Physique discrète et relativité

Jean-Paul Caltagirone

Université de Bordeaux
Institut de Mécanique et d'Ingéniérie
Département TREFLE, UMR CNRS n°5295
16 Avenue Pey-Berland, 33607 Pessac Cedex
email: calta@ipb.fr

RÉSUMÉ. L'article présente une alternative au concept de milieu continu qui a présidé au développement de la mécanique classique ou de la théorie de la relativité. Le concept de physique discrète ouvre la voie à l'unification de différents domaines, la mécanique des fluides et des solides, l'électromagnétisme et ses prolongements à l'optique physique. La loi fondamentale de la mécanique discrète est établie à partir des deux concepts fondamentaux de Galilée, le principe d'équivalence des effets inertiels et gravitaires et celui de relativité.

Les résultats de la physique discrète permettent de retrouver ceux de la mécanique classique mais aussi certaines solutions de la relativité restreinte et générale. Le choix d'un repère local conduit à atteindre la vitesse limite d'une particule ou d'un milieu matériel comme étant égale à la célérité de l'onde sans l'imposer *a priori*.

ABSTRACT. This paper presents an alternative to the concept of a continuum that has presided over the development of classical mechanics or the theory of relativity. The concept of discrete physics opens the way to the unification of different domains, fluid and solid mechanics, electromagnetism and its extensions to physical optics. The fundamental law of discrete mechanics is established from the two fundamental concepts of Galileo, the principle of equivalence of inertial and gravitational effects and that of relativity.

The results of the discrete physics allow to find those of the classical mechanics but also some solutions of the special and general relativity. The choice of a local reference frame leads to reaching the limit velocity of a particle or a material medium as being equal to the celerity of the wave without the imposing it *a priori*.

P.A.C.S.: 03.65.Bz ; 04.20.-q

1 Une formulation discrète de la physique

Le vocable de discret recouvre des notions très différentes, de celle de quantum à la discrétisation des équations différentielles pour aboutir à un système algébrique. Les discussions entre partisans de la physique continue et ceux de la physique discrète très présentes au début du siècle dernier continuent à alimenter le débat scientifique. Des tentatives dans ce sens ont pu être présentées, notamment celle de D. Greenspan [1] qui cite A. Einstein :

> *"One has to find a possibility to avoid the continuum (together with space and time) altogether. But I have not the slightest ideas what kind of elementary concepts could be used in such a theory."*
> Letter from A. Einstein to D. Bohm, October 28, 1954

L'approche développée ici correspond à une modélisation discrète de l'espace et du temps sous forme de quantités géométriques qui sont irréductibles à un point et à un instant ; l'espace sera défini par un segment Γ de longueur d entre les extrémités a et b et le temps discret est caractérisé par le laps de temps dt.

Les concepts fondateurs du milieu continu sont abandonnés, le référentiel global, l'intégration, la dérivation en un point, les outils mathématiques de l'analyse, etc. La dérivation de la loi fondamentale de la dynamique discrète est entièrement basée sur des expériences élémentaires fondamentales [2]. C'est avant tout un modèle physique qui établit l'équation du mouvement sous forme d'une équation différentielle où les opérateurs discrets possèdent les propriétés essentielles pour satisfaire les principes fondamentaux de la physique.

Les opérateurs différentiels discrets de l'équation du mouvement conduisent à définir deux comportements. Celui de milieu continu tout d'abord lorsque la distance caractéristique d tend vers zéro, la loi du mouvement devient une équation différentielle classique. D'un autre point de vue les opérateurs discrets sont interprétés pour construire directement un système algébrique dont le résultat représentera une solution approchée de l'équation. En fait le discret n'est pas une restriction du continu, c'est une vision primaire.

