

# Tonnelat, Marie-Antoinette

---

## La Relativité avant Einstein

---

Organon 2, 79-103

---

1965

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



Marie-Antoinette Tonnelat (France)

## LA RELATIVITÉ AVANT EINSTEIN

La notion de Relativité est aussi ancienne que la physique<sup>1</sup>. Bien loin de découler, comme on le croit souvent, du Relativisme de Protagoras et des Sophistes, d'une subordination des lois au jugement immédiat de l'individu, la Relativité, à son aboutissement, exprime l'indifférence de cette loi aux situations diverses des observateurs. Le Relativisme, notion aristocratique, supposait hiérarchie et privilèges. Le phénomène semblait relatif à l'individu qui en prenait conscience. La Relativité, idée égalitaire, signifie équivalence et réciprocité. Cette Relativité des observateurs, cette réciprocité de leur mouvement permet la cohérence de la loi.

### RELATIVITÉ ET MÉCANIQUE CLASSIQUE

#### RELATIVITÉ ET CINÉMATIQUE

La cinématique classique laissait subsister, dans son propre domaine, un Relativisme total. En effet, une observable, telle que la position ou la vitesse d'un mobile, est par définition, "relative" à la position et à la vitesse de l'observateur. Les notions de vitesse relative, de mouvement relatif, sont inhérentes à toute mesure.

Les divergences naissent quand il s'agit d'exprimer le lien entre ce Relativisme des observables et les caractéristiques du mouvement.

Selon Aristote, le mouvement qui est altération et changement ne

---

<sup>1</sup> Nous nous attachons ici à développer plus particulièrement la notion de Relativité au XIX<sup>e</sup> siècle. En ce qui concerne l'idée de Relativité avant et pendant la Renaissance on consultera par exemple: M. A. Tonnelat, *Inertie et Relativité dans la physique de Galilée*, Actes du Colloque galiléen d'Histoire et de Philosophie des Sciences. Firenze 1964; aussi: M. A. Tonnelat, *La Relativité galiléenne*. Dans la collection des publications spéciales: *Saggi su Galileo Galilei*. Firenze 1964.

saurait se réduire à ses apparences cinématiques. C'est un phénomène original qui possède sa finalité propre. La notion expérimentale de mouvement relatif n'épuise aucunement l'essence du mouvement.

Au contraire, la physique de Descartes implique une assimilation complète du mouvement à ses apparences cinématiques. Un mouvement est uniquement défini par rapport "aux corps qui touchent celui qu'on dit se mouvoir", à ceux que "nous considérons comme en repos". Il en résulte évidemment une totale réciprocité: "On peut dire qu'une chose se meut ou ne se meut pas selon que l'on considère son lieu diversement".

La notion de vitesse relative instantanée épuise ainsi, dans les perspectives cartésiennes, l'essence même d'un mouvement essentiellement relatif. L'énoncé d'un principe d'inertie qui permet de définir, au moins théoriquement, une classe d'observateurs "libres de contrainte" et, en ce sens, équivalents ne parvient pas encore à préciser l'extension du concept de Relativité.

Cet absolu qui faisait de tout mouvement, fut-il rectiligne et uniforme, un authentique "phénomène", qui en constituait, selon Aristote, l'essence même, reste attaché à des critères plus ou moins vagues, souvent anthropomorphiques, qui en expriment les effets secondaires. "Quand je suis tranquille et qu'un autre, s'éloignant d'un mille, est rouge de fatigue c'est lui qui se meut et moi qui me repose", affirmait Thomas Morus dans une boutade qui a toujours semblé exprimer le fameux bon sens populaire.

#### LA RELATIVITÉ DE GIORDANO BRUNO ET DE GALILÉE

En dehors des effets de mouvement relatif bien évidents, mais impuissants jusqu'ici à définir le caractère absolu d'un mouvement, quels seront les critères qui pourront définir un mouvement vrai?

Les phénomènes invoqués par Thomas Morus expriment le retentissement physiologique et souvent capricieux d'effets physiques qu'il est fort difficile d'analyser et de lier d'une façon nécessaire, universelle, à la définition du mouvement absolu.

