



HAL
open science

Pourquoi les paradoxes de Zénon ne remettent pas en question le mouvement mais plutôt l'immobilité

Mael Bathfield

► **To cite this version:**

Mael Bathfield. Pourquoi les paradoxes de Zénon ne remettent pas en question le mouvement mais plutôt l'immobilité. 2017. hal-02268936

HAL Id: hal-02268936

<https://hal.science/hal-02268936>

Preprint submitted on 24 Aug 2019

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.

Ce document contient la version en français de l'article original intitulé
« Why Zeno's paradoxes of motion are actually about immobility »
publié dans la revue *Foundations of Science*.

Disponible on-line depuis le 8 nov. 2017 à l'adresse web suivante :

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10699-017-9544-9>

(Lien 'officiel' mais accès restreint au texte complet)

ou

<https://philpapers.org/rec/BATWZP>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02263487>

(Archives en accès libre)

Comme il ne s'agit pas d'une traduction littérale de l'anglais vers le français, certaines petites modifications et certains ajouts ont pu être réalisés, bien que je me sois efforcé de rester au plus proche du sens du texte original en anglais. En même temps, il est possible que la structure de certaines phrases soit restée trop proche de celle de la version anglaise, ce qui peut conduire à des phrases qui 'sonnent' un peu bizarrement en français. Je m'excuse de cela par avance.

Maël Bathfield
Novembre 2017

Pourquoi les paradoxes de Zénon ne remettent pas en question le mouvement mais plutôt l'immobilité.

Maël Bathfield 

Résumé Les paradoxes du mouvement de Zénon prétendent nier l'existence du mouvement. En effet, ils ont été conçus dans le seul but de consolider la vision Parménidienne d'un monde immuable et sans changement. L'objectif principal de cet article est de démontrer que ces célèbres paradoxes logiques devraient plutôt être vus comme des *paradoxes de l'immobilité*. Avec cette nouvelle vision, la notion de mouvement n'est plus problématique tandis que celle de l'immobilité le devient. Ceci est tout sauf embêtant puisque qu'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. De plus, cette proposition est également en conformité avec la description moderne des objets matériels : dans le cadre de la théorie atomique contemporaine, l'existence d'un mouvement aléatoire et incessant des atomes – nommé l'agitation thermique – peut offrir une explication rationnelle pour cette 'illusion d'immobilité'. Cette nouvelle approche des paradoxes de Zénon nous amène aussi à introduire le nouveau concept d'impermobilité, dont le principal avantage est d'être bien plus approprié (que le concept d'immobilité) pour une description sans *a priori* de la réalité des phénomènes physiques.

Mots clé Paradoxes de Zénon · illusion · mouvement · immobilité · agitation thermique

Remerciements L'auteur remercie sincèrement tous les relecteurs académiques (reviewers) des différentes versions de ce manuscrit pour leurs remarques toujours judicieuses et leurs commentaires constructifs. Un remerciement spécial est adressé au Dr. Celine Scornavacca pour sa grande aide à la rédaction du texte 'original' en anglais et pour ces commentaires bien utiles.

✉ mbathfield.science@gmail.com

« Zénon a sur le mouvement quatre raisonnements, qui ne laissent pas que d'embarrasser ceux qui tentent de les réfuter » écrivait Aristote il y a approximativement vingt-cinq siècles (*La Physique* VI:9, 239b10)¹.

De nos jours, Zénon d'Élée est effectivement bien connu pour avoir exprimé quatre arguments à l'encontre du mouvement – usuellement intitulés ‘La Dichotomie’, ‘L’Achille’, ‘La Flèche’ et ‘Le Stade’ – et classiquement mentionnés comme étant les paradoxes du mouvement de Zénon. Zénon était un philosophe grec membre de l’Ecole Eléate fondée par Parménide (V^{ème} siècle avant J.-C.). Selon la philosophie de Parménide, la réalité est une, immuable, sans changement, et toute pluralité, changement ou mouvement ne sont que des illusions de nos sens. En tant que disciple zélé, Zénon est sensé avoir écrit un livre plein de paradoxes qui défendent la philosophie de Parménide. Ce livre a toutefois disparu, et presque tous ce que l’on connaît de ces arguments à l’encontre du mouvement nous est donc reporté par Aristote (IV^{ème} siècle avant J.-C.) dans le Livre VI de *La Physique*.² Dans cet ouvrage, Aristote dévoile ses propres arguments dans le but d’expliquer pourquoi « Zénon fait un faux raisonnement » (*La Physique* VI:8, 239b5) et en quoi « constitue l’erreur du raisonnement de Zénon » (*La Physique* VI:2, 233a22); par conséquent, il ne présente jamais les arguments de Zénon contre le mouvement comme étant des paradoxes. Ce point de vue d’Aristote fut largement accepté jusqu’à la fin du XIX^{ème} siècle (Dowden 2017), moment à partir duquel il commença à être remis en question,³ ce qui eut pour conséquence assez logique une présentation des arguments de Zénon en tant que paradoxes. Depuis, les ‘paradoxes de Zénon’ ont été le sujet de plusieurs monographies, telles que celle de W.C. Salmon (1970), celle de F.A. Shamsi (1973) ou encore celle de J.A. Faris (1996),⁴ dans lesquelles sont rassemblées un nombre impressionnant de références bibliographiques. Durant ces dernières décennies⁵ (voir par exemple Harrison 1996; Papa-Grimaldi 1996; Alper et Bridger 1997; Lynds 2003; Antonopoulos 2004; Hasper 2006; Peijnenburg and Atkinson 2008; Łukowski 2011; Laraudogoitia 2013; Reeder 2015; Ardourel 2015).

Ainsi, depuis que les paradoxes de Zénon furent énoncés, beaucoup de solutions ont été proposées mais aucune n’a réellement réussie à résoudre tous les aspects paradoxaux de l’ensemble des arguments de Zénon : soit la solution proposée résout un (ou plusieurs) argument(s) mais en laisse toujours (au moins) un de côté (un des exemples les plus récents étant l’article de Ardourel 2015), soit la solution proposée mène à un autre problèmes non-

¹ Dans cette version en français de l’article, toutes les traductions des citations d’Aristote sont celles réalisées par Barthélémy Saint-Hilaire (1862).

² Concernant l’argument de ‘La Flèche’ (voir [section II](#)), il existe toutefois une phrase dans les écrits de Diogenes Laertius « ce qui se meut ne se meut ni dans l’endroit où il est, ni dans un lieu différent de celui où il est » (*Vitae Philos.* 9, 72) qui peut être attribuée à Zénon à l’aide d’autres sources primaires (voir Vlastos 1966).

³ Par exemple, la solution d’Aristote à l’argument de ‘La Dichotomie’ (c.-à-d. distinction entre ‘l’infini de la division’ et ‘l’infini des extrémités’ ; *La Physique* VI:2, 233a25) est considérée comme « philosophiquement peu satisfaisante » par G.S. Kirk et J.E. Raven (1957).

⁴ Ces trois monographies traitent aussi des paradoxes de la pluralité (également attribués à Zénon). La relation entre les paradoxes du mouvement et ceux de la pluralité est très bien détaillée dans un article récent de P.S. Hasper (2006). Ces paradoxes sont aussi bien décrits par N. Huggett (2010) et par B. Dowden (2017). Le présent article se concentre uniquement sur les paradoxes du mouvement.

⁵ Ceci est vrai sans même prendre en compte l’intense littérature au sujet de problèmes dérivés à partir des paradoxes de Zénon (comme par exemple, le problème des ‘supertasks’, voir [section IV.1](#)).

résolu (par exemple, la ‘solution mathématique standard’ mène au problème des ‘superstaks’, voir [section IV.1](#)) ; une autre possibilité étant que la solution proposée ne fait tout simplement pas consensus (comme la solution d’Aristote par exemple).

Le but de cet article est de démontrer que le raisonnement de Zénon dépend d’hypothèses non seulement implicites mais surtout fausses. La démonstration se base sur une nouvelle analyse des arguments de Zénon, laquelle consiste à ne plus les voir comme des paradoxes du mouvement mais plutôt comme des *paradoxes de l’immobilité*. Grâce à ce nouveau point de vue, la notion de mouvement n’est plus problématique, et on peut alors montrer que tous les aspects paradoxaux des arguments de Zénon ne reposent uniquement que sur le concept d’immobilité. Cela permet alors de réfuter la philosophie même de Zénon en utilisant ces propres arguments, puisque nous verront qu’ils permettent au final de prouver que l’immobilité n’est qu’une illusion de nos sens.

Dans les quatre premières parties de cet article, les quatre arguments reportés par Aristote sont présentés et commentés dans le but de montrer que la structure logique des paradoxes ne dépend que de l’existence du concept de l’immobilité. La dernière partie tente de montrer que la proposition « l’immobilité n’est qu’une illusion de nos sens » est non seulement bien plus acceptable que la thèse Parménidienne inverse, mais est aussi en parfait accord avec la description moderne des corps matériels : dans le cadre de la théorie atomique contemporaine, aucun objet physique (c.-à-d. composé de molécules et d’atomes) ne devrait être déclaré totalement immobile en raison de l’existence de l’agitation thermique (des atomes et des molécules)⁶.

Il a déjà été plusieurs fois suggéré dans la littérature que les arguments ‘L’Achille’ et ‘La Dichotomie’ auraient été conçu dans le but de réfuter la doctrine d’un espace et d’un temps continus (‘système infiniment divisible’), tandis que les deux autres arguments auraient pour but de réfuter l’idée selon laquelle l’espace et le temps auraient une structure atomique/discrète (‘système atomique’) (Kirk and Raven 1957; Owen 1957; Grünbaum 1967). Ces deux hypothèses différentes à propos de la *nature physique* de l’espace et du temps seront mentionnées sous les termes *cadre continu* et *cadre discret*⁷ dans la suite de cet article. Puisque la physique moderne décrit la matière en termes d’entités discrètes (molécules, atomes et tous ses constituants) qui sont toutefois capables de se mouvoir dans le *cadre continu*,⁸ il pourrait sembler superflu d’analyser des arguments, qui pour être bien compris, préconisent le *cadre discret*. Toutefois, nous verrons que les arguments ‘La Flèche’ et ‘Le Stade’ peuvent être très instructifs en raison des prémisses logiques sur lesquelles ils se basent ; cela pourra aider à une meilleure compréhension des deux autres arguments tout en donnant une vision d’ensemble de la dialectique de Zénon. C’est la raison pour laquelle, dans

⁶ Cette conclusion n’est pas dépendante de la possibilité de changer de référentiel inertiel ni de l’équivalence Galiléenne.

⁷ Dans la totalité de cet article, le mot discret est synonyme de ‘atomique’ et ainsi *ne se réfère nullement* à une quelconque définition mathématique lié à \mathbb{N} , l’ensemble des entiers naturels.

⁸ Même dans le cadre de la physique quantique : les discontinuités quantiques ne concernent que les niveaux d’énergies (et toutes les autres propriétés quantiques, telles que le spin par exemple) des composants de la matière (électron, neutron, proton, quarks...) mais ne s’appliquent ni à l’espace ni au temps (voir par exemple Grünbaum 1967 et Grünbaum 1970). Une des pierres de voute de la théorie quantique est par exemple l’équation de Schrödinger : c’est une équation aux dérivées partielles dans laquelle les coordonnées d’espace et de temps sont des variables, et une telle équation nécessite le *cadre continu* pour être correctement définie.

cet article, l'ordre de présentation des quatre arguments contre le mouvement n'est pas le même que celui choisi par Aristote.

Le but des quatre prochaines parties est plus méthodique qu'historique : nous démarrons bien l'analyse des arguments à partir des citations originales d'Aristote, mais c'est dans le but d'examiner les problèmes uniquement logiques afin d'en extraire la structure dialectique de l'argumentation de Zénon (*Les traductions en français du texte original sont en italiques dans les sections suivantes*).

I Le Stade⁹

Quant au quatrième, il s'applique à des masses égales qu'on suppose se mouvoir également, par exemple, dans le stade, mais, en sens contraire, les unes partant de l'extrémité du stade et les autres du milieu; et l'on prétend démontrer que le temps, qui n'est que la moitié, est l'égal du temps qui est le double. Le sophisme consiste en ceci, qu'on suppose que la grandeur égale, animée de la même vitesse, se meut dans le même temps, soit relativement à la masse qui est en mouvement, soit relativement à la masse qui est en repos; et c'est là qu'est l'erreur.

[Aristote, *La Physique* (fragments VI:9 239b33 à 240a8); Traduit par Barthélémy Saint-Hilaire (1862) : Tome 2, Livre VI: Chapitre XIV, §9 et 10]

(Cet extrait est suivi par l'explication d'Aristote de ces quelques phrases dans les fragments 240a8 à 240a19, voir [annexe 1](#), p. 29 pour une reconstruction de cette explication)

Cet argument contre le mouvement est probablement le plus difficile à comprendre directement à partir du texte d'Aristote, et il est alors le moins connu et le moins commenté parmi tous les arguments de Zénon. Dans sa tentative de résolution du paradoxe, Aristote affirme (voir la phrase en gras) que la vitesse $V_{B/A}$, celle d'un corps B par rapport à un corps A au repos, ne peut être la même que la vitesse $V_{B/C}$ de B par rapport à un autre corps C, lequel est aussi en mouvement à la vitesse $V_{C/A}$ par rapport à A. En réalité, cela est trivial dans le *cadre continu* puisque la notion de vitesse relative existe et que nous avons la relation $V_{B/A} = V_{B/C} + V_{C/A}$, qui exprime simplement la transitivité de la relativité Galiléenne ; ainsi, si $V_{C/A} \neq 0$, alors $V_{B/A} \neq V_{B/C}$ et le raisonnement d'Aristote est bien valide. Cependant, on peut prouver que la notion de vitesse relative n'est pas compatible avec le *cadre discret*. Par conséquent, dans le *cadre discret*, l'argument mène à la conclusion que, si A est au repos, alors $V_{B/C} = 0$ et $V_{B/A} = V_{C/A}$ = une 'unité de vitesse' (une explication complète de comment on arrive à ce résultat est fournie dans l'[annexe 1](#), p. 29). En d'autres termes, dans le *cadre discret*, un référentiel absolu doit exister (celui de A), et seulement une seule valeur de vitesse est possible pour tous corps en mouvement par rapport à ce référentiel absolu.¹⁰ Ceci est bien sûr en contradiction avec notre expérience ordinaire du mouvement. Ainsi, dans le *cadre*

⁹ Parfois aussi appelé l'argument des 'rangées en mouvement' (voir par exemple Kirk et Raven 1957 ou Dowden 2017).

¹⁰ D'après E. W. Beth (1946), une telle conclusion, qui n'est pas mentionnée par Aristote, serait incluse dans des travaux de Diodorus Cronus (IV^{ème}-III^{ème} siècle av. J.-C.), dont une partie a été divulguée par Sextus Empiricus (160 – 210 ap. J.-C.). La même conclusion est directement attribuée à Sextus par M. J. White (1982).

discret, l'argument 'Le Stade' mène vraiment à une situation paradoxale, même s'il ne nie pas directement l'existence du mouvement.

Il est important de noter que, comme cet argument 'Le Stade' ne repose que sur l'unique hypothèse fondamentale d'un espace et d'un temps ayant une structure atomique/discrète,¹¹ la seule façon de contourner le paradoxe est la solution d'Aristote (*La Physique* VI:9 240a18) : rejeter une telle hypothèse et plutôt choisir l'hypothèse inverse, qui est que l'espace et le temps sont infiniment divisibles (*cadre continu*).

