du temps de Zénon. Non pas que cette aporie n'admette pas de solution. Elle admet et a toujours admis, au contraire, une pluralité de solutions à chaque époque. Mais la pluralité même de ces solutions leur confère, à chaque époque et aujourd'hui encore, un caractère profondément conflictuel» (5). Incompatibles entre elles, ces solutions nous laissent ainsi face à un problème entêtant. À leur sujet, l'argumentation des commentateurs s'est généralement concentrée sur l'expérience : ceux-ci s'attachent à défendre que le mouvement dans *La Dichotomie* est possible, qu'Achille rejoint la tortue et que la flèche n'est pas suspendue en l'air. Ils font appel au sens de l'intuition commune, ce qui est précisément l'état critiqué par Zénon. Zénon ne niait pas le phénomène du mouvement, il démentait son existence réelle. Le mouvement est une illusion et c'est en tant que tel qu'il existe, comme l'explique Yannick Delmas-Rigoutsos, maître de conférences en épistémologie/histoire des sciences et en informatique à l'université de Poitiers (6).

DES CONCEPTS INVARIANTS DE LA PENSÉE

Pour comprendre la raison de la subsistance du problème, il faut évoquer l'exploitation qu'il fait d'un ensemble de traits universels. La vision paradoxale de Zénon nous concernerait tous parce qu'elle met en jeu les concepts de temps, d'espace, d'infini et de continuité, et que ces concepts sont des invariants de la pensée. Il s'agirait de comprendre ce qu'il y a d'intemporel dans les questions posées par Zénon. L'invariance proviendrait du fait que le temps, l'espace, l'infini de l'énumération et le continu sont des concepts mathématiques. Que le marcheur n'atteigne jamais son but est relié à la question de la continuité. Que le raisonnement implique une répétition perpétuelle est relié à celle de l'infini. Zénon considère l'infini comme un concept secondaire par rapport à celui du caractère inachevable du parcours. Il insiste sur le fait que l'infini ne saurait connaître un terme, et cette insistance est reliée au raisonnement d'itéra-

tif indéfini dont Zénon fait un usage systématique. Chaque itération d'une certaine opération garantit de produire une réitération, ce qui fait conclure à Zénon que la poursuite de l'opération est inachevable et que le résultat cumulatif de cette opération est infini. Zénon ne traite pas la question d'un chemin à parcourir mais celle de l'impossibilité de parcourir un chemin comportant une infinité d'étapes. *In fine*, il déclare que l'infini ne peut pas être atteint. C'est ce qu'il voulait montrer et qui a été manqué par la plupart des Modernes, souligne Pierrot Seban.

Commenter que la course d'Achille s'effectue selon une ligne continue comportant une infinité de segments, revient à la raconter au passé, en relatant qu'il apparaît qu'Achille a parcouru l'infini, ce qui entre en collision avec la raison. En revanche, si l'on discute de la course d'Achille au présent, Achille ne pourra pas terminer la compétition car nul ne peut achever l'inachevable. Dans ce cas, le commentateur accorde une nette attention à l'action initiale – ce qu'Achille va faire – car elle a un statut privilégié, en étant préliminaire au résultat final. Assimiler la question du paradoxe de Zénon à un non-problème ou à un problème résolu reviendrait à amalgamer un mouvement à faire et un mouvement fait.

La problématique n'est pas de savoir s'il existe une solution à l'aporie de Zénon mais de reconnaître que les solutions apportées sont radicalement différentes, ce qui semble être la manifestation d'un excès de raison. Les solutions se contredisent, l'une exclut les autres. Le défi pour la raison que produit la dialectique de Zénon serait d'interroger si nous savons entièrement penser le mouvement, résume Pierrot Seban. En ce sens, les paradoxes de Zénon ne répondent plus littéralement à leur projet d'origine. Ils seraient plutôt devenus un instrument de diffusion de considérations modernes sur la continuité, l'infini et le mouvement. Le philosophe invite le lecteur des paradoxes de Zénon à penser avec lui, sans imposer de penser à sa place. Est-il possible d'avoir fini un raisonnement comportant une infinité d'étapes ? Peut-on mener une opération sans fin, puis passer à autre chose ? Ces questions anciennes seraient à poser d'une manière guère différente de nos jours. ■



L'APORIE

de *La Dichotomie* est considérée comme résolue par les mathématiques, de par les notions de convergence d'une infinité d'étapes en un temps fini et de continuité, envisageant une divisibilité non problématique.

(1) Bertrand Russell, *La Méthode scientifique en philosophie*, Payot, 1971, cité dans Y. Delmas-Rigoutsos, « Les paradoxes et le savoir, étude historique, épistémologique et logique », tel-02503578, thèse École Polytechnique, 1998.

(2) P. Seban, « L'aporie du passage », tel-04457772, thèse Université Paris Nanterre, 2018.

(3) Maurice Caveing, *Zénon et le continu*, Vrin, 1989.

(4) M. Bathfield, *Found. Sci.*, 23, 649, 2017.

(5) Pierrot Seban, *Le temps et L'infini*, postface de Francis Wolff, PUF, 2023.

(6) Y. Delmas-Rigoutsos, « Les paradoxes et le savoir, étude historique, épistémologique et logique », tel-02503578, thèse École Polytechnique, 1998.