Cet absolu ne saurait être l'observable elle-même, notion essentiellement relative, mais ce peut être une relation entre observables. Ce peut être aussi la description d'un phénomène ou bien encore d'un autre mouvement, autrement dit l'énoncé d'une loi. Ainsi le critère que ne pouvait étayer la notion d'observable va être reporté sur les relations entre une série d'observables.

Une opinion de ce genre devait avoir ses bases dans la notion de système physique. Dans les conceptions instaurées par Giordano Bruno un système physique apparaît clairement comme un ensemble de corps liés, non par une même nature, mais par leur participation à un mouve-

ment commun. Deux critères significatifs sont ainsi à la base de la Relativité galiléenne.

D'une part, l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement d'un système physique par des expériences inhérentes à ce système. Le mouvement est "imperceptible" pour l'observateur entraîné, il est "comme rien" <sup>2</sup>. Il n'a donc pas besoin de cause et n'est pas d'une autre nature que le repos.

D'autre part, la nécessité de descriptions identiques. Tout mouvement doit être l'objet d'une même loi énoncée par les observateurs soustraits à ce mouvement. "De telle façon que la vraie manière de rechercher si un mouvement quelconque peut être attribué à la terre et, le cas échéant, lequel est de considérer et d'observer si, dans les corps séparés de la terre, se laisse observer une apparence de mouvement qui convient également à tous" <sup>3</sup>.

Le premier critère définit une "Relativité Physique", c'est-à-dire une équivalence des observateurs à l'intérieur de leur système propre. Elle implique la disparition de tout phénomène spécifique du mouvement dans l'expérience de l'observateur entraîné <sup>4</sup>. Le second implique une "Relativité Cinématique", c'est-à-dire l'équivalence des observations réalisées à partir d'un même phénomène.

Ces deux critères vont être restreints et précisés par l'application du principe d'inertie. Selon ce principe, deux observateurs en mouvement rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre sont soustraits, l'un par rapport à l'autre, à l'action de toute force, de toute contrainte. Ils sont donc dans un état physique identique et constituent des observateurs équivalents.

Galilée sait parfaitement que ces observateurs "libres", et par conséquent équivalents, devraient avoir, l'un par rapport à l'autre, un mouvement rectiligne et uniforme. "Si cet espace (sans inclinaison) était sans terme, le mouvement serait pareillement sans fin, c'est-à-dire éternel" <sup>5</sup>. Mais la Relativité de ces observateurs ne peut être, dans le monde archimédien de Galilée, conçue comme un cas limite mais réalisable. Tout mobile est soumis à la gravité et ne peut, même asymptotiquement, s'en affranchir sans cesser d'être un mobile réel. C'est pourquoi, rejetant les bases mêmes de la future Relativité Restreinte, la Relativité de Galilée s'attache à une topologie de surfaces courbes, équipotentielles,

<sup>2</sup> *Le Opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale*. Vol. 5. Firenze 1932. *Dialogo II*.

<sup>3</sup> *Op. cit.*, p. 139.

<sup>4</sup> Ceci n'entraîne pas forcément la négation d'effets spécifiques du mouvement au sein d'un système propre mais l'impossibilité de les mettre en évidence. On peut concevoir qu'une modification pourrait altérer de façon analogue l'objet mesuré et l'appareil de mesure.

<sup>5</sup> *Le Opere di Galileo Galilei, op. cit.*, p. 172.

dirions-nous actuellement, de la gravité. Dans cet univers obtenu par une simplification du monde réel mais toujours déduit du monde réel, l'équivalence des observateurs libres présente déjà une analogie avec les intuitions einsteiniennes de 1912.

#### RELATIVITÉ RESTREINTE ET PRINCIPE D'INERTIE

En se rapportant à la physique de Galilée deux observateurs, et les systèmes physiques qu'on peut leur attacher, sont susceptibles de satisfaire un authentique principe de Relativité Physique et Cinématique.