II La Flèche

(Fragment I) *Mais Zénon fait un faux raisonnement : « (a) Si toute chose, dit-il, doit toujours être soit en mouvement [...] soit en repos quand elle est dans un espace égal à elle-même, et (b) si tout corps qui se déplace est toujours pendant chaque instant dans un espace égal, (c) il s'ensuit que la flèche qui vole est immobile. » (d) Mais c'est là une erreur, attendu que le temps n'est pas un composé d'instants, c'est-à-dire d'indivisibles, pas plus que nulle autre grandeur.*

(Fragment II) *Le troisième, dont nous venons de parler à l'instant, c'est que la flèche qui vole dans les airs reste en place; et de ce principe on tire cette conclusion que le temps est, selon Zénon, composé d'instants. Mais, en repoussant ce principe, que l'on ne concède point, il n'y a plus d'argument.*

[Aristote, *La Physique* (fragments VI:9, 239b5 et 239b30); Traduit par Barthélémy Saint-Hilaire (1862) : Tome 2, Livre VI: Chapitre XIV, §1 et §8]. (La numérotation (a), (b), (c) et (d) a été ajoutée pour aider aux commentaires)

Note sur la différence entre les traductions anglaise et française de la phrase (a) :

Dans la version anglaise, la phrase (a) est traduite par « *if everything when it occupies an equal space is at rest* » (Traduction par R. P. Hardie et R. K. Gaye (1930)), donc la notion de mouvement est absente de cette portion de l'argument. A l'inverse, la traduction en français par Barthélémy Saint-Hilaire (1862) est très exactement la suivante « *Si toute chose, dit-il, doit toujours être soit en mouvement soit en repos, quand elle est dans un espace égal à elle-même* » ce qui ne veut pas vraiment dire la même chose que la traduction en anglais ! Comme la suite de l'analyse de l'argument est basée sur la traduction anglaise, dans la citation au-dessus de cet encadré, la virgule a été avancée de trois mots afin que le sens de cette traduction française se rapproche du sens de la version anglaise. Par ailleurs c'est aussi le sens le plus communément admis dans la plupart des reformulations de cet argument en langue française... même si nous verrons que notre propre analyse de cet argument rejoint au final parfaitement le sens de la traduction de Barthélémy Saint-Hilaire. On pourrait alors presque se demander si la plupart des commentaires à propos de cet argument ne se baseraient que sur une traduction erronée du texte original d'Aristote.

[Cet encadré ne fait bien sûr pas partie de l'article original en anglais]

Les philologues ne sont pas tous d'accord sur l'interprétation du texte original d'Aristote : est-ce que le terme Grec 'toi nun' (traduit ci-dessus par 'instant') se réfère à une 'durée atomique' ou à un 'point temporel' dans le contexte de cet argument ?¹² (Vlastos 1966; Faris 1996). Par voie de conséquence, certains auteurs expliquent l'argument de 'La Flèche' dans le

¹¹ Il est possible d'arriver à la même conclusion directement à partir de l'hypothèse de discrétisation de l'espace et du temps (voir, par exemple, le chapitre 5 de la monographie de J.A. Faris (1996)).

¹² En évoquant des 'instants indivisibles', la traduction française citée ici semble déjà prendre parti pour le premier cas de figure. Cela n'est pas le cas pour la traduction anglaise (cf. l'article original en anglais).

cadre discret (voir par exemple, Kirk et Raven 1957; Owen 1957; Salmon 1970; Russell 1970; Faris 1996; Huggett 2010), tandis que beaucoup d'autres le commentent dans le *cadre continu* (voir par exemple, Bergson 1907;¹³ James 1911; Vlastos 1966; Lear 1981; White 1982; Faris 1996; Harrison 1996; Smith 2003; Reeder 2015). Même si l'on peut se douter que l'interprétation de l'argument de 'La Flèche' peut grandement dépendre de ce choix du cadre spatial et temporel, nous verrons ci-dessous que les deux interprétations se basent en fait sur une hypothèse fallacieuse identique.

II.1 L'argument de 'La Flèche' dans le *cadre discret* :¹⁴

Dans un tel cadre, l'argument principal (exprimé par les phrases en gras) peut être facilement interprété de la manière suivante :

(a) → **(a_d)** Quand un corps occupe un nombre défini et invariable d'éléments d'espace, il est au repos.

(b) → **(b_d)** Durant une durée indivisible, un corps en mouvement occupe un nombre défini et invariable d'éléments d'espace.

(c) → **(c_{d1})** Ainsi, durant toute durée indivisible, un corps en mouvement est au repos.

(c_{d2}) Parce que la durée totale de tout mouvement est toujours composée de durées indivisibles,

(c_{d3}) un corps en mouvement est au repos durant la totalité de la durée de son mouvement. (C'est une conclusion évidemment paradoxale).

La phrase (d) et la partie (II) peuvent être interprétées de la manière suivante : les propositions (a_d) et (b_d) sont fausses parce que l'espace et le temps sont continus – rejet du *cadre discret* – et donc la proposition (c_{d3}) ne peut pas être une conclusion valide. Mais, d'après ce que suggère Aristote dans la partie (II), cette proposition (c_{d3}) pourrait être valide dans le *cadre discret*. Est-ce réellement le cas ?

La proposition (c_{d1}), qui concerne ce qui se passe durant une durée indivisible, est déduite à partir de la prémisse (b_d), qui concerne aussi ce qui se passe durant une durée indivisible, et à partir de la prémisse (a_d), dans laquelle aucune référence temporelle n'est donnée. Mais, en réalité, deux autres prémisses (a_{d+}) et (b_{d+}) sont logiquement nécessaires afin de pouvoir en déduire la proposition (c_{d1}):

(a_{d+}) La prémisse (a_d) est aussi vraie durant une durée indivisible.

(b_{d+}) Le nombre d'éléments d'espace occupés par un corps est le même quel que soit son état cinématique (en mouvement ou au repos).¹⁵

¹³ Mais curieusement, la 'vision cinématographique du mouvement' décrite par Bergson (dans le *cadre continu*) est fréquemment utilisée par d'autres auteurs pour décrire le mouvement de la 'flèche en vol' dans le *cadre discret* (voir aussi la [note de bas de page n°17](#)).

¹⁴ D'après Kirk et Raven (1957), le choix du *cadre discret* permet d'obtenir une vision globale bien cohérente des quatre arguments : dans chaque cadre spatio-temporel, il existe un argument qui mène à un paradoxe pour le cas du mouvement d'un unique corps ('La Dichotomie' dans le *cadre continu* et 'La Flèche' dans le *cadre discret*), et il existe un autre argument qui mène aussi à un paradoxe lorsque l'on considère le cas du mouvement relatif entre deux corps ('L'Achille' dans le *cadre continu* et 'Le Stade' dans le *cadre discret*). Ainsi, si dans chacun des cadres spatio-temporels le concept de mouvement n'est pas cohérent, le mouvement semble bien être impossible.

Cependant, si on combine la proposition (a_d) avec (a_{d+}) et la proposition (b_d) avec (b_{d+}), nous obtenons logiquement une ‘proposition d’indiscernabilité’ : durant une durée indivisible, à la fois un corps en mouvement et un corps au repos occupent un nombre défini et invariable d’éléments d’espace. Ainsi, pour quelle raison devrions-nous conclure que ‘la flèche en vol est immobile’ (et donc que le mouvement est impossible) plutôt que ‘une flèche au repos est déjà aussi en mouvement’ (et donc que l’immobilité est illusoire)? La réponse à cette question est simplement que, parce qu’il n’y a pas de changement de position spatiale durant toute durée indivisible, nous avons tous la forte tendance à facilement accepter la prémisse implicite (i_p), plutôt que son opposée :

(i_p) La catégorie primordiale de l’être est ‘être dans un état de repos’ et non pas ‘être dans un état de mouvement’¹⁶.

Toutefois, un tel raisonnement impliquant la prémisse (i_p) se base sur les définitions du mouvement et de l’immobilité construites dans le *cadre continu*, et en oublie les définitions valides pour le *cadre discret*. En effet, alors que définir l’immobilité durant une quelconque durée comme ‘l’absence de changement de position spatiale durant cette même durée’ est suffisant pour le *cadre continu*, la définition convenable pour le *cadre discret* nécessite une spécification temporelle supplémentaire : la durée de la période d’immobilité se doit d’être strictement supérieure à une durée indivisible. La raison de cette petite contrainte temporelle est la suivante : comme rappelé par Aristote, « *Nous disons encore qu’il y a repos, quand la chose reste actuellement tout ce qu’elle était auparavant ; et notre jugement ne peut pas alors porter sur un seul terme ; il faut qu’il porte sur deux termes tout au moins* » (*La Physique* VI:8, 239a15) ; les ‘termes’ évoqués ici sont soit les ‘points temporels’ dans le *cadre continu* soit les ‘durées indivisibles’ du *cadre discret*. Par voie de conséquence, l’expression ‘être au repos’ ne peut pas s’appliquer durant une unique durée indivisible,¹⁷ et donc la prémisse cachée (a_{d+}) est tout simplement fautive. La prémisse (a_d) devrait être corrigée de la manière suivante :

(a'_d) Quand un corps occupe un nombre défini et invariable d’éléments d’espace *durant au moins deux durées indivisibles consécutives*, il est au repos (durant le nombre correspondant de durées indivisibles).

¹⁵ La prémisse (b_{d+}) pourrait sembler évidente mais, historiquement, l’hypothèse d’une réelle contraction des longueurs des corps en mouvement fut proposée par George Francis FitzGerald en 1889, et théorisée par Hendrik Antoon Lorentz en 1892, pour rendre compte des fameux résultats négatifs de l’expérience de Michelson et Morley (1887). Cette hypothèse ne survécut pas longtemps car elle fut assez vite oubliée dès qu’Albert Einstein proposa sa vision particulière des mouvements relatifs (voir l’histoire et le contexte de la naissance de la théorie de la relativité restreinte pour plus de détails).

¹⁶ Ces deux expressions sont celles de F. A. Shamsi (1973).

¹⁷ En réalité, l’expression ‘durant une durée indivisible’ n’est pas des plus adéquates puisqu’elle peut laisser entendre qu’un quelconque changement pourrait survenir durant cette durée. Mais, par définition du *cadre discret*, aucun changement ne peut survenir durant une durée indivisible. Une expression plus adéquate serait simplement ‘à une durée indivisible’ (comme on dit ‘à un instant donné’), mais une telle expression n’a volontairement pas été utilisée précédemment dans le but de retenir le lecteur dans le ‘classique’ raisonnement fallacieux. Il est à noter que décrire le mouvement comme ‘une succession d’état de repos’ ou citer la célèbre phrase de Bergson « le mouvement coïncide avec l’immobile » (‘vision cinématographique du mouvement’, voir aussi la [note de bas de page n°13](#)) dans le *cadre discret* est, de manière sûre mais aussi de manière erronée, partir du principe que l’expression ‘être au repos’ est définie à une durée indivisible.

Mais (a_d) ne peut plus alors être combinée avec les prémisses (b_d) et (b_{d+}) pour mener à la conclusion (c_{d1}). Nous voyons là finalement que la cohérence illusoire de l'argument de 'La Flèche' dans le *cadre discret* repose donc sur une définition du terme 'immobilité' illégalement importée depuis le *cadre continu*.

Cependant, même si l'argument de 'La Flèche' est invalidé, la description du mouvement dans le *cadre discret* reste problématique. Considérons deux durées indivisibles consécutives ; Pour un corps au repos, les éléments indivisibles d'espace occupés sont les mêmes pour ces deux durées indivisibles successives, tandis que les éléments indivisibles d'espace occupés par un corps en mouvement changent. Mais, quand ce changement peut-il s'accomplir alors qu'il n'existe pas de temps 'supplémentaire' entre deux durées indivisibles consécutives ? Ce changement ne peut pas avoir lieu durant une quelconque durée indivisible, et donc, il semble se dérouler en dehors du temps !¹⁸ Ce fait bien étrange, combiné avec le vrai paradoxe 'Le Stade' (voir [partie I](#) précédente), semble assez suspicieux pour fortement motiver un rejet de l'hypothèse d'une structure atomique du temps et de l'espace (rejet du *cadre discret*),¹⁹ comme le fit Aristote.

II.2 L'argument de 'La Flèche' dans le *cadre continu* :

Dans le *cadre continu*, l'argument principal (exprimé par les phrases en gras) est bien plus difficile à interpréter d'une manière cohérente que dans le *cadre discret*, ce qui conduisit à une grande variété de reformulation de cet argument de la part des commentateurs.²⁰ Nous présentons ici une nouvelle reconstruction de l'argument qui tente de rester proche du texte original d'Aristote, et qui est ainsi similaire à celle proposée précédemment pour le *cadre discret*. Cette reconstruction est basée sur les principes de la mécanique classique, et plus particulièrement sur ceux de la 'mécanique des points matériels', pour lesquels les objets du monde réel sont modélisés comme étant des particules ponctuelles massiques (avec l'aide du concept de 'centre de masse')²¹ :

(a) → **(a_c)** Quand un corps est situé à un point déterminé de l'espace, il est au repos.

(b) → **(b_c)** A tout instant (point temporel de durée nulle) de son mouvement, un corps en mouvement est aussi situé à un point déterminé de l'espace.

(c) → **(c_{e1})** Ainsi, à tout instant de son mouvement, un corps en mouvement est au repos.

(c_{e2}) Parce que la durée totale du mouvement est toujours et seulement composée (d'un nombre infini) d'instant, s,

(c_{e3}) un corps en mouvement est au repos durant la totalité de la durée de son mouvement (même conclusion finale paradoxale que dans le *cadre discret*).

¹⁸ Dans un tel contexte, la phrase de Diogenes Laertius attribuée à Zénon « ce qui se meut ne se meut ni dans l'endroit où il est, ni dans un lieu différent de celui où il est » (voir aussi la [note de bas de page n°2](#)) apparaît bien plus compréhensible (en réalisant une correspondance espace/temps).

¹⁹ Ceci amène aussi au rejet de potentielles formes futures de la théorie quantique standard qui incorporeraient une distance minimale ('hodons') et une durée minimale ('chronons') (Grünbaum 1967).

²⁰ Voir, par exemple, les formulations très différentes proposées par James (1911), Lear (1981), Faris (1996), et Harrison (1996).

²¹ Voir [partie V.4](#) pour plus de détails concernant quelques principes de base de la mécanique classique.

La phrase (d) et la partie (II) peuvent être interprétées de la manière suivante : Aristote soutient que la proposition (c_{c3}) n'est pas une conclusion admissible parce que la prémisse (c_{c2}) est supposée être fausse.

En réalité, quel que soit le bien-fondé de la prémisse (c_{c2}),²² la conclusion intermédiaire (c_{c1}) paraît déjà très bizarre car, dans ce cas, comme exprimé par W. James : « le mouvement ne devient rien d'autre qu'une somme d'état de repos, puisque celui-ci ne peut exister en dehors des points [de l'espace] ; et en tout point, rien ne se déplace » (James 1911) [*traduction personnelle*]. Cela est typiquement une façon d'exprimer 'la vision cinématographique du mouvement' chère à Henri Bergson, pour lequel c'est une « proposition absurde que le mouvement [soit] fait d'immobilités ». ²³ En réalité, une telle proposition absurde survient logiquement dès que l'on admet comme vrai la prémisse implicite déjà mentionnée précédemment :

(**p**) La catégorie primordiale de l'être est 'être dans un état de repos' et non pas 'être dans un état de mouvement'.

Si on accepte le fait que 'd'être en un point' devrait être primordialement synonyme 'd'être au repos en ce point',²⁴ on se doit d'accepter la proposition (a_c). Mais parce qu'être en mouvement est aussi une manière d'être au monde qui nécessite une localisation précise dans l'espace, on doit aussi accepter la proposition (b_c). Avec la contrainte que constitue (**p**), (a_c) combinée à (b_c) mène logiquement à (c_{c1}). Mais *sans* cette contrainte, (a_c) combinée à (b_c) mène à une toute autre conclusion (évidente) : un corps est situé à un point déterminé de l'espace quel que soit son état de mouvement. Ainsi, sans la supposée primauté ontologique de 'l'état de repos' sur 'l'état de mouvement' (c.-à-d. rejet de la prémisse (**p**)), la proposition (c_{c1}) est fausse, et ainsi la situation paradoxale disparaît d'elle-même.