2 Bases de la mécanique discrète

2.1 Loi de la dynamique discrète

La mécanique discrète est basée sur des principes et postulats classiques de la physique ; l'un des plus emblématiques est le principe d'équivalence introduit par G. Galilée qui attribue un effet équivalent à l'accélération gravitaire et à celui due à l'inertie. Ce principe aujourd'hui nommé Principe d'Equivalence Faible (WEP) a été vérifié par de nombreuses expériences quantifiées par le rapport d'Eötvös $\eta = 2\ |\gamma_1 - \gamma_2| \,/\, |\gamma_1 + \gamma_2|$ où γ_1 et γ_2 sont les accélérations des deux masses. La mesure de l'accélération est indépendante de tout référentiel et peut se faire avec une grande précision absolue. L'état actuel conduit à estimer que le WEP est exact avec un rapport d'Eötvös $\eta < 10^{-17}$; l'exposé de C.M. Will [3] cite les différentes expériences menées depuis un siècle. En 1905 A. Einstein en fera un principe fort en énonçant que les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens et en lui adjoignant la limitation de la vitesse à la célérité de la lumière comme une conséquence. Pour les seuls effets gravitationnels ce principe permet d'éliminer la masse de la seconde loi de Newton pour obtenir une égalité entre l'accélération du milieu et l'accélération gravitaire. En fait la loi fondamentale de la dynamique sous une forme plus moderne $\rho\,\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{f}$ où $\mathbf{f}$ est la somme des forces volumiques appliquées au milieu est modifiée en mécanique discrète pour s'écrire :

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{g} \tag{1}$$

où $\mathbf{g}$ est la somme des forces par unité de masse soit une accélération.

La notion de force utilisée par I. Newton possède certes une valeur pratique indéniable mais associer la masse à la vitesse pour obtenir $\mathbf{p} = m\,\mathbf{V}$ la quantité de mouvement dont la dérivée particulaire est à la base de la formulation moderne de la loi de la dynamique exprimant la conservation de la quantité de mouvement est discutable. Si la masse peut être supprimée pour les effets gravitationnels, elle peut l'être aussi pour l'ensemble des autres phénomènes physiques. La loi (1) devient le principe fondamental de la dynamique, elle exprime que l'accélération d'une particule dotée ou non d'une masse (le photon) est égale à la somme des accélérations qui lui sont appliquées.

Un autre fondement de la mécanique discrète est la décomposition de Hodge-Helmholtz ; celle-ci établit que tout vecteur est la somme d'une

composante solénoïdale à divergence nulle et d'une autre irrotationnelle. Une troisième composante est quelquefois associée, c'est un terme qui est à la fois à divergence nulle et à rotationnel nul ou constant. Le vecteur est ainsi la somme d'un gradient d'un potentiel scalaire ϕ et d'un rotationnel d'un potentiel vectoriel $\boldsymbol{\psi}$; ceux-ci ne sont définis qu'à des fonctions harmoniques près, la décomposition n'est pas unique et dépend des conditions aux limites. Il existe de nombreux potentiels en physique et tous n'ont pas la même importance. En mécanique discrète le vecteur considéré est l'accélération une quantité absolue dans un référentiel local, elle s'écrit naturellement :

$$\boldsymbol{\gamma} = -\nabla\phi + \nabla \times \boldsymbol{\psi} \tag{2}$$

Toute la physique ondulatoire est basée implicitement sur cette relation, les termes du membre du second membre sont issus de champs orthogonaux ; les opérateurs gradient et rotationnel dual projettent ces champs sur le même segment Γ et la somme de ces deux contributions est l'accélération subie par le milieu. Par exemple en électromagnétisme les champs électrique $\mathbf{E}$ et magnétique $\mathbf{B}$ sont orthogonaux entre eux à tout instant et eux-mêmes orthogonaux au vecteur d'onde $\mathbf{k}_0$; ainsi un courant peut être appliqué à partir d'une différence de potentiel ou produit par induction à partir d'un champ magnétique. L'unification des lois de la physique macroscopique est ainsi envisagée sous l'angle ondulatoire pour tout phénomène de quelque nature qu'il soit, mécanique, acoustique, électrique, magnétique ou optique.

2.2 Equation du mouvement discrète

L'équation du mouvement discrète est dérivée à partir de l'équation de conservation de l'accélération (2) en exprimant les déviations des potentiels ϕ et $\boldsymbol{\psi}$ en fonction de la vitesse $\mathbf{V}$. Ces déviateurs sont obtenus sur la base de l'analyse physique des processus de stockage-déstockage des énergies de compression et de cisaillement ; la première s'écrit comme la divergence de la vitesse et la seconde comme un rotationnel primal de la vitesse. La modélisation physique de ces termes est développée au sein d'un ouvrage consacré à la mécanique discrète [2].