D'une part, aucune expérience réalisée sur l'un ou sur l'autre de ces systèmes ne permet de déceler son mouvement relatif. La loi qui régit un phénomène du système propre est indifférente au mouvement relatif de ce système: le mouvement est entièrement relatif pour l'énoncé de cette loi.

D'autre part, les descriptions d'un même phénomène données par ces deux observateurs sont équivalentes, s'ils se trouvent "également privés" du mouvement propre auquel est dû ce phénomène, s'ils se trouvent dans une situation physique équivalente par rapport à lui.

Cette équivalence ne peut devenir une Relativité Restreinte systématique qu'en englobant le principe d'inertie dans une dynamique appropriée. D'après celle-ci tout corps possédant une accélération, c'est-à-dire une vitesse variable en grandeur ou en direction, est soumis à une force. Il en résulte que deux observateurs dont la vitesse relative est variable subissent, l'un par rapport à l'autre, l'action de cette force. L'existence de contraintes introduit ainsi une dissymétrie dans leur situation physique respective et va s'opposer:

d'une part à la Relativité Physique du système accéléré; tout phénomène lié à ce système — et sa description dans le système propre — seront en effet modifiés par l'existence des contraintes;

d'autre part à l'unicité de la description d'un phénomène extérieur à ces deux systèmes. Un observateur accéléré n'attribuera plus la même loi au phénomène et, éventuellement, au mouvement qu'il observe.

C'est donc la dynamique qui permet l'avènement d'un authentique principe de Relativité Restreinte: Relativité car il s'agit bien d'une équivalence des observateurs, Restreinte car cette équivalence est limitée à une classe d'observateurs privilégiés: ceux qui sont animés d'un mouvement relatif rectiligne et uniforme et, de façon idéale, ceux dont le mouvement ressort d'un principe d'inertie.

La notion même d'observateur privilégié ou de classe privilégiée est, bien entendu, la porte ouverte à une nouvelle mais très différente entrée en scène des absolus.

Il est facile de définir et de vérifier le caractère rectiligne et uniforme d'un mouvement tant que celui-ci est purement relatif. Il est par contre impensable de le considérer "en lui-même" comme rectiligne et uniforme, justiciable, par conséquent, de l'application stricte du principe d'inertie: le mouvement d'une bille peut être rectiligne et uniforme par rapport à la surface de la table. Il ne l'est certainement pas par rapport au soleil. Dans quelle mesure pourrions-nous dire alors que cette bille est soustraite à l'action de toute force? Que son mouvement est déductible du principe d'inertie?

En fait, nous ne connaissons que des approximations de systèmes inertiels. Les murs du laboratoire forment un système d'inertie pour les phénomènes qui s'y déroulent. Les droites joignant la terre à trois étoiles fixes constituent un système d'inertie suffisamment approché pour la description des phénomènes terrestres. La détermination d'un système d'inertie ressort ainsi de l'expérience même. On pourrait alors, selon Lange, matérialiser tout système d'inertie par les trajectoires de 3 points matériels supposés libres *a priori*.

Pour fonder "en droit" la notion d'observateur libre, c'est-à-dire pour justifier une application rigoureuse d'un principe de Relativité, il faudrait pouvoir montrer qu'un système est ou n'est pas soumis à l'action d'une force réelle. En distinguant les forces "réelles" productrices d'effets physiques des "forces fictives" dues à un choix défectueux du système de référence, Newton postulait que des effets physiques associés aux forces réelles pouvaient toujours déceler l'existence de forces vraies, de mouvements absolus et, par conséquent, mettre en évidence l'équivalence approchée des systèmes d'inertie.

D'après les *Principia*, les forces réelles sont irréductibles à un choix différent du système de référence et produisent des effets absolus: ainsi le ménisque de l'eau contenue dans un sceau se déforme avec la rotation du récipient. Au contraire, il reste indépendant de la rotation du système de référence constitué par la margelle du puits. Néanmoins — et bien avant les critiques d'Einstein — il apparaissait que le choix d'un système de référence adapté à la disparition de toute force "fictive" ne pouvait être qu'approximatif. Pour fonder la rigueur du principe d'inertie, il fallait donc supposer que sa validité stricte devait être assurée pour un observateur en repos absolu et pour l'infinité d'observateurs en mouvement rectiligne et uniforme par rapport à lui.