²² Au cours de l'histoire des mathématiques, les questionnements sur la validité de la prémisse (c_{c2}) menèrent au 'paradoxe métrique de l'extension', lequel peut être brièvement résumé par la question suivante : Est-ce qu'une ligne (ayant une dimension *non* nulle) peut être seulement constituée de points sans dimension ? En réalité, ce type de questionnement est bien plus lié au 'paradoxe de l'infini divisibilité' (qui est un des nombreux paradoxes de la pluralité) qu'aux paradoxes du mouvement ; le paradoxe métrique de l'extension remet seulement en cause la cohérence du continuum mathématique Cantorien : il n'y a aucune notion de mouvement dans un tel cadre mathématique. Selon A. Grünbaum, le problème est résolu : « L'analyse, à l'aide de la théorie des ensembles, des divers problèmes soulevés ou suggérés par les paradoxes de la pluralité de Zénon m'a permis de donner une explication cohérente de comment un segment de ligne (de dimension non nulle) peut être constitué d'un agrégat de points sans dimension » (Grünbaum 1967). Malheureusement, le temps *n'est pas* un concept mathématique. Ainsi, la solution à ce paradoxe n'aide pas vraiment à définir une nature ontologique pour le concept de temps. Toutefois, cette solution offre la possibilité de décrire de manière cohérente les durées comme étant composées de points temporels ; ce qui est fort pratique pour la description cinématique des corps dans le cadre de la mécanique classique par exemple. De manière similaire, on peut rappeler que lorsqu'on photographie une scène à l'aide d'un appareil numérique, on crée une description de la réalité à l'aide de pixels colorés, mais la réalité en elle-même n'est pas faite de pixels.

²³ Henri Bergson n'était pas vraiment intéressé à expliquer pourquoi c'est absurde. Il utilisa ce paradoxe pour simplement tenter de fortifier ses positions philosophiques préétablies (c.-à-d. soutenant que l'expérience immédiate et l'intuition sont plus importants que le rationalisme et la science pour comprendre la réalité) (Tooley 1988).

²⁴ Une telle synonymie est frappante dans les commentaires de Bergson : « la flèche, qui est du mouvant, coïncidait jamais avec une position, qui est de l'immobilité » ou « Si elle y avait été, c'est qu'elle s'y serait arrêtée » (italique ajouté) (Bergson 1907). Elle est aussi retrouvée dans la reformulation de C. Harrison : « Comment une particule peut être en un point et aussi être en mouvement en ce point ? » (Harrison 1996).

En d'autres termes, le fait qu'un corps puisse être à un point déterminé de l'espace à un instant précis (point temporel) ne nous dit rien sur son état de mouvement, simplement parce que « *tout mouvement et tout repos a lieu dans [une durée non nulle de] temps* » (*La Physique* VI:8, 239a21). Cependant, la cinématique moderne (en tant que branche de la mécanique classique) permet la description du mouvement d'un corps matériel non seulement durant une durée (non nulle) mais également à des instants précis (point temporel sans durée). Pour cela est invoquée la notion de 'vitesse instantanée' (vitesse à un point temporel), qui sert aux physiciens à complètement décrire cinématiquement le mouvement d'un corps. Dans les articles et ouvrages qui traitent de l'argument de 'La Flèche' (dans le *cadre continu*), cette notion de 'vitesse instantanée' est presque systématiquement introduite comme la solution standard au paradoxe. En effet, il s'agit bien d'une solution adéquate puisque ce concept cinématique permet de bien conceptualiser le mouvement à l'échelle du 'point temporel' (c.-à-d. qu'il est possible pour un corps d'être à la fois en un point spatial bien déterminé et d'être en mouvement), mais cela ne constitue pas une réelle résolution logique du paradoxe. En fait, la résolution logique réside dans le fait que d'utiliser la notion de 'vitesse instantanée' (quel que soient ses définitions, mathématique ou physique, exactes)²⁵ revient à implicitement rejeter la prémisse (p). En d'autres mots, la proposition philosophique sous-jacente à la notion de 'vitesse instantanée' est la suivante : l'état de mouvement *par défaut* (sans *a priori* philosophique) d'un corps est 'être en mouvement ou être au repos' (et non plus seulement 'être au repos' comme le voudrait Zénon).

Pour conclure sur l'argument de 'La Flèche' (interprété dans le *cadre continu* ou dans le *cadre discret*), on peut faire remarquer que le raisonnement de Zénon est circulaire : l'aspect paradoxal de l'argument dépend du fait qu'il considère que l'état primordial de l'être est 'être au repos' (= prémisse (p)). Mais une telle prémisse est la conséquence logique d'une proposition plus forte qui stipule que 'être' ne peut signifier que 'être au repos'. Cette proposition est logiquement équivalente à la position de Parménide éjectant le mouvement de la réalité (voir Fig. 1 ci-contre).

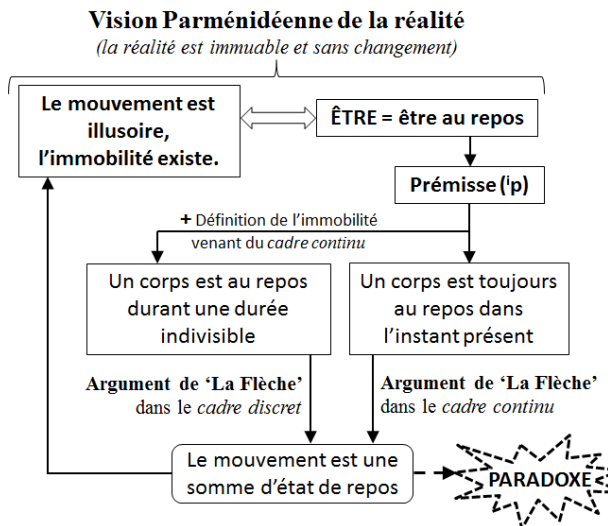


Fig. 1 L'argument de 'La Flèche' et le raisonnement circulaire de Zénon.

²⁵ Les problèmes philosophiques (actuellement en cours de discussion dans la littérature académique) qui apparaissent selon les choix de définition de la 'vitesse instantanée' (voir par exemple Arntzenius 2000, Carroll 2002, Smith 2003, Meyer 2003, Lange 2005) seront le sujet d'un autre court article.

III Le coureur à pieds / L'Achille

Le second sophisme de Zénon est celui qu'on appelle l'Achille. Il consiste à dire que (a) jamais [le coureur] le plus lent, quand il est en marche, ne pourra être atteint par le plus rapide, (b) attendu que le poursuivant doit, de toute nécessité, passer d'abord par le point d'où est parti celui qui fuit sa poursuite, et qu'ainsi le plus lent conservera constamment une certaine avance. (c) Ce raisonnement revient à celui de la division par deux [L'argument de 'La Dichotomie', voir partie suivante]; et, la seule différence, c'est qu'ici l'on ne divise pas continuellement en deux la grandeur surajoutée. (d) On tire bien de cet argument cette conclusion régulière qu'il n'est pas possible que le plus lent soit jamais atteint; mais c'est toujours absolument la même chose que dans la division par deux, [...] la solution est donc des deux côtés nécessairement identique.

[Aristote, *La Physique* (fragments VI:9, 239b15 à 239b25); Traduit par Barthélémy Saint-Hilaire (1862) : Tome 2, Livre VI: Chapitre XIV, §4, §5 et §6]. (La numérotation (a), (b), (c) et (d) a été ajouté pour aider aux commentaires) Ajout de [le coureur] pour être similaire à la traduction anglaise par R. P. Hardie et R. K. Gaye (1930).

Cet argument (les phrases (a) et (b) en gras) est appelé 'L'Achille' en raison du fait que le célèbre (et supposé très rapide) guerrier de la mythologie grecque est pris comme exemple de coureur. La course en question doit commencer dans la configuration dans laquelle le coureur le plus lent possède une certaine avance sur le plus rapide. Il est aussi très fréquemment nommé 'Achille et la tortue', même si la 'tortue' est une variante provenant de commentateurs ultérieurs.

L'argument suggère que la course ne finira jamais puisque, même si la distance qui sépare les deux compétiteurs devient de plus en plus petite, elle n'est jamais égale à zéro (voir Fig. 2 ci-contre).

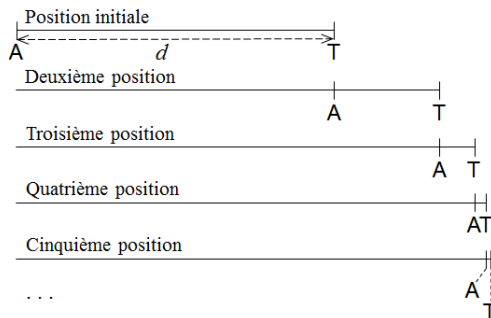


Fig. 2 L'argument de 'Achille et la Tortue'.

d = distance initiale entre les deux coureurs ; Exemple dans lequel Achille A est trois fois plus rapide que la 'tortue' T ($r=3$).

En effet, si r est le rapport de la vitesse (par rapport au sol) d'Achille (V) par celle de la 'tortue' (v) (donc $r = V/v > 1$), et si d est la distance initiale entre les deux compétiteurs, on peut facilement montrer que la distance séparant les deux personnages à chaque 'étape' (l_n) du raisonnement est exprimée par : $l_n = d/r^n$ (d'où l_n n'est jamais égal à 0). Si on se place du point de vue de la 'tortue', elle est comme immobile et Achille s'approche de plus en plus, jusqu'au moment/distance où il l'a rattrape... ce qui est supposé ne jamais avoir lieu d'après le raisonnement récursif de l'argument.²⁶

²⁶ Mais nous savons à partir de l'observation expérimentale qu'Achille dépasse bien réellement la 'tortue'.

Comme remarqué par Aristote (dans les phrases (c) et (d)), cette situation est identique à celle décrite par la *version progressive* de l'argument de 'La Dichotomie' qui sera présenté par la partie suivante ; ainsi, la même 'solution (mathématique) classique' peut aussi être utilisée ici.²⁷

Mais avant de tenter de résoudre le paradoxe, il pourrait être judicieux de vérifier au préalable la cohérence interne de l'argument : est-ce que l'argument réfute vraiment l'existence du mouvement ? A partir de la phrase (b), il peut être conclu qu'Achille peut atteindre le point de départ initial de la 'tortue'. Mais la distance initiale d n'est pas spécifiée (donc, par exemple, elle n'est pas limitée par une valeur quelconque) et en conséquence Achille est pratiquement capable d'atteindre n'importe quel point de l'espace dès la première 'étape'. Alors, comment Zénon arrive-t-il à conclure à partir d'une telle prémisse qu'Achille ne dépassera jamais la 'tortue' ? Simplement en utilisant un artifice dialectique digne d'un bon illusionniste : son argumentation force notre attention à se concentrer sur une région de l'espace dans laquelle le dépassement n'aura jamais lieu, pour mieux nous faire oublier le lieu d'un tel dépassement.²⁸ En effet, avec la phrase (b), Zénon nous incite fortement à penser de manière répétée à l'endroit où est située la 'tortue' lorsqu'Achille accomplit l'étape suivante (voir Fig. 2) ; et cet endroit est toujours à une certaine (minuscule) distance au-delà de la position d'Achille. Mais le dépassement de la 'tortue' par Achille n'arrivera jamais en un tel endroit : il aura évidemment lieu en un point commun de leur trajectoire (Achille et la 'tortue' se trouvant au même point au même instant). Ainsi, l'argumentation de Zénon détourne notre attention de l'existence d'un tel point de rencontre... dans le but de conclure en la non-existence de ce point (dans la phrase (a)) ! Donc, l'important élément caché de l'argumentation qui crée l'illusion d'un paradoxe est le fait que *la conclusion n'est en réalité pas liée logiquement aux propositions de l'argumentation (puisque la phrase (b) ne nous dit rien à propos du point de rencontre)*.

Il y a encore une sorte de raisonnement circulaire ici : Zénon suppose en premier lieu que le dépassement n'aura pas lieu, nous embrouille ensuite avec un pseudo-argument, et finalement en conclut que le dépassement n'aura pas lieu. Comme Aristote l'avait déjà

²⁷ Cependant, il existe une solution physique qui est spécifique à l'argument de 'L'Achille' : un coureur parcourt toujours une distance finie en effectuant un nombre fini de pas ; cela ayant déjà été mentionné par H. Bergson (1969), J.O. Wisdom (1970) et M. Kline (1980). En décrivant la course en termes de pas (ou plus précisément de bonds pour Achille et de minuscules pas pour la 'tortue'), il est facile d'identifier le dernier pas au cours duquel Achille dépasse la 'tortue' : quand la distance séparant les deux compétiteurs devient plus petite que la longueur d'un bond d'Achille cumulée à celle d'un pas de la 'tortue', Achille dépassera la 'tortue' à son bond suivant. Pour éviter une solution si évidente au 'paradoxe des coureurs', il aurait été plus judicieux de prendre comme exemple le cas d'une course à la voile : imaginons deux voiliers poussés par un vent stable sur une mer calme. Un des voiliers a une voile cinq fois plus grande que l'autre qui se situe 1 km devant. On peut alors exprimer le 'paradoxe des voiliers' en remplaçant le mot 'coureur' par le mot 'voilier' dans la phrase originale d'Aristote. Dans ce nouveau cadre illustratif, l'argument met en jeu un mouvement plus continu (que dans le cas d'un coureur) qui est bien plus en conformité avec le *cadre continu* nécessaire pour créer le paradoxe.

²⁸ Bien sûr, l'élément bien sournois réside dans le fait que cette région de l'espace est définie et limitée par le lieu où le dépassement arrive vraiment (de la même manière que l'ensemble ouvert $[0,1)$ est défini à l'aide du nombre 1 mais que ce nombre 1 n'est pas un élément de l'ensemble). C'est la raison qui fait dire à Peijnenburg et Atkinson (2008) que « tous les problèmes que nous avons avec l'argument 'L'Achille' résident dans le concept d'ensemble ouvert $[a,b)$ » [*traduction personnelle*].

remarqué,²⁹ il est facile de sortir de cette circularité en posant la question suivante : ‘quelle distance a parcourue la ‘tortue’ lorsqu’Achille la rattrape ?’ Après résolution de l’équation $d+v.t = V.t$, nous trouvons que cette distance est $v.t = d/(r-1)$. Par exemple, si Achille est trois fois plus rapide que la ‘tortue’ ($r=3$), la ‘tortue’ a parcouru la distance $d/2$ à la fin de la course (et Achille a parcouru la distance $3d/2$). Le fait qu’Achille ait virtuellement besoin de traverser une infinité de points avant d’atteindre la ‘tortue’ (ce qui est simplement une conséquence logique de tout mouvement considéré dans le *cadre continu*) n’entrave en rien l’existence d’un point de rencontre.³⁰ Apparemment, il semblerait que Zénon fut un assez bon illusionniste pour arriver à le faire disparaître.

IV La Dichotomie³¹

D’abord, il prétend prouver que le mouvement n’existe pas, attendu que le mobile passe par la moitié avant d’arriver à la fin.