L'équation vectorielle du mouvement et ses mises à jour s'écrivent :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\gamma} = -\nabla\left(\phi^o - dt\, c_l^2\, \nabla\cdot\mathbf{V}\right) + \nabla\times\left(\boldsymbol{\psi}^o - dt\, c_t^2\, \nabla\times\mathbf{V}\right) + \mathbf{g} \\ \alpha_l\, \phi^o - dt\, c_l^2\, \nabla\cdot\mathbf{V} \longmapsto \phi^o \\ \alpha_t\, \boldsymbol{\psi}^o - dt\, c_t^2\, \nabla\times\mathbf{V} \longmapsto \boldsymbol{\psi}^o \\ \mathbf{V}^o + \gamma\, dt \longmapsto \mathbf{V}^o \end{cases} \tag{3}$$

Les quantités ϕ^o et $\boldsymbol{\psi}^o$ sont les potentiels d'équilibre, ceux-là même qui permettent à l'équation d'être satisfaite exactement aux instants discrets t et $t + dt$; c_l et c_t sont les célérités longitudinale et transversale, des quantités intrinsèques au milieu qui peuvent varier en fonction de paramètres physiques. Les termes $dt\, c_l^2\, \nabla\cdot\mathbf{V}$ et $dt\, c_t^2\, \nabla\times\mathbf{V}$ sont respectivement les déviateurs des effets de compression et de cisaillement. Le second membre est ainsi composé de deux oscillateurs où ϕ^o et $\boldsymbol{\psi}^o$ qui représentent des énergies par unité de masse échangent celles-ci avec leurs déviateurs respectifs. Les deux termes en gradient et en rotationnel dual sont orthogonaux et ne peuvent échanger de l'énergie directement ; si un déséquilibre dû à un évènement extérieur survient sur l'un de ces effets alors c'est l'accélération qui est modifiée et l'énergie est alors redistribuée vers l'autre terme. L'accélération $\mathbf{g}$ représente la gravité ou tout autre quantité source et s'écrira aussi sous la forme d'une décomposition de Hodge-Helmholtz.

Les paramètres physiques α_l et α_t sont les coefficients d'atténuation des ondes de compression et de cisaillement. Ils ne dépendent aussi que du milieu considéré, par exemple un fluide newtonien ne conserve les contraintes de cisaillement que pour des constantes de temps de relaxation très faibles, d'ordre de grandeur de 10^{-12} s et le coefficient α_t peut être pris égal à zéro. La mise à jour des potentiels au temps $t+dt$ est ainsi affectée par ces coefficients compris entre zéro et l'unité. La vitesse et éventuellement le déplacement $\mathbf{U}$ sont upgradés à leur tour. Dans le cas où la masse volumique n'est pas constante elle est aussi remise à jour en utilisant la conservation de la masse sous la forme $\rho = \rho^o - dt\, \rho^o\, \nabla\cdot\mathbf{V}$, cette quantité n'est effectivement fonction que de la divergence de la vitesse.

En mécanique des milieux continus, l'accélération $\boldsymbol{\gamma}$, la dérivée particulaire de la vitesse s'écrit $\partial\mathbf{V}/\partial t + \mathbf{V}\cdot\nabla\mathbf{V}$ ou bien en utilisant le vecteur

de Lamb $\partial \mathbf{V}/\partial t - \mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{V} + \nabla \left(\|\mathbf{V}\|^2/2 \right)$. Ces expressions ne peuvent pas être transformées en une décomposition de Hodge-Helmholtz, la notion de tenseur étant inexistante en mécanique discrète. L'inertie est alors interprétée suivant sur le postulat suivant : si un effet direct représenté par le gradient d'un potentiel scalaire, ici $\phi_i = \|\mathbf{V}\|^2/2$ le potentiel inertiel, existe, alors son effet dual représenté par le rotationnel dual du vecteur $\boldsymbol{\psi}_i = \|\mathbf{V}\|^2/2\,\mathbf{n}$ existe aussi. Ces termes non linéaires sont déjà présents dans certaines lois comme la seconde loi de Bernoulli, l'expression donnée ici ne fait que généraliser les effets inertiels dans un espace à trois dimensions de manière cohérente à la formalisation de l'équation du mouvement elle-même. Elle représente physiquement l'advection de la vitesse par elle-même indépendamment de la masse de la particule. Comme la vitesse, les potentiels ϕ et $\boldsymbol{\psi}$ doivent être advectés ; l'écriture du système (3) permet de bien séparer la phase lagrangienne d'upgrades des potentiels de la phase d'advection eulérienne qui est d'une toute autre signification physique.