Ainsi conçus l'espace, le temps, le mouvement absolu de la physique newtonienne sont des notions asymptotiques. Selon Euler l'"espace absolu est le garant de la validité du principe d'inertie". La dynamique newtonienne fonde ainsi, sur une notion limite, l'introduction d'une classe d'observateurs privilégiés dont le mouvement, strictement inertielle, garantit la totale équivalence. Entre les observateurs de cette

classe un principe de Relativité (absolu si l'on peut dire) est rigoureusement valable: les lois de la physique ont la même forme dans tous les systèmes qui leur sont attachés (Relativité Physique); un même phénomène se retranscrit de la même façon pour chacun d'eux (Relativité Cinématique). Il s'agit d'une Relativité Restreinte, restreinte non pas dans sa signification mais dans son extension car elle s'applique à une certaine catégorie de mouvements (rectilignes et uniformes).

Bien entendu, l'expérience ne peut conduire qu'à une Relativité approximative mais le principe de Relativité Restreinte, comme celui d'inertie auquel il est lié, devient "de droit" la base même de la mécanique newtonienne.

Jusqu'en 1912, cette Relativité Restreinte va se maintenir dans le domaine de la mécanique en face des mouvements absolus que manifestent les accélérations issues de forces réelles: telles sont, par exemple, les actions de gravitation ou bien encore les mouvements accélérés que révèlent les expériences relatives au pendule de Foucault<sup>6</sup> ou bien encore, dans le domaine de l'optique, celles de Harres, Sagnac et Pogany<sup>7</sup>.

Les mécaniciens de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle ne pourront manquer de s'étonner de ces dérogations au principe de Relativité. La rotation de la terre que traduit la variation du plan d'oscillation du pendule de Foucault est définie encore par rapport au fantôme de l'espace absolu. Pour éviter cette conclusion, il faut admettre que tous les effets d'accélération (forces d'inertie) traduisent des interactions avec des masses cachées (hypothèse de Hertz) ou bien encore avec des masses lointaines (hypothèse de Mach). Les forces d'inertie représentent ainsi des actions de moindre contrainte ou bien encore des actions gravitationnelles sous-jacentes. En admettant l'existence de masses sans interaction, tous les systèmes seraient équivalents et une Relativité Générale gouvernerait la mécanique.

On sait l'aboutissement de cette idée: si l'on peut réduire localement l'une à l'autre les forces d'inertie et les forces de gravitation, si l'on peut, localement aussi, les absorber dans la structure de l'espace-temps, on définira dans cet espace-temps courbe, des référentiels équivalents. Leur retranscription dans un même espace euclidien permettra d'énoncer, sans jeu de mot, une Relativité Généralisée locale. Tel sera le sens de la réforme qu'Einstein proposera en 1916: la Relativité Générale.

---

<sup>6</sup> Le plan d'oscillation d'un pendule tourne en suivant la rotation de la terre dans l'espace absolu.

<sup>7</sup> Les chemins optiques, géométriquement égaux, diffèrent avec le sens de parcours, sur la circonférence d'un disque en rotation.

RELATIVITÉ ET ÉLECTROMAGNÉTISME AU XIX<sup>e</sup> SIÈCLE

## MOUVEMENT RELATIF ET PROPAGATION DE LA LUMIÈRE DANS UN MILIEU

Le principe de Relativité classique postule l'impossibilité de détecter le mouvement d'un système d'inertie par des expériences de mécanique réalisées à bord de ce système. Par contre, il est toujours possible de mettre en évidence le mouvement d'un système par rapport à un autre, et ce "mouvement relatif" s'exprime par la loi de composition des vitesses de la mécanique classique.