[Aristote, *La Physique* (fragment VI:9, 239b11); Traduit par Barthélémy Saint-Hilaire (1862) : Tome 2, Livre VI: Chapitre XIV, §3]

L’argument de ‘La Dichotomie’ est nommé ainsi parce qu’il implique une suite infinie de moitiés (ou de points à mi-chemin) qui peuvent être identifiées sur n’importe quelle ligne (ou distance) en accomplissant des divisions répétées par deux. Cela est possible car nous nous plaçons naturellement dans un *cadre continu* pour interpréter l’argument, c’est-à-dire dans le cadre d’un système spatio-temporel infiniment divisible. Cependant, l’interprétation non univoque du texte original d’Aristote rend possible l’existence de deux versions de ce paradoxe (voir [Fig. 3](#) ci-dessous) :

- *Interprétation progressive* : pour atteindre un but situé à une certaine distance, on doit d’abord traverser la première moitié de cette distance, et ensuite la moitié de la distance restante, puis encore la moitié de ce qui reste, et ainsi de suite. De cette manière, même si on se rapproche de plus en plus du but, il existe toujours une distance restante : cette distance est exprimée par la formule : $l_n = 1/2^n$ (où l_n n’est jamais égal à 0).³² Par conséquent, le mouvement semble impossible du fait que la destination finale ne peut jamais être atteinte.
- *Interprétation régressive* : avant de parcourir la seconde moitié du trajet, on doit traverser la première moitié. Mais avant de faire cela, le parcours du premier quart doit être terminé. Mais avant que cela soit possible, il faut traverser le premier huitième, et ainsi de suite à l’infini. Ainsi, le mouvement serait impossible parce qu’il ne serait pas possible de le démarrer.

²⁹ Il a écrit « Sans doute tant qu’il est en avance, il [le coureur le plus lent] n’est pas rejoint; mais, en définitive, cependant il est rejoint, puisque Zénon doit accorder que la ligne finie est parcourue » (*La Physique* VI:9, 239b28).

³⁰ Puisque, répétons le ici, il n’y a pas de lien logique entre la proposition ‘l’espace et le temps sont continus’ et les propositions ‘Achille peut/ne peut pas rattraper la tortue’. Elles sont logiquement indépendantes.

³¹ Dans l’ouvrage de G. S. Kirk et J. E. Raven (1957) et dans l’article de M.J. White (1982), cet argument est appelé ‘Le Stade’ (‘The Stadium’) !

³² C’est bien sûr la même équation que celle de ‘L’Achille’ présentée dans la partie précédente, mais avec $d=1$ et $r=2$.

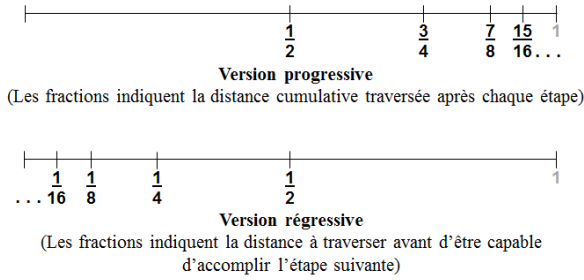


Fig. 3 Les deux versions de l'argument de 'La Dichotomie'

IV.1 Les limites de l'interprétation progressive de 'La Dichotomie':

Auparavant, l'interprétation régressive de l'argument était préférée (Caveing 1982; Hasper 2006; Blay 2010) ; mais depuis le XIX^{ème} siècle, au cours duquel fut proposée la 'solution mathématique standard' basée sur la convergence de séries entières (voir ci-dessous), l'interprétation progressive devint de plus en plus populaire. Par voie de conséquence, la plupart des écrits de mathématiciens contemporains qui évoquent cet argument de Zénon affirment que le problème est résolu depuis le XIX^{ème} siècle grâce à la construction de la théorie des séries infinies.³³ En effet, l'interprétation progressive de 'La Dichotomie' semble facilement résoluble puisque la distance cumulative parcourue après chaque étape peut être directement exprimée par la somme partielle d'une série entière : $D_n = \sum_{x=1}^n 1/2^x$. D'après la théorie des séries infinies, toute série entière de la forme $\sum_{x=1}^n 1/q^x$ avec $q > 1$ sont convergente et donc leur somme (infinie) existe. La formule de cette somme pour de telles séries géométriques est $\sum_{x=1}^{\infty} q^x = q/(1 - q)$. Dans le cas de 'La Dichotomie', cela signifie que $\sum_{x=1}^{\infty} 1/2^x = 1$. Ce résultat mathématique est généralement considéré comme une solution au paradoxe.

Cependant, une telle formule ne consiste pas en une résolution logique du paradoxe puisqu'il s'agit seulement d'une reformulation mathématique du problème initial : la somme d'une série infinie est par définition la limite de sa somme partielle : $\sum_{x=1}^{\infty} 1/2^x = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{x=1}^n (1/2)^x$. Il peut alors être utile de rappeler la définition mathématique d'une limite : L est la limite d'une séquence D_n si, pour tout nombre réel $\epsilon > 0$, il existe un nombre naturel N tel que, pour tout $n > N$, nous avons $|D_n - L| < \epsilon$. En d'autres mots, la limite d'une séquence est la valeur pour laquelle les termes de la séquence « tendent vers » mais sans jamais l'atteindre : la différence entre les termes de la série et sa limite peut ainsi être aussi petite qu'on le souhaite (il suffit de choisir une valeur suffisamment grande de n)... mais elle n'est jamais nulle (car $\epsilon \neq 0$) ! Cette situation est exactement le problème décrit par Zénon dans l'interprétation progressive de 'La Dichotomie' (et dans l'argument 'l'Achille'). Ainsi, la reformulation mathématique ne résout pas le paradoxe.³⁴

³³ Cependant, pour donner un contre-exemple d'un mathématicien de l'époque actuelle qui est conscient de la limite du calcul pour résoudre le paradoxe, nous pouvons citer Joseph Mazur (2007) : « Si on reste en surface du problème, les mathématiques en question—algèbre basique— peuvent sembler pertinentes pour l'aborder, mais je vais montrer qu'elles ne répondent en rien au réel problème physico-logique qui émerge du paradoxe. » [traduction personnelle]

³⁴ On peut toutefois noter que le fait que la série infinie utilisée par Zénon converge nous informe que la durée nécessaire pour parcourir une distance finie est aussi finie, mais une telle information nous était déjà disponible à partir de notre expérience usuelle du mouvement.

En réalité, l'*interprétation progressive* de 'La Dichotomie' ne suggère pas qu'un quelconque mouvement nécessiterait un temps infini pour être accompli, mais plutôt qu'il faudrait effectuer un nombre infini d'étapes avant de pouvoir terminer tout mouvement. Ainsi, le problème philosophique suivant se pose : Est-il possible d'accomplir un nombre infini de tâches durant une durée finie ? Ce problème est connu sous la dénomination du problème des 'supertask' (terme en anglais non traduit), un terme inventé par James Thomson (1954). Une 'supertask' est définie comme un nombre infini d'opérations quantifiables qui se produisent de manière séquentielle au cours d'un intervalle de temps fini. La durée nécessaire pour accomplir une opération est constamment décroissante (usuellement, la durée de l'opération $(n+1)$ est la moitié de la durée de la $n^{\text{ième}}$ opération). De cette manière, la durée totale de la 'supertask' peut être exprimée par une série infinie. Evidemment, la théorie mathématique des séries infinies convergentes assure que cette durée totale a effectivement une valeur finie, mais n'est pas suffisante en soi pour assurer la possibilité de terminer la 'supertask' ; la raison principale à cela étant qu'il n'existe pas d'opération qui puisse être identifiée comme étant la dernière (c'est-à-dire celle par laquelle la tâche se termine). La question est alors la suivante : les 'supertask' sont-elles (logiquement) possibles ? Une telle question³⁵ sort du cadre de ce présent article, principalement en raison du fait que le mouvement, n'étant « qu'une seule tâche effectuée dans le monde physique » (Romero 2014) [*traduction personnelle*], ne peut pas vraiment être considéré comme une 'supertask' (contrairement à la suggestion de Zénon).³⁶

En outre, en raison de son équivalence logique avec l'argument de 'L'Achille', la cohérence interne de l'argument de 'La Dichotomie' dans son *interprétation progressive* peut évidemment être remise en question : l'existence du mouvement est à la fois acceptée (pour atteindre certains points spécifiques du parcours) mais en même temps démentie (juste parce que le point final ne pourrait être atteint). Cela fait se demander à Maurice Caveing (1982) : si un corps en mouvement peut parcourir la première moitié d'une distance, qu'est-ce qui l'empêche de parcourir la seconde moitié ? Ainsi, il démontre simplement que pour obtenir une situation vraiment paradoxale, « la progression implique la régression ». En effet, l'*interprétation régressive* de l'argument de 'La Dichotomie' apparaît bien plus convaincante que l'*interprétation progressive*, et c'est elle qui mène à un vrai problème philosophique.

³⁵ Il faut noter qu'il n'y a pas encore de consensus dans la communauté philosophique sur cette question, et le problème philosophique des 'superstask' est fortement débattu dans la littérature académique. Par exemple, quatre des onze articles compilés par W.C. Salmon (1970) au sujet des paradoxes de Zénon sont dédiés à ce problème ("Tasks, Super-Tasks, and the Modern Eleatics" par P. Benacerraf; "Tasks and Super-Tasks" et "Comments on Professor Benacerraf's Paper" par J. Thomson, et "Modern Science and Zeno's Paradoxes" par A. Grünbaum). De plus, de nouveaux articles ou ouvrages dédiés à ce problème sont régulièrement publiés : quelques exemples sont Laraudogoitia 1996, Atkinson 2007, Peijnenburg and Atkinson 2008, Lee 2011, Romero 2014. Un court article en préparation fera le point sur ce sujet.

³⁶ Cette proposition (c.-à-d. le mouvement n'est pas une 'superstask') aurait été très probablement soutenue par Aristote et H. Bergson, puisque ces deux auteurs affirment (chacun dans leur propre style) que même si le mouvement peut potentiellement (par la pensée) être décomposé en une infinité de parties, il n'est pas en réalité composé de parties.

IV.2 Le problème philosophique de l'interprétation régressive de 'La Dichotomie':

Considérons la proposition (q) : un corps est en mouvement en ligne droite entre un point A et un point B séparés par une distance non-nulle. L'*interprétation régressive* de l'argument stipule la série de propositions (p_i) suivante : (p_1) avant que la seconde moitié de la distance AB puisse être parcourue, il faut au préalable parcourir la première moitié ; (p_2) mais avant de faire cela, le premier quart doit avoir été parcouru ; (p_3) avant de faire cela, il faut parcourir d'abord le premier huitième, et ensuite $p_4, p_5, p_6...$ et on pourrait s'amuser à enchaîner les propositions jusqu'à l'infini... mais que pouvons-nous conclure à partir cette série de propositions (p_i) ? En réalité rien, puisque cette régression infinie ne nous dit absolument rien sur ce qui se passe au point A. La conclusion classique (CC) est que 'le mouvement est impossible parce qu'il ne peut pas commencer' ; mais une telle conclusion n'est en réalité pas logiquement liée ni à la proposition initiale (q) ni à la série de propositions (p_i).³⁷ La conclusion CC se base uniquement sur l'hypothèse fondamentale (h) qui est que '*le corps est au repos en A*', ce qui n'est nullement inclus dans la proposition (q). Si le corps est déjà en mouvement en A, alors l'argument de 'La Dichotomie' est bien incapable d'entraver son mouvement. Ainsi, c'est seulement dans le cas où l'on accepte l'hypothèse (h) que l'argument nous amène à une incapacité à détecter le tout début du mouvement.

En fait, si l'on tient compte du contexte général qu'offrent les 'paradoxes de la pluralité' (voir [note de bas de page n°4](#)), A. Papa-Grimaldi (1996) affirme que « le problème qui motivait Zénon pour formuler ses paradoxes est l'impossibilité de conceptualiser le passage de l'un au multiple » [*traduction personnelle*]. Dans le contexte de cet article, l'argument de 'La Dichotomie' à l'encontre du mouvement mets en lumière le problème philosophique (PP) suivant : *Comment conceptualiser le passage de l'immobilité au mouvement (ou vice versa)* ?³⁸ Ainsi, finalement, l'*interprétation régressive* de 'La Dichotomie' ne fait rien d'autre que d'attirer l'attention sur les difficultés insurmontables dans les tentatives de conceptualisation du passage de l'immobilité au mouvement, lesquelles proviennent essentiellement de leur 'définition exclusive' respective ; chacun des termes est simplement défini comme la négation de l'autre terme, et en conséquence être 'à moitié en mouvement' ou 'à moitié au repos' ne fait aucun sens : « Les expressions floues sont prédominantes dans le langage courant. Presque toutes les expressions du langage courant, qui n'ont pas de sens mathématique, sont floues. [...] [Mais] on peut montrer que les mots tels que 'mouvement', 'état de repos', 'être', 'non-être' sont des termes précis (non-flous) du langage courant » (Łukowski 2011) [*traduction personnelle*].

³⁷ Il s'agit de la même erreur logique que celle déjà détectée dans l'argument 'L'Achille' (voir [section III](#)), et cela fut aussi déjà décelée par P. Benacerraf (1970).

³⁸ Comme les penseurs européens du XVIII^{ème} siècle étaient bien conscients d'un tel aspect philosophique dans les paradoxes de Zénon, l'*interprétation régressive* de l'argument était bien plus populaire que l'*interprétation progressive* à cette époque (Blay 2010). Mais le problème est toujours considéré comme pertinent de nos jours : voir, par exemple, Medlin 1963, Hamblin 1969, Priest 1985, Mortensen 1985, Jackson and Pargetter 1988, Smith 1990, ou le livre récent par Łukowski qui exprime aussi le problème : « Quel que soit l'expérience de pensée, il nous est impossible de bouger de manière imperceptible, à l'aide de 'petites étapes', pour passer de l'état de mouvement à l'état de repos. De plus, il est difficile de savoir comment ces 'petites étapes'— qui nous mènent à des états intermédiaires — devraient être interprétées. Ainsi, à l'inverse de la possibilité de diverses 'nuances' d'être entassé, chauve ou rouge, il n'y a pas de 'nuance' d'être au repos. Soit quelque chose est au repos soit il ne l'est pas » (Łukowski 2011) [*traduction personnelle*].

IV.3 Conclusion logique de l'argument de 'La Dichotomie':³⁹

Après avoir pris conscience de l'existence de l'hypothèse fondamentale (*h*) et du problème philosophique (*PP*), on peut affirmer que la conclusion logique de l'interprétation régressive de 'La Dichotomie' devrait être la proposition (*P1*) suivante : 'Si un corps est actuellement au repos, il ne sera jamais en mouvement dans le futur'. Cela peut aussi être exprimé par la contraposition (*CI*) : 'Si un corps est actuellement en mouvement, il n'a jamais été au repos dans le passé'. De plus, la symétrie du problème philosophique (*PP*) suggère fortement que la proposition (*P2*) 'Si un corps est actuellement en mouvement, il ne s'arrêtera jamais de se mouvoir dans le futur' doit aussi être valide ; ce qui mène à la contraposition (*C2*) : 'Si un corps est actuellement au repos, il n'a jamais été en mouvement dans le passé'. Ainsi, une fois combinées (*P1*) + (*C2*) et (*P2*) + (*CI*), nous pouvons conclure par l'affirmation (*LC*) suivante : *la réalité doit être composée de 'corps dans un état de repos' et d'autres 'corps en mouvement', et aucun des corps ne peut changer d'état.*

A partir de l'argument de 'La Dichotomie', Zénon conclut que le mouvement est impossible, c.-à-d. que les corps doivent toujours être au repos. On peut donc facilement s'apercevoir que Zénon n'arrive qu'à la moitié de la vraie conclusion logique (*LC*). Cela est dû au fait qu'il a encore une fois accepté la prémisse implicite (*ip*) (déjà mentionnée pour 'La Flèche', voir [partie II](#) : *La catégorie primordiale de l'être est 'être dans un état de repos' et non pas 'être dans un état de mouvement'*), et qu'une telle prémisse l'empêche de parvenir aux propositions (*P2*) et (*CI*). Finalement, Zénon s'engage à nouveau dans un raisonnement circulaire (voir [Fig. 4](#) ci-contre).