3 Invariance relativiste et mécanique discrète

Depuis 1905 de nombreux ouvrages spécialisés ou de vulgarisation ont été consacrés à la théorie de la relativité. Citons celui de de Broglie [4] l'un des acteurs directs de cette physique en mouvement qui en trace les contours avec beaucoup de clarté. Sans entrer dans la genèse de la théorie de la relativité et des apports respectifs de Max Planck, Henri Poincaré, Hendrick Lorentz, Albert Einstein et de bien d'autres il faut constater l'importance de la transformation de Lorentz qui est synthétisée par le facteur $\gamma = 1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ qui fixe la limitation de la vitesse à celle de la lumière. L'invariance des équations de Maxwell par la transformation de Lorentz a été à l'origine de développements importants par la suite.

En relativité restreinte la seconde loi de Newton ne conserve son sens qu'en introduisant une modification de la masse en mouvement $m_r = m_0/\gamma$. Même si son interprétation a quelque peu changé depuis sa formulation en introduisant la quantité de mouvement, l'équivalence masse-énergie induit *de facto* un transfert. En mécanique relativiste la limitation de la vitesse à celle de la lumière correspond à l'augmentation de la masse en mouvement lorsque la vitesse augmente. Cet effet est interprété physiquement en attribuant une inertie plus grande à vitesse croissante, il s'oppose donc toujours plus à une accélération supplémentaire.

Le système (3) suggère une autre interprétation de la limitation de la vitesse matérielle basée sur l'énergie. En effet l'équation discrète du mouvement a pour inconnue la vitesse $\mathbf{V}$ mais c'est l'accélération $\boldsymbol{\gamma}$ et les potentiels ϕ^o et $\boldsymbol{\psi}^o$ qui en sont les véritables quantités physiques recherchées. Notamment le potentiel ϕ^o est un énergie par unité de masse qui varie au cours du mouvement en fonction des variations de la vitesse. Plus précisément ϕ^o est mis à jour à partir de $-c^2\,\nabla\cdot\mathbf{V}$, si la divergence augmente l'énergie stockée diminue. La divergence est associée généralement à la variation relative de volume d'un milieu matériel en milieu continu ; mais de fait, la divergence de la vitesse est une quantité purement cinématique liée au mouvement et non à l'objet. Ainsi cette notion garde son sens pour une particule que l'on suit dans son mouvement, par exemple du/dx pour un mouvement rectiligne dans la direction considérée. L'équation (3) exprime donc la conservation de l'énergie. En mécanique discrète l'énergie disponible est égale à $e = m\,\phi^o = m\,c^2$ conformément à léquivalence entre masse et énergie. Quant à la masse en mouvement elle s'écrit sous une forme discrète $m = m^o - dt\,m^o\,\nabla\cdot\mathbf{V}$ où m^o est la masse à l'équilibre mécanique à l'instant t^o. Il convient d'interpréter cette expression avec précaution en évitant les raisonnements simplistes.

Alors comment la vitesse d'une particule ou d'un milieu matériel ne peut dépasser la célérité de la lumière ? L'explication tient dans la variation de la divergence de la vitesse au cours du temps. Si aucun événement ne vient modifier l'équilibre mécanique représenté par le système (3), le mouvement devient incompressible et la divergence tend vers zéro. Corrélativement l'accélération tend aussi vers zéro et l'énergie devient constante. Si ce résultat est conforme à la théorie de la relativité il n'est pas inscrit dans une quelconque transformation, il traduit la conservation de l'énergie. Il faut préciser que la vitesse n'est limitée par la célérité du milieu que pour un mouvement rectiligne ; en présence d'une courbure importante comme celles induites par un trou noir, le résultat est à reconsidérer.

4 Deux cas emblématiques

4.1 Particule soumise à une accélération constante

Lorsqu'une particule ou un milieu continu est soumis à une accélération constante $\mathbf{g}$ dans une direction privilégiée x la vitesse $u(x) = \mathbf{V}\cdot\mathbf{e}_x$ augmente. En mécanique newtonienne la vitesse augmente linéairement

$u(t) = g\,t$ alors qu'en relativité la vitesse est $u(t) = g\,t/\sqrt{(1+g^2\,t^2/c^2)}$. La divergence de la vitesse de la particule peut être alors calculée dans les deux cas :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial x} = \dfrac{\gamma}{u} = \dfrac{1}{t} \\[2ex] \dfrac{\partial u}{\partial x} = \dfrac{\gamma}{u} = \dfrac{1}{t}\left(1+\dfrac{g^2t^2}{c^2}\right)^{-1} \end{cases} \tag{4}$$

La divergence de la vitesse diminue et tend vers zéro dans les deux cas ; on retrouve bien entendu le même résultat lorsque la vitesse est très faible devant la célérité $\nabla\cdot\mathbf{V} \approx 1/t$. Cette quantité est de première importance en physique, elle traduit en particulier la croissance apparente de la masse dans un mouvement rectiligne accéléré.