Or la composition des vitesses de deux mobiles ne dépend pas de leur nature. À cet égard, la lumière, constituée de photons, semble un mobile comme les autres. Il paraît donc naturel de considérer les phénomènes de propagation de la lumière comme un cas particulier de la cinématique classique.

La nature — corpusculaire ou vibratoire — des phénomènes lumineux a semblé ainsi, pendant longtemps, n'avoir aucune incidence particulière sur la notion de Relativité. Depuis Römer (1676), on savait que la lumière se propage avec une vitesse finie et l'on pensait — sans l'avoir précisément vérifié — que cette vitesse satisfaisait, comme celles des projectiles, aux lois de la cinématique classique.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'étude plus approfondie des phénomènes de polarisation et de diffraction conduisit Fresnel à préciser les hypothèses cinétiques sur la nature de la lumière. Formée par des ondes transversales, la lumière doit se propager dans un éther dont les propriétés mécaniques restent assez étranges.

Il était tout à fait naturel de supposer que le mouvement est sans influence sur le déroulement des phénomènes optiques du système propre.

Dans une célèbre expérience de pensée, on avait comparé la vitesse des boulets tirés vers l'Est et vers l'Ouest, le canon étant entraîné par le mouvement de la terre. La relativité du mouvement est alors assurée par une hypothèse implicite: la vitesse des boulets dépend du mouvement de la source<sup>8</sup>.

S'il s'agit de phénomènes lumineux, cette hypothèse est équivalente à un entraînement total de l'éther par la matière en mouvement<sup>9</sup>. La vitesse de la lumière reste en effet la même pour tous les observateurs liés à la source, quel que soit son mouvement. Ainsi la vitesse de nageurs identiques ne change pas pour des observateurs corrélés de la même

<sup>8</sup> En effet pour un observateur extérieur au système  $c' = c \pm v$ ; pour un observateur lié au système  $c'' = c = ct$ .

<sup>9</sup> Telles sont les expressions obtenues à partir de [2] et de [3] pour  $\alpha = 1$  (entraînement total de l'éther).



manière avec ce mouvement. Qu'on expérimente depuis les rives d'un lac tranquille, ou bien dans un navire — porteur de piscines (analogue à la terre portant le canon), ou bien encore dans un navire qui draine totalement l'eau du lac (entraînement total de l'éther), aucune modification ne peut être décelée.

Pour conserver la Relativité du mouvement à l'égard d'expériences d'optique, les hypothèses les plus simples étaient donc :

— soit de supposer que la vitesse de la lumière, comme celle des projectiles, peut se composer avec la vitesse de la source ;

— soit de postuler que l'éther est totalement entraîné par le mouvement des corps réfringents qu'il pénètre.

La première, imaginée par W. Ritz<sup>10</sup>, est immédiatement mise en échec par l'observation des étoiles doubles. Le mouvement relatif de la composante satellite d'une étoile double devrait entraîner une variation périodique de la vitesse de la lumière émise. Ainsi pourrait-on constater une multiplicité d'images simultanées provenant de la position successive du satellite. L'expérience<sup>11</sup> contredit de telles prévisions.

La seconde fut très vivement soutenue par Hertz dans le cas des phénomènes d'optique, par Stokes dans le cas des ondes électromagnétiques. Là encore, elles étaient en désaccord avec les résultats extrapolés à partir de l'électrodynamique des diélectriques en mouvement : dans le vide l'éther devait être immobile.

Ce résultat était d'ailleurs corroboré par l'étude des phénomènes d'aberration<sup>12</sup>. Un observateur lié au mouvement de la terre sur son orbite constate l'influence de ce mouvement sur la vitesse de propagation de la lumière, vitesse rapportée à ce système entraîné.

Cette constatation signifie que l'éther constitue un système de référence autonome et immobile, tout au moins à l'extérieur des corps réfringents. Dans ces conditions, un observateur du système mobile mesure dans son système de référence une vitesse de la lumière :  $\vec{c}' = \vec{c} \pm \vec{v}$ .