Une remarque conclusive importante doit être soulignée : seul les deux arguments qui prétendent réfuter de manière stricte le mouvement (c.-à-d. 'La Flèche' à la fois dans le cadre discret et dans le cadre continu, et l'interprétation régressive de 'La Dichotomie') contiennent des prémisses implicites et cachées à propos de l'immobilité (voir le résumé dans le [Tableau 1](#) ci-dessous).

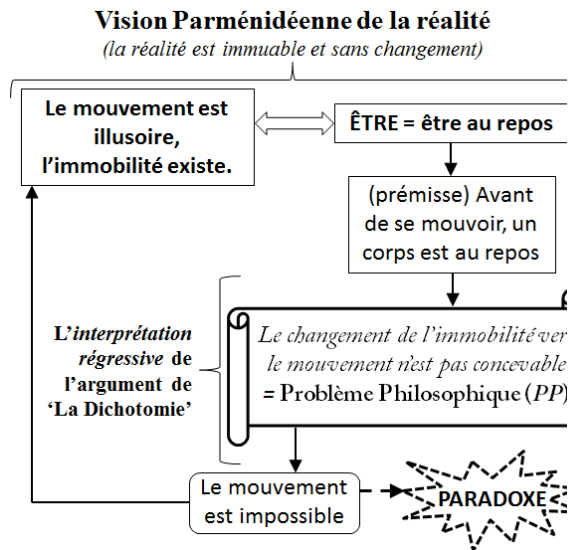


Fig. 4 Le raisonnement circulaire de Zénon (dans le cadre de l'argument de 'La Dichotomie') impliquant des propositions paradoxales et un problème philosophique non-résolu (voir aussi la [Fig. 1](#))

³⁹ Pour chaque proposition ou conclusion (à propos du mouvement ou de l'immobilité) de cette sous-partie, la phrase 'Dans un référentiel donné,...' doit être implicitement ajoutée.

Tableau 1 Résumé de l'analyse des arguments de Zénon considérés comme des *paradoxes de l'immobilité*

<i>Cadre Physique</i>	<i>Cadre discret</i> (Structure atomique pour l'espace et le temps)		<i>Cadre continu</i> (L'espace et le temps sont continus)			
Argument	Le Stade	La Flèche		L'Achille	La Dichotomie – version progressive	La Dichotomie – version régressive
Voir partie	I	II.1	II.2	III	IV.1	IV.2
<i>Prémisse implicite / remarques</i>	aucune	<i>L'immobilité est définie durant une durée indivisible</i>	<i>Être = être essentiellement au repos</i>	aucune / arguments logiquement identiques		<i>Avant de se mouvoir, un corps est au repos</i>
Conclusion logique de l'argument	Une seule vitesse possible	Un corps en mouvement est au repos	Le mouvement est une somme d'état de repos	Le mouvement d'un corps ne peut pas se terminer		Le mouvement d'un corps ne peut pas démarrer
<i>Réfute strictement le mouvement ?</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>
Situation physique observée	Plusieurs vitesses semblent possibles	Le mouvement semble exister		<i>Erreur logique : pas de lien logique entre les propositions initiales et la conclusion finale</i>	<i>Même erreur logique que dans 'L'Achille' (donc 'la progression implique la régression')</i>	Le mouvement peut démarrer
<i>Paradoxal ?*</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>			<i>Oui</i>
Solution (à la situation paradoxale)	Rejet du <i>cadre discret</i>	Utilisation d'une définition adéquate de l'immobilité pour le <i>cadre discret</i>	Utilisation de la notion de 'vitesse instantanée' = Rejet de la prémisse implicite (afin d'éviter un raisonnement circulaire , voir Fig. 1)			Rejet de la prémisse implicite (afin d'éviter un raisonnement circulaire , voir Fig. 4)
Autres problèmes restant	-	Le changement a lieu hors du temps !	-	Question dérivée : problème logique des 'supertask' (voir partie IV.1)		Problème philosophique <i>PP</i> (voir partie IV.2)

*c.-à-d. Est-ce que la conclusion logique de l'argument est en désaccord avec la situation physique observée ? Si oui, c'est considéré comme paradoxal.

V L'immobilité en tant qu'illusion de nos sens

En gros, nous avons vu dans les parties précédentes que :

1. Dans le *cadre discret*, l'argument 'Le Stade' est réellement paradoxal, alors que le paradoxe apparent de 'La Flèche' peut être surmonté ; mais la description du mouvement dans un tel cadre reste problématique. Ainsi, pour évacuer ces difficultés, nous devons nous placer dans le *cadre continu*.
2. Dans le *cadre continu*, deux des arguments de Zénon à l'encontre du mouvement ('L'Achille' et l'*interprétation progressive* de 'La Dichotomie') sont logiquement inconsistants.
3. Les raisonnements impliqués dans l'argument de 'La Flèche' et dans l'*interprétation régressive* de 'La Dichotomie' semblent valides mais forment en réalité un raisonnement circulaire (voir [Fig. 1](#) et [Fig. 4](#)).

Ce que nous manquons de percevoir, puisque nous sommes bien distrait par le 'tour de force' dialectique de Zénon, est le fait qu'il n'envisage jamais de se placer dans les trois autres situations possibles décrites dans le **Tableau 2** : Zénon reste toujours dans la première situation qui lui convient très bien.

Tableau 2 Les quatre combinaisons d'hypothèses possibles à propos du statut physique du mouvement et de l'immobilité.

Possibilité n°	1	2	3	4
Statut physique de l'immobilité	Réel	Réel	Illusoire	Illusoire
Statut physique du mouvement	Illusoire	Réel	Illusoire	Réel
Position philosophique correspondante	Philosophie de Parménide	Philosophie intuitive	Solipsisme	Philosophie de la non-immobilité ontologique
	Être = être au repos	Être = être au repos OU en mouvement	La réalité entière est une illusion	Être = être en mouvement
Conséquences logiques	Raisonnements circulaires (voir Fig. 1 et Fig. 4)	Conclusion LC (voir partie IV.3) et Problème philosophique PP (voir partie IV.2)	Ni sciences ni philosophie des sciences possibles	Immobilité = Mouvement imperceptible (voir partie V.2)
Compatible avec le monde physique ?	NON (Paradoxes de Zénon)	NON	(Non discuté ici)	OUI (Agitation thermique, voir partie V.3)

La seconde possibilité peut être vue comme une position métaphysique 'naturelle' ou 'intuitive' à propos de l'immobilité et du mouvement. Elle a en fait été déjà examinée lorsqu'a été proposée la conclusion logique de l'*interprétation régressive* de 'La Dichotomie' (voir [partie IV.3](#)), et elle mène à la conclusion LC : *la réalité doit être composée de 'corps dans un état de repos' et d'autres 'corps en mouvement', et aucun des corps ne peut changer d'état*. Tout comme les paradoxes de Zénon, cela n'est manifestement pas en accord avec

notre expérience physique du mouvement et du repos. De plus, c'est dans cette situation que le problème philosophique *PP* (*Comment conceptualiser le passage de l'immobilité au mouvement (ou vice versa) ?*)⁴⁰ est le plus saillant.

La troisième possibilité est assez proche de la position philosophique nommée 'Solipsisme épistémologique' : puisque tout corps est soit en mouvement soit au repos, et si à la fois les deux notions de mouvement et de repos sont supposées illusoire, alors la totalité de la réalité ne serait qu'illusion. Ce cas particulier ne sera pas examiné plus en détails dans cet article puisque nous verrons tout de suite que la quatrième possibilité nous permet de rester sans problème dans le cadre d'un 'réalisme philosophique'.

La quatrième possibilité correspond à une position philosophique qui est l'opposé de celle que Zénon et Parménide défendaient, puisqu'elle déclare que seul le mouvement est possible dans le monde réel. L'objectif des prochaines sous-parties sera donc de montrer que considérer l'immobilité comme une illusion est bien plus facile et bien plus cohérent avec la réalité, qu'être favorable à la position Parménidienne inverse. Nous montrerons aussi que le problème philosophique *PP* ne se pose même plus dans une telle situation.

V.1 Un Choix de philosophie

Selon la philosophie de Parménide, la réalité est une, immuable, sans changement, et toute pluralité, changement ou mouvement ne sont que des illusions de nos sens. Toutefois, un contemporain de Parménide, Héraclite d'Ephèse, construit une vision du monde opposée, connue sous les noms 'philosophie du devenir' ou 'philosophie mobiliste'. Une des caractéristiques de cette philosophie qui est particulièrement pertinente pour notre propos peut être trouvée dans un texte de Platon qui cite Héraclite : « Toute entité bouge et rien ne reste immobile » (Platon, *Cratylus 401 section d ligne 5*). A première vue, nous pourrions donc penser qu'Héraclite considère l'immobilité comme illusoire. Nommons cette position philosophique la philosophie pseudo-Héraclitienne (elle correspond bien évidemment à la quatrième possibilité du [Tableau 2](#)). Nous pouvons alors nous demander si ces deux philosophies 'opposées' sont épistémologiquement équivalentes : est-ce que le terme 'illusoire' se réfère à la même notion dans les philosophies Parménidienne et pseudo-Héraclitienne ? La réponse est négative.

Il est facile de concevoir qu'un corps matériel tridimensionnel, perçu comme au repos, puisse en réalité être en mouvement : des exemples d'objets en mouvement qui nous paraissent être au repos peuvent être trouvés dans la vie de tous les jours ; ils peuvent être causés, par exemple, par des effets optico-géométriques et/ou des limitations physiologiques de notre perception (voir [Annexe 2](#) pour plus de détails). Dans tous ces cas ordinaires, l'illusion d'immobilité est facilement explicable d'une manière rationnelle : il y a vraiment du mouvement, mais il est imperceptible. En d'autres termes, comme il existe différentes échelles/ampleurs pour le mouvement, l'illusion d'immobilité peut être facilement conceptuellement construite à partir du concept de mouvement, en invoquant les échelles qui ne peuvent pas être détectées.

D'un autre côté, il n'est pas possible de concevoir différentes ampleurs pour l'immobilité. Ainsi, à un niveau conceptuel, est-ce que l'illusion du mouvement qu'implique la philosophie de Parménide peut être rationnellement construite à partir du concept d'immobilité ? Nous

⁴⁰ Voir [partie IV.2](#).

pensons que non. De plus, sur un plan plus pratique, il nous est très difficile de considérer que le mouvement puisse dissimuler de l'immobilité : il n'y a pas d'exemple de situation ordinaire dans laquelle un corps matériel tridimensionnel, perçu en mouvement par un observateur pendant une durée donnée, puisse finalement se révéler avoir été au repos durant cette même durée (et par rapport au même observateur).⁴¹ Ainsi, dans la philosophie de Parménide, l'illusion capable de dissimuler l'immobilité à l'aide du mouvement était probablement 'magique'. Cela n'est pas en contradiction avec les époques antiques durant lesquelles des entités divines faisaient 'tout naturellement' parties des principes philosophiques de nombreux penseurs.⁴² Ainsi, la philosophie de Parménide ne semble être cohérente seulement que dans un 'monde enchanté', alors que la philosophie pseudo-Héraclitienne reste cohérente dans un monde plus rationnel, un monde 'désenchanté' par la science et la philosophie moderne.

En réalité, la philosophie pseudo-Héraclitienne n'est pas vraiment fidèle à la 'philosophie du devenir' puisque, selon A. Nehamas (2002), les visions d'Héraclite et de Parménide ont bien plus de points communs qu'on ne le pense généralement. En particulier, la philosophie d'Héraclite ne peut pas être simplement réduite à une vision opposée à celle de Parménide : elle ne se concentre pas seulement sur le changement et le mouvement mais elle s'intéresse aussi fortement à ce qui reste stable et à ce qui reste identique dans un monde en perpétuel changement.⁴³ Ce rôle prédominant du concept de stabilité dans la pensée présocratique (et même peut-être dans la pensée occidentale ultérieure) est en faveur de la vision d'Henri Bergson : « Notre intelligence ne se représente clairement que l'immobilité » (Bergson 1907). Toutefois, cette supposition bergsonienne pourrait ne plus tenir si nous considérons la possibilité d'une position philosophique qui rejette totalement la notion classique d'immobilité. Cette notion classique suppose que (exprimée dans les termes de la cinématique moderne), dans un référentiel distinct de celui du corps en question,⁴⁴ la vitesse instantanée d'un corps peut être strictement égale à zéro durant une durée non-nulle ΔT (c.-à-d. $\forall t \in \Delta T, v(t) = 0$, et donc $dv(t)/dt = 0$).

⁴¹ Bien sûr, nous ne considérons pas ici des possibles troubles temporaires dans la perception et/ou le psychisme qui pourraient causer des hallucinations. De plus, en spécifiant bien « corps matériel tridimensionnel », nous excluons ici à la fois le cas de certaines illusions d'optiques, dans lesquelles une image statique semble bouger, et les films 'classiques' et vidéos numériques, dans lesquels des astuces peuvent être utilisées pour induire une illusion de mouvement. Ces deux cas impliquent des images bidimensionnelles qui sont plus de représentations de la réalité que la réalité elle-même.

⁴² Cela est le cas avec Parménide et Héraclite.

⁴³ Voici deux citations qui illustrent cette idée : « Tous les penseurs présocratiques étaient frappés par la prédominance du changement dans notre expérience du monde. Héraclite ne faisait évidemment pas exception, car en effet il a probablement bien plus clairement exprimé l'universalité du changement que tous ses prédécesseurs ; mais pour lui, cela s'accompagnait d'un autre côté de la médaille qui était d'une importance vitale, c.-à-d. de l'idée d'une *unité* inhérente à tout changement, d'une stabilité qui persiste à travers le changement lui-même » (Kirk and Raven 1957) [*traduction personnelle*], et « C'est le fait que quelque chose reste le même seulement en changeant. Une sorte de réalité matérielle durable existe grâce à un constant changement de la part de ces constituants matériels. Ici, constance et changement ne sont pas opposés mais inextricablement connectés » (Graham 2015) [*traduction personnelle*].

⁴⁴ Cette spécification du référentiel (cadre de référence) est importante puisque, dans le contexte de la cinématique moderne, tout mouvement d'un quelconque objet peut être annulé en étudiant le système dans le référentiel liée à cet objet ; ainsi, en utilisant cette procédure *arbitraire*, tout objet est par définition au repos ($v = 0$ et $dv/dt = 0$) dans son propre référentiel.

Nous proposons ici une nouvelle position philosophique qui rejette l'idée que le concept d'immobilité 'stricte' appartiendrait à la réalité. En effet elle suppose que, dans tous référentiels distincts d'un corps spécifié, la vitesse instantanée de ce corps ne peut pas être égale à zéro durant une durée non-nulle ΔT (c.-à-d. $\forall t \in \Delta T, v(t) \neq 0$ OU si $v(t) = 0$ alors $dv(t)/dt \neq 0$)⁴⁵. Nous appelons cette nouvelle position la '*philosophie de la non-immobilité ontologique*'. La conséquence logique de cette prémisse est le fait que tous corps devrait être continument en mouvement, ce qui peut sembler très bizarre par rapport à notre usage ordinaire des termes 'mouvement' et 'immobilité' lorsque nous décrivons la réalité. C'est pourquoi l'adhésion à la '*philosophie de la non-immobilité ontologique*' nécessite à la fois un usage plus cohérent⁴⁶ du mot 'immobilité' et l'introduction d'un nouveau concept.