Sur le fond, la dynamique, qu'elle soit newtonienne, relativiste ou discrète doit permettre de retrouver les phénomènes physiques. Considérons par exemple, dans ces trois concepts, le cas d'un milieu ou d'une particule soumise à une force constante qui peut s'écrire sous la forme $\mathbf{F} = m_0\,\mathbf{g} = m_0\,\nabla\phi_g = Cte$ où m_0 est la masse au repos ; la masse relativiste est quant à elle $m_r = \gamma\,m_0$ avec γ le facteur de Lorentz. En une dimension où $u = \mathbf{V}\cdot\mathbf{e}_x$, l'équation de la dynamique s'écrit sous les trois formes :

$$\begin{cases} m_0\,\dfrac{d\mathbf{V}}{dt} = m_0\,\nabla\phi_g \\[2ex] \dfrac{d(m_r\,\mathbf{V})}{dt} = m_0\,\nabla\phi_g \\[2ex] \dfrac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla\left(\phi^o - dt\,c_l^2\,\nabla\cdot\mathbf{V}\right) + \nabla\phi_g \end{cases} \tag{5}$$

Lorsque le temps devient infini on a :

- en dynamique newtonienne $\mathbf{V} \to \infty$;
- en dynamique relativiste $\mathbf{V} \to c$ comme une conséquence du principe de relativité ;
- en dynamique discrète $\mathbf{V} \to c$ parce que $\nabla\cdot\mathbf{V} \to 0$ et $\phi^o \to c^2$ à l'issue du processus incrémental.

Chaque concept fondamentalement différent des deux autres ne remet pas en cause le précédent, il traduit un autre point de vue.

4.2 Déflexion de la lumière par le soleil

L'objectif est de montrer que l'équation du mouvement issue de la mécanique discrète permet de retrouver le premier résultat majeur de la théorie de la relativité, la déflexion de la lumière par le soleil.

Considérons dans un premier temps le cas dit de la "mécanique newtonienne" où l'équation du mouvement s'écrit :

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{\mathcal{G}\, M_{\odot}}{r^2}\, \mathbf{e}_r \tag{6}$$

où $\mathcal{G} = 6.6738480\ 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$ est la constante universelle de la gravitation, $M_{\odot} = 1.99\ 10^{30}\ kg$ la masse du soleil et $R = 6.95\ 10^8\ m$ son rayon moyen. La quantité $\mathbf{e}_r$ est le vecteur unitaire dont la direction est définie entre le centre du soleil et la particule. La célérité c est bien entendu absente de ce résultat mais en supposant que la vitesse initiale V_o est égale à la célérité de la lumière on trouve $\Phi = 4.250\ 10^{-6}\ rd$ soit $\Phi = 0.875''$ d'arc ; cette valeur est obtenue à la fois par un calcul analytique en coordonnées polaires et par une simulation numérique. La valeur mesurée par Eddington en 1919 [5] était de $\Phi = 1.75''$ d'arc soit précisément le double.

L'hypothèse d'action duale de la mécanique discrète [2] postule que tout potentiel scalaire de la physique ϕ_s s'écrit comme la somme d'un gradient de celui-ci et d'un rotationnel dual d'un potentiel vecteur égal à $\boldsymbol{\psi}_s = \nabla \times (\phi_s\, \mathbf{n})$. Le potentiel gravitaire ϕ_g et l'accélération correspondante $\boldsymbol{\gamma}_g$ prennent les formes :

$$\begin{cases} \phi_g = \dfrac{\mathcal{G}\, M_{\odot}}{r} \\[2ex] \boldsymbol{\gamma}_g = \nabla \left(\dfrac{\mathcal{G}\, M_{\odot}}{r} \right) + \nabla \times \left(\dfrac{\mathcal{G}\, M_{\odot}}{r}\, \mathbf{n} \right) \end{cases} \tag{7}$$