Les expériences d'aberration manifestent ainsi les variations de l'orientation de  $\vec{v}$  par rapport à  $\vec{c}$  au cours de l'année et, par conséquent, des variations de  $\vec{c}'$ . Ainsi la nature semble refuser, par principe, les solutions simples qui pouvaient étayer un authentique principe de Relativité.

<sup>10</sup> "Annales de Chimie et de Physique", XIII, 1908, p. 145.

<sup>11</sup> Cf. les expériences de Tomashek : "Annalen der Physik", LXXIII, 1924, p. 105 ; LXXVIII, 1925, p. 743 ; LXXX, 1926, p. 509 ; LXXXIV, 1927, p. 161.

<sup>12</sup> Ce phénomène, découvert par J. Bradley en 1728 (cf. : "Philosophical Transactions", XXXV, 1728, p. 637), est le suivant : au cours de l'année, l'image d'une étoile fixe donnée par une lunette décrit une petite ellipse dans le plan focal ; cette trajectoire résulte de la composition de deux vitesses : la vitesse de la lumière dans la direction source — lunette, celle de l'observateur dans son mouvement (sensiblement rectiligne et uniforme pendant un court instant) autour du soleil.

Il nous faut maintenant insister sur l'incidence souvent mal comprise de l'hypothèse d'un éther immobile sur un authentique principe de Relativité.

Toutes les expériences réalisées par un observateur entraîné consistent à détecter un mouvement relatif. Elles reviennent à réaliser des mesures qui portent d'un système (celui de l'observateur) sur l'autre (la lumière cheminant avec la vitesse  $c$  dans l'éther immobile). Il serait donc tout à fait naturel d'obtenir, par de telles expériences, la manifestation d'un mouvement relatif.

Les difficultés surgissent en notant que la vitesse  $c$  de la lumière dans l'éther immobile est, en principe <sup>13</sup>, indépendante du mouvement de la source. La vitesse  $c \pm v$  mesurée par un observateur entraîné ne dépend donc que de  $v$ . Elle est identique pour une source stellaire ou, au contraire, pour une source terrestre liée au système entraîné. Dans les deux cas, les expériences portent, comme nous l'avons dit, sur un second système de référence (la lumière) corrélié à l'éther immobile. Toutefois, s'il s'agit d'une source stellaire, ce second système coïncide avec le système propre de la source et l'on dira que la vitesse  $v$  mise en évidence est la vitesse relative source/observateur. Telle est la signification, par exemple, des expériences d'aberration.

Au contraire, s'il s'agit d'une source terrestre, le second système n'est pas celui de la source. On dira — dans un langage tout à fait abusif — que des expériences réalisées “à bord du système propre” permettent de mettre en évidence le mouvement absolu par rapport à l'éther. Ce langage est inexact: bien que la source et l'observateur appartiennent au même système propre, les expériences sont effectuées sur un second système de référence corrélié à l'éther immobile; d'autre part, la vitesse ainsi décelée est bien la vitesse relative terre/éther immobile. Mais ici l'éther immobile, dissocié de la source, apparaît comme un système de référence universel, absolu.

En mécanique classique, les expériences destinées à détecter un mouvement relatif ne mettaient aucun système de référence “absolu” à notre portée. Au contraire, l'hypothèse d'un éther immobile — hypothèse nécessaire à l'interprétation des phénomènes d'aberration — nous offre le système de référence formé par un fluide homogène et immobile qui semble constituer la matérialisation — si l'on peut dire — de l'espace absolu. En ce sens, le mouvement relatif par rapport à l'éther immobile sera qualifié de mouvement absolu.

Néanmoins, il ne s'agit pas là — et il faut le souligner — d'un mouvement absolu au sens newtonien. Dire que l'éther est insensible au mouve-

---

<sup>13</sup> Ce principe est corroboré par les expériences de W. de Sitter (cf.: “*Physikalische Zeitschrift*”, XIV, 1913, pp. 429 et 1267) et de O. Lodge (cf.: “*London Transactions*”, A CLXXXIV, 1909, p. 826).

ment des corps ne le pose pas nécessairement en système absolument immobile et l'on pourrait très bien concevoir, par exemple, que l'éther interstellaire soit animé, par rapport au repère asymptotique de Newton, d'un mouvement d'expansion entraînant les corps qui s'y trouvent sans modifier son immobilité par rapport à eux.