V.2 Le nouveau concept d'impermobilité

Le terme 'immobilité' (et tous ces synonymes : immobilisme, être au repos, être immobile, être inerte, etc...) a toujours été supposé être ontologiquement différent des termes 'mouvement' ou 'mobilité' : par exemple, lorsque F.A. Shamsi analysait les conséquences philosophiques du paradoxe de Zénon, il en vint à la conclusion suivante : « dans le système infiniment divisible [*cadre continu*], il y a une disjonction fondamentale entre 'être dans un état de mouvement' et 'être dans un état de repos' » [*traduction personnelle*]. Ou en d'autres termes : « ... cela nous oblige à postuler une catégorie spéciale de l'être, à savoir, être dans un état de mouvement, laquelle n'est en aucun cas réductible à l'autre catégorie, celle d'être dans un état de repos » (Shamsi 1973) [*traduction personnelle*]. Comme nous l'avons déjà mentionné dans la [partie IV.2](#), les paradoxes de Zénon ne font rien d'autre que de pointer du doigt l'insurmontable difficulté qui consiste à conceptualiser le passage de l'immobilité au mouvement ou vice-versa (= problème philosophique *PP*), qui survient simplement en raison des 'définitions exclusives' des deux termes.

Mais, si l'on choisit l'angle d'attaque de la philosophie linguistique (c.-à-d. que la philosophie du langage peut aider à résoudre des problèmes philosophiques),⁴⁷ une solution au problème philosophique *PP* peut être facilement proposée : nier la différence ontologique entre l'immobilité et le mouvement en définissant simplement le premier terme comme une forme imperceptible du second terme. En effet, *si avec le mot 'immobilité' nous pensons à un mouvement imperceptible*, il y aurait seulement un changement d'ampleur spatiale (et non pas un changement d'un état ontologique à un autre) lorsque quelque chose étant 'au repos', commence à bouger. Dans ce contexte, un corps au repos n'est pas un corps qui ne bouge pas, mais il est seulement un corps qui semble ne pas bouger. Evidemment, changer si radicalement la signification d'un mot si commun est probablement le meilleur moyen pour produire à la fois des propositions obscures et des gros malentendus. Un meilleur moyen pour résoudre de façon linguistique le problème *PP* est alors de proposer un nouveau mot pour remplacer le mot 'immobilité' lorsque l'on décrit la réalité. Nous présentons ainsi le mot

⁴⁵ C.-à-d. que la vitesse instantanée est, la plupart du temps, non égale à zéro, mais elle peut être strictement égale à zéro à certains instants (de durée nulle).

⁴⁶ Nous pouvons affirmer que l'utilisation actuelle du terme 'immobilité' n'est pas vraiment cohérente puisqu'elle induit des problèmes dès que nous considérons l'immobilité comme réelle : voir la première et deuxième situation du [Tableau 2](#).

⁴⁷ La plupart des paradoxes de la pluralité de Zénon (voir [note de bas de page n°4](#)) sont résolus par une approche de philosophie linguistique.

‘impermobilité’ (et son adjectif associé ‘impermobile’) construit à partir de la contraction de sa définition : mobilité/mouvement imperceptible (*en anglais, imperceptible mobility/motion*).⁴⁸

A l’aide de ce nouveau concept, le problème *PP* (Comment conceptualiser le passage de l’immobilité au mouvement (ou vice versa) ?) se transforme en *PP’* (Comment conceptualiser le passage de l’impermobilité au mouvement (ou vice versa) ?). A ce stade-là, la réponse à ce dernier problème a déjà été donnée ci-dessus en évoquant le changement dans l’ampleur du mouvement. Bien sûr, on pourrait rétorquer que le problème *PP* n’est toujours pas résolu. Mais, une fois adopté la ‘*philosophie de la non-immobilité ontologique*’, ce problème n’a plus besoin de trouver une réponse : est-ce encore vraiment nécessaire d’essayer de conceptualiser le passage d’un concept qui ne se rapporte pas à la réalité (l’immobilité) à un autre concept qui lui est bien en relation avec la réalité (le mouvement) ?

La notion d’immobilité ne devrait pas être vue comme un concept intrinsèque à la réalité mais plutôt comme une notion *qui émerge de notre perception de la réalité via les sens humains* (quelque fois aussi au moyen d’instruments physiques). Mais, comme à la fois nos sens et nos dispositifs techniques d’observation sont limités dans leur capacité de description (en raison de seuils de détection, sensibilités spécifiques et variabilité de mesure), ils ne peuvent pas capturer tous les types de mouvement qui existent ; ainsi, le mot ‘immobilité’ ferait plus référence aux ‘défauts’ de notre description de la réalité que référence à une véritable caractéristique de la réalité (considérée comme ontologiquement indépendante de nos schémas conceptuels dans le contexte du ‘réalisme philosophique’). Par ailleurs, on peut noter que la présence de seuils de détection et/ou de sensibilités spécifiques (vues comme des limitations techniques de nos appareils de mesures) ne permet pas d’exclure une véritable existence pour des grandeurs strictement nulles, mais dans un même temps, cela a pour conséquence que toute mesure expérimentale ne peut en aucun cas offrir une preuve pour une telle existence. Et ainsi, du point de vue d’un scientifique ‘expérimentaliste’, le nouveau concept d’impermobilité – introduit pour résoudre le problème logico-philosophique *PP* (voir ci-dessus) – apparaît bien plus adéquat que le terme ‘immobilité’ pour une caractérisation rigoureuse de l’état cinématique d’un corps matériel.

Par conséquent, la ‘*philosophie de la non-immobilité ontologique*’ propose le remplacement des deux raisonnements circulaires de Zénon (représentés dans la **Fig. 1** et la **Fig. 4**) par un raisonnement valide et cohérent basé sur quatre propositions logiquement équivalentes : « Être = être en mouvement » ⇔ « L’immobilité n’est pas réelle » ⇔ « L’immobilité est une illusion de nos sens » ⇔ « La notion d’impermobilité (= mouvement imperceptible) devrait toujours être utilisée pour décrire un corps qui semble ne pas bouger » (voir **Fig. 5** page suivante). Dans un tel raisonnement, il n’y a plus aucun paradoxe et, de manière bien plus importante, le problème philosophique *PP* est résolu.

⁴⁸ Les termes ‘impermobilité/impermobile’ peuvent aussi être construits en insérant le préfixe ‘per’ — ayant ici la signification de déviation ou de destruction — dans les mots ‘immobilité/immobile’.

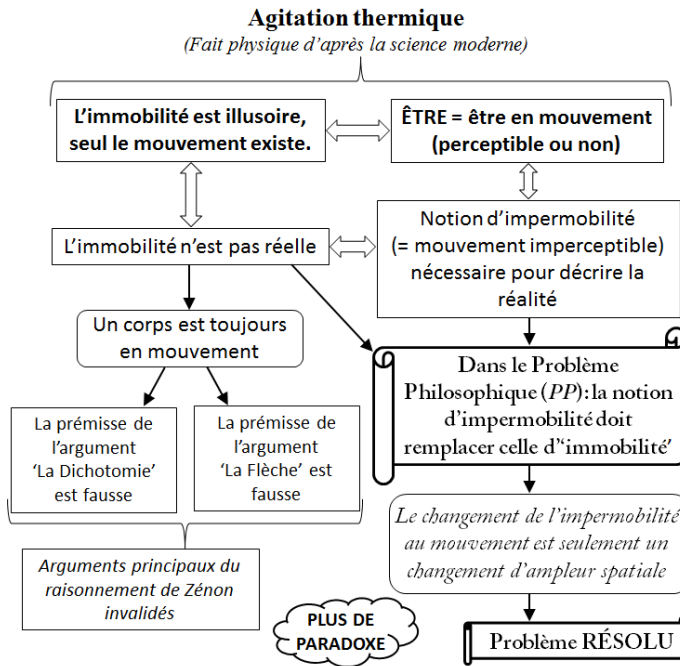


Fig. 5 Conséquences logiques (dans le cadre continu) de la ‘philosophie de la non-immobilité ontologique’ compatible avec l’existence de l’agitation thermique : il n’y a plus de situation paradoxale et le problème philosophique est résolu.

Finalement, le concept d’impermobilité ne fait rien d’autre que d’affirmer que l’immobilité ‘stricte’ est toujours une illusion de nos sens, même pour les corps pour lesquels nous ne pouvons pas deviner à partir de notre expérience immédiate qu’ils sont en réalité en mouvement. Ainsi, afin de compléter une vision rationnelle de la réalité qui serait en accord avec la ‘philosophie de la non-immobilité ontologique’, nous avons besoin de dépasser nos expériences et pensées immédiates. D’après G. Bachelard (1934), ce dépassement est justement un des buts principaux de la ‘science moderne’. Dans le cas qui nous occupe là, la science actuelle nous fournit une théorie qui est totalement compatible avec notre nouvelle position philosophique. En effet, à la lumière de ‘l’agitation thermique’ – une des hypothèses fondamentales de la théorie atomique moderne – l’immobilité semble vraiment très difficile à trouver dans le comportement microscopique des corps matériels, comme nous le détaillons dans la partie suivante.

V.3 L’agitation thermique⁴⁹

Comme déjà mentionné plus haut, la science moderne accepte la description de la matière en termes d’entités discrètes (les atomes et tous ses composants) mais cette matière est

⁴⁹ Cette sous-partie ne contient pas de référence bibliographique étant donné qu’elle ne fait qu’exposer des connaissances encyclopédiques qui ne font nullement débat dans la communauté scientifique.

toutefois capable de se mouvoir dans un *espace-temps continu*. La naissance de la théorie atomiste est usuellement attribuée à Démocrite et Leucippe (contemporain de Zénon d'Elée). Mais, ce n'est qu'au cours du XIX^{ème} siècle que divers champs d'investigations scientifiques, tels que la chimie, la cristallographie ou encore la thermodynamique (avec la théorie cinétique des gaz), convergèrent pour aboutir à la notion moderne d'atome, laquelle postule l'existence de différents éléments atomiques constitutifs de toute matière. Quelques jalons historiques datant de ce siècle peuvent être mentionnés : John Dalton construisit la première théorie atomique pour la chimie (1808) ; Robert Brown décrit pour la première fois (1827) le mouvement continûment aléatoire de particules de grains de pollen à la surface d'un liquide (dénommé depuis le mouvement Brownien) ; Albert Einstein publia en 1905 un article expliquant de manière précise comment le mouvement que Brown observa était le résultat du mouvement individuel des molécules d'eau. En 1906, Marian Smoluchowski arriva à la même conclusion, et ce de manière indépendante des travaux d'Einstein. Cette explication du mouvement Brownien par l'agitation thermique servit de confirmation définitive pour l'existence des atomes après la vérification expérimentale et quantitative par Jean Perrin en 1908.

L'agitation thermique est le mouvement incessant et aléatoire des atomes et des molécules constituant la matière. Ce mouvement est toujours présent, quel que soit l'état de la matière (solide, liquide ou gaz) mais il gagne en énergie lorsque la température augmente. En théorie, l'agitation thermique est supposée être nulle à la température de zéro kelvin (zéro absolu, -273.15°C) puisque, par définition, l'énergie thermique de la matière disparaît à cette température (dans le cadre de l'interprétation classique non-quantique). Cependant, les lois de la thermodynamique stipulent qu'il est impossible d'atteindre ce zéro absolu (en utilisant uniquement des techniques thermodynamiques). Cette limite basse de température peut donc être bien définie par la théorie mais elle est inatteignable en pratique. *Par conséquent, chaque atome et chaque molécule de l'univers est constamment en train de bouger.* Evidemment, l'amplitude spatiale de ce mouvement thermique est si minuscule qu'il n'est pas directement perceptible par nos sens, ni même si l'on s'aide d'un microscope optique. Seuls quelques processus physiques peuvent de manière indirecte révéler l'existence de l'agitation thermique. Historiquement, le mouvement Brownien fut la première preuve de l'agitation thermique, mais parmi des phénomènes physiques bien plus communs, on peut citer le processus de diffusion (non-convectif) dans les fluides (liquides ou gaz). Par exemple, un verre d'eau dans lequel est ajoutée une goutte d'encre va s'homogénéiser spontanément (sans avoir à mélanger) : la diffusion des molécules d'encre au sein du volume entier d'eau a lieu sous l'action de l'agitation thermique. En observant ce processus d'homogénéisation, nous pouvons aisément concevoir que les molécules d'encres peuvent librement se déplacer dans l'espace délimité par le verre d'eau. En réalité, le mouvement des molécules (d'encre et d'eau) continu après l'homogénéisation complète, et il avait aussi lieu avant l'ajout de l'encre, mais à ce moment-là, il n'y a pas d'effet visuel de l'agitation thermique. A l'état solide, les atomes et les molécules ne sont pas libres de se déplacer partout au sein du volume de l'objet. En effet, un objet solide ne se déforme pas spontanément. Mais, l'agitation thermique existe bel et bien sous la forme d'une vibration oscillante des atomes autour de points d'équilibre. Ceci est à la base de la théorie de la conduction thermique dans les solides : le transfert de la chaleur est attribué à l'activité de vibration du réseau d'atomes (pour le cas d'un solide non électriquement conducteur). De plus, au sein même des

molécules (et indépendamment de l'état de la matière), les atomes qui constituent les molécules connaissent des oscillations vibratoires ; dans le cadre de la chimie analytique, certaines techniques de spectroscopies – telles que la spectroscopie infra-rouge et Raman – sont spécifiquement basées sur l'existence de tels mouvements vibratoires des atomes au sein des molécules.⁵⁰

Il est important de faire remarquer que l'agitation thermique est à l'abri du paradoxe de Zénon : les deux arguments cohérents à l'encontre du mouvement dans le *cadre continu* sont 'La Flèche' et l'*interprétation régressive* de 'La Dichotomie' (voir **Tableau 1**), mais leur cohérence est circulaire et nécessite la notion d'immobilité (voir **Fig. 1** et **Fig. 4**). Ici, cette notion n'est pas nécessaire lorsqu'est définie l'agitation thermique, puisque tous les atomes et molécules bougent vraiment continuellement dans un mouvement temporellement infini (c.-à-d. sans aucun début ni fin concevable dans le temps).

Ensuite, un rappel concernant la façon dont la mécanique classique décrit le mouvement constitue la touche finale afin de rationnellement comprendre comment l'agitation thermique (phénomène à l'échelle microscopique) peut avoir une influence sur la caractérisation de l'état de mouvement d'un corps matériel macroscopique.

V.4 Description du mouvement par la mécanique classique

En physique, la cinématique est la branche de la mécanique classique dédiée à la description des mouvements indépendamment des causes qui les produisent. Ces mouvements peuvent être celui d'un point, d'un corps (objet) ou d'un système de corps (groupe d'objets). Par souci de simplicité, la mécanique classique modélise souvent les objets du monde réel comme des particules ponctuelles, c.-à-d. qu'en négligeant leurs dimensions on les considère comme des points. Le mouvement d'une particule ponctuelle est alors caractérisé par un nombre réduit de paramètres : sa position, sa masse, et les forces s'appliquant sur la particule. En réalité, les objets réels ont toujours des dimensions non nulles ; cependant, les résultats obtenus pour les particules ponctuelles peuvent être utilisés pour étudier un objet réel en le traitant comme un objet composite composé d'un nombre important de particules ponctuelles interagissant entre elles. En effet, le centre de masse d'un tel objet composite se comporte en mécanique classique comme une particule ponctuelle. Le centre de masse (ou barycentre) d'une distribution de masse (un ensemble masses m_i) est défini comme étant l'unique point pour lequel, s'il est pris comme origine des positions, la somme des positions relatives pondérées des masses m_i est égale à zéro. Dans le cas d'un système de particules P_i ($i = 1, \dots, N$), chacune de masse m_i et localisées dans l'espace par les coordonnées r_i ($i = 1, \dots, N$), les coordonnées R du centre de masse respectent la relation suivante : $\sum_{i=1}^N m_i \cdot (r_i - R) = 0$. En extrayant R de cette relation, nous obtenons la formule : $R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N m_i \cdot r_i$, où M est la somme des masses de toutes les particules. Il faut noter que le centre de masse d'un objet n'étant qu'un point de l'espace défini mathématiquement, il n'est qu'un 'point représentant un objet réel' tel que ceux que Zénon utilise dans ces arguments.