Les deux contributions de $\boldsymbol{\gamma}_g$ sont issues d'opérateurs orthogonaux mais leurs projections dans un espace à trois dimensions sont égales et de même signe si le soleil est considéré comme une sphère de rayon moyen R. Dès lors le second membre de l'équation de la mécanique newtonienne (6) est doublé et on trouve la valeur de la déviation $\Phi = 1.75''$ d'arc soit le résultat prédit par A. Einstein, mesuré par Eddington en 1919 et confirmé par des expériences plus récentes. La notion de courbure d'espace-temps introduite en relativité générale permet d'expliquer

la déflexion de la lumière par le soleil. En fait c'est la gravitation qui courbe l'espace-temps dans un espace à trois dimensions. Ce problème est à rapprocher de celui très simple de la courbure d'une sphère égale au double de celle d'un cylindre. La mécanique newtonienne ne fait apparaître que la contribution $\nabla\phi_g$ dans l'équation (6) alors que les photons sont soumis à une accélération gravitationnelle qui est le double de celle-ci.

Cette solution due à la mécanique discrète paraît triviale mais elle recouvre la même notion de courbure que la mécanique relativiste. En effet les deux contributions de $\boldsymbol{\gamma}_g$ permettent d'évaluer les courbures κ_l et κ_t dans deux directions orthogonales ; la somme de ces courbures principales représente la courbure totale $\kappa = \kappa_l + \kappa_t$; le résultat ne dépend pas des directions orthogonales choisies.

5 Conclusions

L'unification des lois de la physique est un objectif dont on ne sait aujourd'hui s'il peut être approché ou même s'il est légitime. Cette contribution montre que les équations de la mécanique discrète, pour les fluides et les solides, peuvent être perçues comme des équations de propagation, celles de l'électromagnétisme et de l'optique ondulatoire. En abandonnant des concepts qui obèrent la généralisation des lois, en premier lieu la notion de milieu continu, l'équation du mouvement est ré-établie à partir des intuitions de Galilée, l'équivalence des masses liées à la gravité et à l'inertie ainsi que la notion de relativité.

L'unification n'est rendue possible qu'en adoptant les concepts suivants :

- l'espace discret est composé de points, segments et surfaces non réductibles à un point et les interactions des différentes quantités définies sur ce référentiel local sont de cause à effet ;
- il existe un temps qui s'écoule positivement par étapes discrètes d'amplitude dt séparant deux états d'équilibre mécanique définies par la satisfaction de l'équation du mouvement ;
- l'introduction des potentiels de l'accélération qui représentent le passé de l'évolution du système ; ceux-ci sont considérés comme des stockages de l'énergie ;
- le temps, les longueurs, la masse, l'accélération ne dépendent pas explicitement de la vitesse ;
- en général, la vitesse du milieu ou de la particule n'est plus limitée par la célérité de la lumière dans le vide comme la fixe la transfor-

mation de Lorentz ; si la vitesse tend vers la célérité du milieu en l'absence de courbure c'est que l'accélération devient nulle.

L'équation du mouvement de la mécanique discrète intègre les effets physiques nécessaires pour retrouver tous les comportements observés et décrits par la mécanique, l'électromagnétisme et l'optique. Cette approche ondulatoire de la physique s'applique directement à la description de particules isolées avec ou sans masse. L'équation du mouvement discrète obéit aux principes fondamentaux, indifférence matérielle, relativité, etc. Elle fait apparaître les deux potentiels scalaire et vectoriel de l'accélération du milieu ou de la particule et toutes les quantités ne s'écrivent qu'avec deux unités fondamentales, la longueur et le temps.

Références

[1] D. Greespan, *Discrete Physics with Conservation and Galilean Invariance*, Mathematical and Computer Modelling, **38**, 1-12, (2003).

[2] J.-P. Caltagirone, *Discrete Mechanics, concepts and applications*, London, ISTE, John Wiley & Sons, 2019.

[3] C.M. Will, *The Confrontation Between General Relativity and Experiment* , Space Sci. Rev., **148**, 3-13, (2009).

[4] L. de Broglie, *Diverses questions de mécanique et de thermodynamique classiques et relativistes. Edition établie d'après un manuscrit de Louis de Broglie*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 1995.

[5] F.W. Dyson, A.S. Eddington, C. Davidson, *A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29,1919* , Philosophical Transactions of the Royal Society of London, **220**, 291-333, (1920).

(Manuscrit reçu le 20 décembre 2018, révisé le 14 février 2019)