LES EXPÉRIENCES SUR L'OPTIQUE DES MILIEUX RÉFRINGENTS MOBILES  
ET SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE DES DIELECTRIQUES EN MOUVEMENT

On pouvait penser, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, qu'un éther immobile, siège des phénomènes lumineux, en assurait la propagation aussi bien dans le vide que dans les milieux réfringents. S'il en était ainsi, les expériences réalisées par un observateur lié au milieu mobile manifesteraient une vitesse de la lumière

$$c' = \frac{c}{n} \pm v$$

quel que soit le mouvement de la source. Les lois de la réfraction obtenues par la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air ( $c'_a = c \pm v$ ) et dans l'eau ( $c'_e = \frac{c}{n} \pm v$ ) seraient donc modifiées par l'intervention de  $v$ . Or, d'après les expériences d'Arago, les lois de la réfraction semblent, au contraire, indépendantes du mouvement des corps réfringents.

Pour interpréter ce phénomène, Fresnel est conduit à supposer que l'éther, immobile à l'extérieur des milieux matériels, subit un entraînement partiel de la part des milieux réfringents qu'il pénètre.

Les vitesses  $c_{le}$  et  $c_{l'e'}$  de la lumière considérée comme un mobile  $l$  et  $l'$  cheminant dans des éthers  $e$  et  $e'$  diversement entraînés par des milieux de même indice <sup>14</sup>, sont les mêmes quand on les rapporte à ces éthers entraînés. En effet, la vitesse d'un mobile entraîné est constante dans le système lui-même entraîné

$$c_{le} = c_{l'e'} = \frac{c}{n} \quad [0]$$

Un observateur peut alors réaliser deux types d'expériences.

1) Les unes sont effectuées par un observateur  $j$  qui ne participe pas au mouvement du corps réfringent. Elles consistent donc à déceler simplement le mouvement relatif d'un autre système de référence; telle est, par exemple, l'expérience de Fizeau destinée à mesurer la vitesse de la lumière dans un courant d'eau  $i$ . Si  $v = v_{ij}$  est la vitesse de l'eau par rapport à l'observateur, la vitesse de l'éther entraîné par l'eau avec

<sup>14</sup> Le premier indice se rapporte au système de référence lié au phénomène observé, le second au système de référence lié à l'observateur.

un coefficient d'entraînement  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) est  $v = \alpha v_{ij} = \alpha v$  par rapport à l'observateur immobile. La vitesse de la lumière par rapport à cet observateur sera donc:

$$c' = c_{ij} = c_{ie'} \pm v_{e'j} = \frac{c}{n} \pm \alpha v \quad [1]$$

2) Les autres peuvent être réalisées par un observateur entraîné avec le milieu transparent, l'un et l'autre ayant la vitesse  $v = v_{je}$  par rapport à l'éther interstellaire immobile. Telles sont, par exemple, toutes les expériences destinées à mettre en évidence l'existence d'un "vent d'éther" dû au mouvement de la terre sur son orbite. Dans le système de l'observateur entraîné, la lumière aura une vitesse <sup>15</sup>

$$c'' = c_{ij} = \frac{c}{n} + (\alpha - 1)v \quad 0 < \alpha < 1 \quad [2]$$

$\alpha$  étant nul pour  $n = 1$  puisque l'éther est immobile dans le vide. Les expressions [0], [1], [2] sont parfaitement compatibles et se rapportent aux différents aspects, trop souvent confondus, d'une même situation.