En considérant que n'importe quel objet solide est composé d'atomes et que ces atomes oscillent sans cesse (selon des fluctuations aléatoires), le centre de masse de l'objet oscille

⁵⁰ Comme exemple de référence académique voir Sherwood (1972). De manière générale, l'existence d'une 'dynamique atomique et/ou moléculaire' fait partie du paradigme scientifique actuel de la plupart des chimistes. Pour eux, la position philosophique proposée ('philosophie de la non-immobilité ontologique') paraîtrait probablement assez évidente et naturelle.

aussi. Evidemment, en raison de compensations statistiques lors de l'addition des fluctuations aléatoires de l'ensemble des atomes, l'amplitude du mouvement du centre de masse peut être bien plus faible (de plusieurs ordres de grandeur) que celle du mouvement d'un atome individuel. Mais en réalité, même si elle est extrêmement faible, l'amplitude réelle du mouvement du centre de masse dû à l'agitation thermique importe peu (ça pourrait être 10^{-20} , 10^{-50} ou même 10^{-500} m, peu importe) ; le point le plus important est que cette amplitude spatiale n'est jamais nulle (durant une durée non nulle). En outre, la non-perception/détection d'un mouvement n'implique pas forcément des mouvements lents, puisque des mouvements rapides restreints dans de minuscules espaces peuvent aussi être imperceptibles ou indétectables. Ainsi, la vitesse instantanée du centre de masse n'a pas besoin d'être extrêmement faible pour contraindre son mouvement à l'intérieur d'un espace extrêmement réduit : le vecteur vitesse a juste besoin de changer sans cesse de direction (et optionnellement aussi d'amplitude) d'une façon aléatoire ; et il se trouve que la caractéristique d'être aléatoire est justement un trait essentiel dans la définition de l'agitation thermique.

Finalement, l'existence de l'agitation thermique peut jouer le rôle d'une aide rationnelle, venant du monde physique, pour accepter le changement conceptuel proposé : le remplacement du mot 'immobilité' par le nouveau concept d'impermobilité lors de la description de l'état cinématique d'un corps matériel. Alors qu'il y a, par définition, une différence ontologique entre le mouvement et l'immobilité, il n'y a pas de différence ontologique entre le mouvement et l'impermobilité. La différence se situe seulement dans l'ordre de grandeur des deux sortes de mouvement ; cette différence est évidemment très grande (probablement un large écart de 15 à 20 ordres de grandeur) entre le mouvement du centre de masse d'un objet 'impermobile' et le mouvement macroscopique discernable du même objet.⁵¹

Conclusion

Dans cet article, nous avons montré que, parmi les arguments de Zénon à l'encontre du mouvement reportés par Aristote, seul l'argument 'Le Stade' est vraiment paradoxal. Mais, puisque ce paradoxe ne s'insère que dans le *cadre discret* (structure atomique pour le temps et l'espace), la solution est de simplement rejeter un tel cadre au profit du *cadre continu* (système infiniment divisible pour le temps et l'espace). Nous avons aussi montré que, dans ce dernier cadre, l'argument de 'L'Achille' et l'*interprétation progressive* de l'argument de 'La Dichotomie' sont logiquement équivalents et échouent donc tous les deux à nier l'existence du mouvement en raison de leur incohérence interne. En outre, nous avons prouvé que des arguments *a priori* cohérents peuvent toutefois être identifiés grâce à 'La Flèche' et à l'*interprétation régressive* de 'La Dichotomie', mais leur cohérence repose sur une prémisses implicite (la catégorie primordiale de l'être est 'être dans un état de repos' et non pas 'être dans un état de mouvement') ce qui mène à un raisonnement circulaire. Finalement, nous avons montré pourquoi les arguments de Zénon contre le mouvement devraient plutôt être vus comme des *paradoxes de l'immobilité*. Dans une telle catégorie de paradoxes, le mouvement

⁵¹ Les deux mouvements étant considérés dans le même référentiel; toutefois, à la fois la réalité et la conceptualisation de l'agitation thermique ne dépend pas d'une quelconque spécification d'un référentiel galiléen particulier.

est logiquement paradoxal parce que l'immobilité est supposée exister en premier lieu. Ainsi, tenter d'identifier des failles logiques dans les arguments de Zénon dans le but de résoudre les paradoxes n'est plus nécessaire, puisque rejeter simplement l'idée que 'l'immobilité appartiendrait à la réalité' protège alors le concept de mouvement de tout problème logique.

En fait, les arguments de Zénon constituent simplement une illustration du problème logico-philosophique *PP*, qui consiste à essayer de conceptualiser le passage de l'immobilité vers le mouvement (ou vice versa). La circularité des arguments met en lumière à la fois les forces et les faiblesses de la dialectique de Zénon : son argumentation est très convaincante dans le cadre d'une vision Parménidienne du monde, puisqu'elle est en totale adéquation avec cette dernière, mais elle est aussi inconsistante puisqu'elle n'offre rien qui puisse s'opposer à des positions philosophiques opposées. En particulier, la '*philosophie de la non-immobilité ontologique*' proposée dans cet article — dans laquelle le nouveau concept d'impermobilité (signifiant simplement mouvement imperceptible) remplace le mot immobilité (et tous ces synonymes) pour décrire la réalité — est 'immunisée' contre les paradoxes de Zénon. Dans une telle philosophie, l'immobilité n'est rien d'autre qu'une illusion des sens, et la réalité ne connaît seulement que le mouvement. Les avantages principaux de cette position philosophique sont les suivants : (1) une résolution qui va de soi du problème philosophique *PP* susmentionné, (2) une compatibilité complète avec la description des corps matériels que nous offre la science moderne (à l'aide de la cinématique et de l'agitation thermique). L'indéniable aspect non-intuitif est peut-être son seul inconvénient mineur.

Après tout, la situation en cours qu'implique la cohérence de certains des arguments de Zénon ('La Flèche' et l'*interprétation régressive* de 'La Dichotomie') nous laisse toujours une marge de manœuvre personnelle : (1) si vous pensez que l'immobilité doit exister dans le monde réel, vous devez logiquement accepter que le mouvement est une illusion ; sinon vous êtes bloqué dans une situation paradoxale ; (2) si vous pensez que l'immobilité n'existe pas dans le monde réel, il n'y a plus de problème désormais pour considérer le mouvement comme bien réel, et le problème philosophique *PP* susmentionné est résolu. En réalité, par le seul fait qu'un tel choix existe, une importante conclusion épistémologique est dévoilée : l'existence réelle de l'immobilité (c.-à-d. être bien plus qu'un concept imaginé par l'homme) devrait être considérée comme une croyance *a priori*, pour laquelle nous devrions rechercher quelques preuves expérimentales. La science contemporaine suggère fortement qu'il n'existe pas de telles preuves, mais cela n'empêche personne de tenter d'en chercher s'il le souhaite.

Finalement, ce présent article ne prétend pas avoir abordé tous les aspects philosophiques ou toutes les conséquences épistémologiques de cette nouvelle vision des paradoxes de Zénon, et il devrait plutôt être vu comme un nouveau point de départ pour continuer le long débat à propos de la nature du mouvement et de l'immobilité. En particulier, parce que la notion classique d'immobilité est basée sur notre expérience immédiate, et puisque l'expérience immédiate est un des 'obstacles épistémologiques' identifiés par Gaston Bachelard,⁵² nous pouvons légitimement nous demander : La notion d'immobilité ne serait-elle pas, elle aussi, un 'obstacle épistémologique' camouflé ? Si oui, nous espérons que ce présent article sera d'une aide suffisante pour le franchir.

⁵² D'après G. Bachelard (1934), les obstacles épistémologiques sont toutes les représentations qui bloquent ou entrave le progrès scientifique.

Annexe 1 : Explication de l'argument 'Le Stade'

Cette explication est très largement inspirée par celle proposée par J.A. Faris (1996). Par ailleurs, en complément du fragment déjà dévoilé en [partie I](#), voici la suite de l'argument exposée par Aristote : Soient, par exemple, les masses égales en repos représentées par AAAA. Soient, d'autre part, BBBB, les masses égales en nombre et en grandeur aux A, mais qui partent du milieu de la longueur des A; soient enfin CCCC les masses égales aux autres en nombre, en grandeur, et égales aux B en vitesse, mais qui partent de l'extrémité.

[Aristote, *La Physique* (fragments VI:240a8-240a10); Traduit par Barthélémy Saint-Hilaire (1862) : Tome 2, Livre VI: Chapitre XIV, §11]

Le quatrième argument contre l'idée de mouvement est probablement le plus difficile à comprendre directement à la lecture du texte d'Aristote. Comme l'argument de 'La Flèche', le *cadre spatio-temporel discret* doit être utilisé pour l'interpréter correctement... mais ça n'aide pas à trouver de façon évidente comment Aristote arrive à l'étrange conclusion « le temps, qui n'est que la moitié, est l'égal du temps qui est le double » (voir citation en [partie I](#)). Une des explications qui permet de retomber sur cette conclusion paradoxale émise par Zénon est la suivante :

- (a) La première masse B (première par rapport au sens du mouvement) passe devant une masse A durant son mouvement (c.-à-d. B₃ est en face de A₂ dans la position initiale, puis est en face de A₃ dans la position de l'instant suivant, voir **Fig. 6**).
- (b) La première masse C voit passer 2 masses B durant son mouvement (c.-à-d. C₁ croise B₃ puis B₂).
- (c) Temps pris par la première masse C pour croiser une masse B = temps pris par la première masse B pour croiser une masse A.
- (d) La première masse C est aussi passé devant une masse A durant son mouvement (C₁ est en face de A₂ dans la position initiale, puis est en face de A₁ dans la position de l'instant suivant).

Donc :

Avec (a), (b) et (c) on peut conclure : Durée du mouvement de la première masse B = la moitié de la durée du mouvement de la première masse C (1).

Mais avec (a) et (d), on conclut que : Durée du mouvement de la première masse B = durée du mouvement de la première masse C (2).

Par conséquent, avec (1) et (2) on en déduit que : la moitié de la durée du mouvement de la première masse C = durée du mouvement de la première masse C (c.-à-d. la moitié d'une durée donnée est égale à la durée entière).

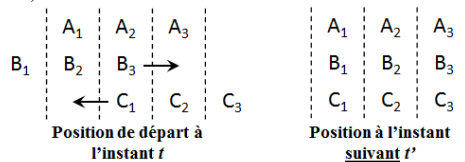


Fig. 6 Représentation schématique de l'argument 'Le Stade' (exemple avec la cardinalité de chaque groupe égale à 3) (Les instants t et t' sont deux durées indivisibles consécutives)

La pierre angulaire de l'argumentation de Zénon est évidemment la proposition (c). En effet, elle peut paraître fort douteuse à première vue, et il paraîtrait bien plus naturel de la remplacer par la proposition suivante : Temps pris par la première masse C pour croiser une masse B = la moitié du temps pris par la première masse B pour croiser une masse A. Mais une telle proposition n'est valide seulement dans un

‘monde continu’ : l’argument du ‘Stade’ est en effet trivial dans le *cadre continu* puisque le concept de vitesse relative existe ; Malheureusement, elle n’est pas valide dans le *cadre spatio-temporel discret* dans lequel les positions intermédiaires (telles que celle illustrée dans la Fig. 7) ne sont pas possibles. En réalité, la validité de la proposition (c) est une des conséquences directes de la ‘discretisation’ de l’espace et du temps.

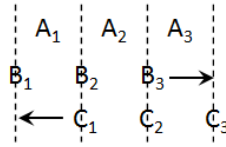


Fig. 7 Position non-existante dans le *cadre spatial discret*

Comme le fit déjà remarquer Adolf Grünbaum (1967, 1970), une autre façon de mettre en œuvre le paradoxe est d’analyser le même changement de position des trois groupes dans le référentiel des masses B à la place du référentiel des masses A (comme c’était implicitement le cas ci-dessus) (voir Fig. 8) : dans ce cas, les masses A et C bougent alors dans la même direction... et le problème survient quand on tente de déterminer les vitesses de déplacement. Bien sûr, les masses A se déplacent à la même vitesse par rapport aux masses B que les masses B se déplaçaient par rapport aux masses A... mais quelle est alors la vitesse des masses C ? Supposons que nous retrouvions à nouveau la même position des masses (c.-à-d. la position finale de la Fig. 6) ; dans ce cas, C₁ part d’en face de B₃ et se retrouve en face de B₁ sans jamais n’être passé devant B₂ : en effet, il n’existe pas d’instant ‘restant’ entre deux durées indivisibles consécutives. Ainsi, C₁ aurait accompli une sorte de téléportation ! Afin d’éviter cela, il faut envisager que C₁ se trouve en face de B₂ à l’instant suivant... mais du coup, on peut facilement remarquer que les masses C se déplacent alors à la même vitesse que les masses A, c.-à-d. qu’elles ne bougent plus par rapport à ces même masses A (voir Fig. 8).

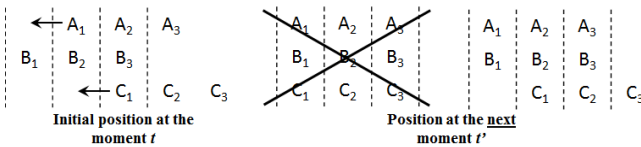


Fig. 8 Représentation schématique de l’argument ‘Le Stade’ dans le référentiel des masses B (Les instants t et t' sont deux durées indivisibles consécutives)

Finalement, l’argument ‘Le Stade’ révèle que l’hypothèse d’une structure atomique pour l’espace et le temps implique nécessairement que, premièrement, un référentiel absolu pour décrire le mouvement doit exister (dans la configuration de l’argument, ce référentiel est bien sûr celui des masses A), et que deuxièmement, dans ce référentiel absolu, le mouvement ne peut s’effectuer qu’à une seule vitesse (changement d’un seul élément d’espace entre deux durées indivisibles consécutives). Le gros problème est qu’une telle situation interdit l’existence de tous mouvements relatifs à une vitesse quelconque. Ainsi, l’argument du ‘Stade’ ne réfute pas directement l’existence du mouvement mais il réfute l’existence du mouvement relatif. Bien sûr, une telle réfutation reste en contradiction avec notre expérience classique et usuelle du mouvement d’un objet physique, et donc la situation reste paradoxale (dans le *cadre discret*).

Annexe 2: Situations de la vie courante dans lesquelles le mouvement n'est pas perçu

Parce qu'il est si habituel d'avoir l'expérience du mouvement dans la vie de tous les jours, nous ne réalisons pas toujours qu'une telle perception du mouvement nécessite quatre conditions qui sont décrites dans la Fig. 9. Dans un référentiel inertiel donné et dans le cas où un objet est physiquement en mouvement (macroscopique) dans ce référentiel, l'absence d'une de ces conditions peut fréquemment provoquer une illusion d'immobilité de cet objet (dans le même référentiel galiléen).

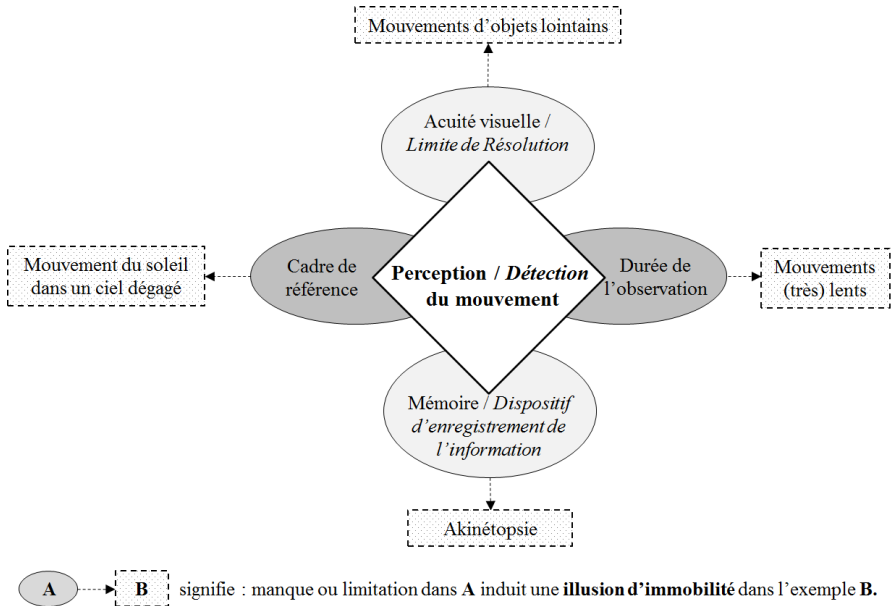


Fig. 9 Représentation schématique des quatre conditions nécessaires pour la perception du mouvement (par un humain ou un animal) ou pour la détection du mouvement (par un dispositif technique quelconque).

Un des exemples des plus simples d'une telle illusion est le mouvement du soleil dans le ciel au cours d'une journée bien ensoleillée : si on regarde le soleil au milieu d'un grand ciel bleu (sans aucun nuage) durant quelques minutes aux alentours de midi, on peut vraiment avoir l'impression qu'il n'est pas en mouvement. Mais si en étant d'abord au soleil, on reste immobile à côté d'un arbre et, que quelques minutes plus tard, on se retrouve dans l'ombre de l'arbre, on peut cette fois facilement en déduire que le soleil est en mouvement. Dans ce dernier cas, grâce à l'arbre qui joue le rôle de cadre de référence, le mouvement peut être plus facilement et plus rapidement détecté. En l'absence de ce cadre (local) de référence, nous pouvons toujours définir la position du soleil d'après son élévation au-dessus de l'horizon, mais sans un appareil de mesure spécifique pour précisément enregistrer cette valeur d'azimut, nous avons généralement besoin de quelques heures pour remarquer un changement réel de sa position (et en n'étant pas pressé et prêt à augmenter la durée de l'observation, attendre le coucher de soleil offre évidemment une preuve du mouvement relatif du soleil). Ainsi, en fonction de la présence ou de l'absence d'un cadre de référence, et en fonction de la vitesse relative du mouvement, la durée minimale d'observation doit être ajustée afin de percevoir correctement le mouvement et éviter l'illusion d'immobilité.

De plus, la détection du mouvement implique toujours la comparaison de deux positions différentes à deux moments différents. Cette opération de comparaison nécessite l'enregistrement de la première position dans la mémoire (cerveau pour les animaux ou dispositif spécifique pour les machines). Une telle opération est extrêmement naturelle pour une large majorité de gens mais, malheureusement, elle ne l'est pas pour les personnes atteintes d'akinétopsie (agnosie visuelle du mouvement). Bien qu'elles soient capables de voir les objets stationnaires, de telles personnes sont incapables de percevoir le mouvement dans leur champ visuel. Pour elles, le monde est dépourvu de mouvement. Mais en réalité, même pour les personnes saines, les limites physiologiques de la vision normale peuvent parfois induire une illusion d'immobilité : comme l'acuité visuelle d'un œil 'normal' est d'environ 1 arcminute ($1' = 1/60^\circ$), aucun mouvement d'une amplitude spatiale de 9 m ne peut être détecté si l'observateur se trouve à plus de 30 km. De plus, la direction du mouvement par rapport à l'axe d'observation peut aussi affecter la perception d'un mouvement réel : imaginons une personne qui se promène sur une plage en forme de large crique et qu'un phare se trouve au bout de la crique. A 3000 m de la plage, un bateau à voile de 15 m de haut navigue à 10 nœuds ($\sim 5.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en direction du phare (voir Fig. 10). Pour la vision du promeneur, le voilier se déplace à $5.9 \text{ '}\cdot\text{s}^{-1}$ et il peut donc percevoir son déplacement en moins d'une seconde. Pour ce type de mouvement, le phare joue le rôle d'un cadre local de référence et la distance apparente entre le voilier et le phare décroît assez rapidement ; mais si le bateau tire un bord pour venir en direction du promeneur, la distance apparente voilier-phare ne va plus changer rapidement. Seul un changement dans la taille apparente (ou diamètre angulaire) du bateau peut alors donner une indication sur le mouvement réel. Dans la configuration considérée (voir Fig. 10), un changement de la taille apparente de plus d'un arcminute n'a lieu qu'après 32 secondes. Avant cette durée, le promeneur peut avoir l'illusion que le voilier, en réalité toujours en mouvement, s'est arrêté au moment où il a changé de direction.

Les limites physiologiques de l'œil humain ne restreignent pas seulement la vision des objets lointains mais aussi celle des objets proches. Le 'Punctum proximum' est le point le plus proche que l'on peut voir distinctement confortablement. Il est situé aux alentours de 25 cm pour un œil 'normal'. Combiné à la valeur de l'acuité visuelle 'normale', cela signifie que nous ne pouvons pas voir directement quelque chose de plus petit que $\sim 0.07 \text{ mm}$. Et pourtant, le mouvement à l'échelle microscopique existe et tout un chacun peut utiliser un microscope pour s'en convaincre.

Ainsi, dans certaines situations de la vie courante, nous avons vu qu'il est facile de comprendre qu'une certaine immobilité n'est qu'illusion et que des effets optico-géométriques peuvent camoufler le mouvement réel.

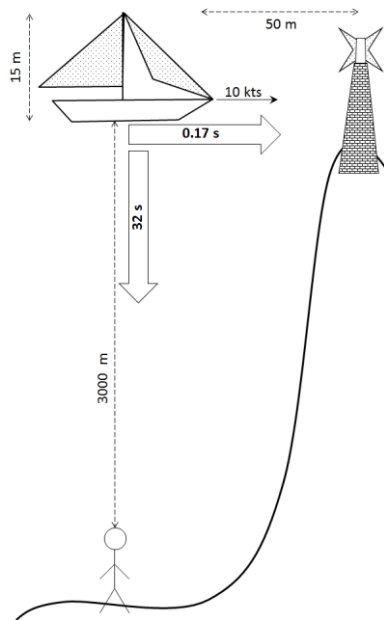


Fig. 10 Schéma d'un exemple dans lequel la durée de l'observation nécessaire pour détecter un mouvement est affectée par un effet géométrique.

References

- Alper, J. S., & Bridger, M. (1997). Mathematics, Models and Zeno's Paradoxes. *Synthese*, 110, 143–166.
- Antonopoulos, C. (2004). Moving without being where you're not; A non-bivalent way. *Journal for General Philosophy of Science*, 35, 235–259.
- Ardourel, V. (2015). A discrete solution for the paradox of Achilles and the tortoise. *Synthese*, 192, 2843–2861.
- Arntzenius, F. (2000). Are there really instantaneous velocities? *The Monist*, 83(2), 187–208.
- Atkinson, D. (2007). Losing energy in classical, relativistic and quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38, 170–180.
- Bachelard, G. (1934). *La formation de l'esprit scientifique*. (5th ed., Bibliothèque des textes philosophiques). Paris: Librairie philosophique J. VRIN.
- Benacerraf, P. (1970). Tasks, Super-Tasks, and the Modern Eleatics. In W. C. Salmon (Ed.), *Zeno's paradoxes* (pp. 103–129). Indianapolis: Bobbs-Merrill.
- Bergson, H. (1907). *L'évolution créatrice* (86th ed.). Paris: Les Presses universitaires de France. [Relevant part in English translation of this Bergson's book is also presented as chapter 3 in the monograph by Salmon (1970)]
- Bergson, H. (1969). *La pensée et le mouvant. Essais et conférences (1903 à 1923)*. Paris Les Presses universitaires de France.
- Beth, E. W. (1946). Historical studies in traditional philosophy. *Synthese*, 5(5-6), 258–270.
- Blay, M. (2010). *Penser avec l'infini : La fécondité d'une notion mathématique et philosophique, de Giordano Bruno aux Lumières*. Paris: Vuibert/Adapt-Snes.
- Carroll, J. W. (2002). Instantaneous Motion. *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition*, 110(1), 49–67.
- Caveing, M. (1982). *Zénon d'Élée, prolégomènes aux doctrines du continu: étude historique et critique des fragments et témoignages*. Paris: Vrin.
- Dowden, B. (2017). Zeno's Paradoxes. In *The Internet Encyclopedia of Philosophy*, ISSN 2161-0002, <http://www.iep.utm.edu/zeno-par/> (no publication date available); Accessed Sept. 10th 2017.
- Faris, J. A. (1996). *The paradoxes of Zeno*. Aldershot (Hants., England) ; Brookfield (Vt., USA): Avebury.
- Graham, D.W. (2015). Heraclitus. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Vol. Fall 2015). <https://plato.stanford.edu/archives/fall2015/entries/heraclitus/> ; Accessed Sept. 10th 2017.
- Grünbaum, A. (1967). *Modern Science and Zeno's Paradoxes*. Middletown, Conn.: Wesleyan University Press.
- Grünbaum, A. (1970). Modern Science and Zeno's Paradox of Motion. In W. C. Salmon (Ed.), *Zeno's paradoxes* (pp. 200–250). Indianapolis: Bobbs-Merrill.
- Hamblin, C. L. (1969). Starting and stopping. *The Monist*, 53(3), 410–425.
- Hardie, R. P., & Gaye, R. K. (1930). *Physica* by Aristotle (translation). In J.A. Smith and W.D. Ross (Ed.), *The Works of Aristotle*, vol. II, Oxford: At the Clarendon Press. Available online at: <https://archive.org/details/workstranslatedi02arisuoft> ; Accessed Sept. 10th 2017.

- Harrison, C. (1996). The Three Arrows of Zeno : Cantorian and Non-Cantorian Concepts of the Continuum and of Motion *Synthese*, 107, 271-292.
- Hasper, P. S. (2006). Zeno Unlimited. *Oxford Studies in Ancient Philosophy*, 30, 49-85.
- Huggett, N. (2010). Zeno's Paradoxes. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Vol. Winter 2010). <http://plato.stanford.edu/archives/win2010/entries/paradox-zeno/> ; Accessed Sept. 10th 2017.
- Jackson, F., & Pargetter, R. (1988). A Question about Rest and Motion. *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition*, 53(1), 141-146.
- James, W. (1911). *Some problems of philosophy: A beginning of an introduction to philosophy*. New York: Longmans, Green and Co.
- Kline, M. (1980). *Mathematics: The Loss of Certainty*. New York: Oxford University Press.
- Kirk, G. S., & Raven, J. E. (1957). *The Presocratic Philosophers: A Critical History with a Selection of Texts*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Available online at: <https://archive.org/details/presocraticphil033229mbp> ; Accessed Sept. 10th 2017.
- Lange, M. (2005). How Can Instantaneous Velocity Fulfill Its Causal Role? *The Philosophical Review*, 114(4), 433-468.
- Laraudogoitia, J. P. (1996). A Beautiful Supertask. *Mind*, 105, 81-83.
- Laraudogoitia, J.P. (2013). Zeno and flow of information. *Synthese*, 190, 439-447.
- Lear, J. (1981). A note on Zeno's arrow. *Phronesis*, 26(2), 91-104.
- Lee, C. (2011). Nonconservation of momentum in classical mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 42, 68-73.
- Łukowski, P. (2011). *Paradoxes* (Vol. 31, Trends in Logic). Netherlands: Springer.
- Lynds, P. (2003). Time and Classical and Quantum Mechanics: Indeterminacy vs. Discontinuity. *Found. Phys. Lett.*, 16(4), 343-355.
- Mazur, J. (2007). *The Motion Paradox: The 2,500-year-old Puzzle Behind All the Mysteries of Time and Space*. New York: Dutton.
- Medlin, B. (1963). The Origin of Motion. *Mind*, 72(286), 155-175.
- Meyer, U. (2003). The Metaphysics of velocity. *Philosophical Studies*, 112, 93-102.
- Mortensen, C. (1985). The limits of change. *Australasian Journal of Philosophy*, 63(1), 1-10.
- Nehamas, A. (2002). Parmenidean Being/ Heraclitean Fire. In V. Caston and D. W. Graham (eds.), *Presocratic Philosophy: Essays in Honour of Alexander Mourelatos* (pp. 45-64). Aldershot: Ashgate.
- Owen, G. E. L. (1957). *Zeno and the Mathematicians* (Vol. LVIII, Proceedings of the Aristotelian Society). N.S.
- Papa-Grimaldi, A. (1996). Why Mathematical Solutions of Zeno's Paradoxes Miss the Point: Zeno's One and Many Relation and Parmenides' Prohibition. *The Review of Metaphysics*, 50(2), 299 - 314.
- Peijnenburg, J., & Atkinson, D. (2008). Achilles, the Tortoise, and Colliding Balls. *History of Philosophy Quarterly*, 25, 187-201.
- Priest, G. (1985). Inconsistencies in Motion. *American Philosophical Quarterly*, 22(4), 339-346.
- Reeder, P. (2015). Zeno's arrow and the infinitesimal calculus. *Synthese*, 192(5), 1315-1335.

- Romero, G. E. (2014). The Collapse of Supertasks. *Foundations of Science*, 19(2), 209-216.
- Russell, B. (1970). The Problem of Infinity Considered Historically. In W. C. Salmon (Ed.), *Zeno's paradoxes* (pp. 45-58). Indianapolis: Bobbs-Merrill.
- Salmon, W. C. (Ed.). (1970). *Zeno's paradoxes*. Indianapolis: Bobbs-Merrill.
- Saint-Hilaire, B. (1862) Physique d'Aristote (traduction). Accessible en ligne au 19 octobre 2017 à l'adresse web suivante : <http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/Aristote/phys614.htm>
- Shamsi, F. A. (1973). *Towards a definitive solution of Zeno's paradoxes*. Karachi: The Times Press.
- Sherwood, P. M. A. (1972). *Vibrational Spectroscopy of Solids*. Cambridge: University Press.
- Smith, J. W. (1990). Time, change and contradiction. *Australasian Journal of Philosophy*, 68(2), 178-188.
- Smith, S. R. (2003). Are instantaneous velocities real and really instantaneous?: an argument for the affirmative. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 34, 261–280.
- Thomson, J.F. (1954). Tasks and Super-Tasks. *Analysis*, 15(1), 1-13.
- Tooley, M. (1988). In Defense of the Existence of States of Motion. *Philosophical Topics*, 16(1), 225-254.
- Vlastos, G. (1966). A note on Zeno's arrow. *Phronesis*, 11(1), 3-18.
- White, M. J. (1982). Zeno's arrow, divisible infinitesimals, and Chrysippus. *Phronesis*, 27(3), 239-254.
- Wisdom, J. O. (1970). Achilles on a Physical Racecourse. In W. C. Salmon (Ed.), *Zeno's paradoxes* (pp. 82-88). Indianapolis: Bobbs-Merrill.

Maël Bathfield est diplômé de l'Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), France, en 2003, avant d'entreprendre une thèse en chimie des polymères. Il soutint sa thèse en 2006 et depuis, dans le cadre de divers contrats post-doctoraux, il participa à divers sujets de recherche à l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier, France. Durant son doctorat, une controverse scientifique concernant un procédé spécifique de polymérisation l'amena dans un premier temps à s'intéresser à l'histoire des théories de cinétique chimique. Ensuite, parce que la chimie et la physique se rejoignent et se mêlent au niveau fondamental, il fut rapidement aussi intéressé par la construction historique de la théorie moderne atomique. Sa formation en histoire et philosophie des sciences est pour beaucoup autodidacte, mais en 2010 il assista toutefois aux cours du Master « Histoire, Philosophie et Didactique des Sciences » conjointement organisé par l'UCBL et L'Université de Montpellier 2. Ces recherches personnelles s'articulent autour des fondements implicites de la physique moderne (thermodynamique, relativité restreinte/générale, physique quantique) en relation avec ses problèmes actuels d'ordre fondamental (interprétation de la théorie quantique, incompatibilité entre la relativité et la physique quantique, matière/énergie noire).