Les expériences d'Arago <sup>16</sup> appartenaient au type [2] et conduisaient ainsi à postuler que la substitution des vitesses  $c''_{air} \neq c \pm v$  et  $c''_{eau} = \frac{c}{n} \pm (\alpha - 1)v$  aux vitesses  $c$  et  $\frac{c}{n}$  relatives au diélectrique immobile ne produisait aucune modification des phénomènes de réfraction. Cette condition permet à Fresnel de déterminer de façon univoque la valeur du coefficient d'entraînement en fonction de l'indice <sup>17</sup>

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$$

"Je n'ai pu concevoir nettement ce phénomène — écrit Fresnel à Arago — qu'en supposant que l'éther passe librement au travers du globe et que la vitesse communiquée à ce fluide subtil n'est qu'une petite partie de celle de la terre".

Voici donc l'éther interstellaire, fluide universel et immobile, partiel-

<sup>15</sup> En effet, la vitesse de la lumière rapportée à l'observateur terrestre entraîné  $j$  est

$$c'' = c_{ij} = v_{ie'} + v_{e'j} \quad [A]$$

Or l'éther entraîné  $e'$  possède une vitesse  $v_{e'e} = \alpha v_{je} = \alpha v$  par rapport à l'éther immobile et, par conséquent, une vitesse

$$v_{e'j} = v_{e'e} - v_{je} = (\alpha - 1)v \quad [B]$$

par rapport à l'observateur entraîné. D'où [2] par substitution de [B] dans [A].

<sup>16</sup> "Comptes Rendus de l'Académie des Sciences", VIII, 1839, p. 326; XXXVI, 1853, p. 38.

<sup>17</sup> Dans: "Annales de Chimie et de Physique", IX, 1818, p. 57.

lement entraîné par le mouvement des milieux réfringents qu'il pénètre.

Cette propriété donne lieu à une infinité d'expériences qui, au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, se rattachent aux deux types déjà signalés.

Ou bien un observateur réalise des mesures sur un milieu réfringent en mouvement par rapport à lui. C'est ainsi qu'en 1851, Fizeau mesurant la vitesse  $c'$  de la lumière dans un courant d'eau peut constater (cf. [1]) que le coefficient  $a$  a effectivement la valeur calculée par Fresnel.

Ou bien un observateur lié au milieu réfringent en mouvement compare les temps de parcours correspondant aux vitesses  $c''$ , temps obtenus pour diverses combinaisons de  $\frac{c}{n}$  et de la vitesse relative  $(\alpha - 1)v$  de l'éther entraîné (cf. [2]). Une méthode évidente consiste à inverser les directions relatives de  $\frac{c}{n}$  et de  $v$  par l'usage de miroirs. Tel est le principe des expériences de Hoek et de quantités d'expériences du même type. L'une des plus intéressantes consiste à reprendre les mesures d'aberration au sein d'un télescope rempli d'eau<sup>18</sup>.

Il est facile de constater que des expériences de ce genre mettraient en évidence les effets d'un "vent d'éther" soufflant dans le plan de l'écliptique en sens inverse du mouvement de la terre sur son orbite. Ce "vent d'éther" interviendrait par des termes en  $\beta = \frac{v}{c}$ , dits du premier ordre par rapport à l'infiniment petit  $\frac{1}{c}$ .

Toutes ces expériences constituent des manipulations effectuées "à bord du système propre" auquel sont liés la source et l'observateur. Comme nous l'avons dit, il ne s'agit ni de "vitesse absolue" au sens strict, ni de test concernant, à tous les instants, un seul système de référence. Néanmoins, un résultat positif, parfaitement compatible avec le principe classique de Relativité, aurait permis de mettre en évidence le mouvement de la terre par rapport à l'éther, et cela au moyen d'expériences dans lesquelles observateur et source auraient appartenu au même système propre.

On sait que le résultat négatif effectivement observé découle im-

<sup>18</sup> Si le télescope est rempli d'eau, la modification de la vitesse de la lumière ( $c \rightarrow c/n$ ) devrait entraîner en principe une augmentation de l'angle d'aberration ( $\alpha \rightarrow \alpha' > \alpha$ ), une diminution ( $\alpha \rightarrow \alpha'' < \alpha$ ) si la vitesse de la lumière est plus grande dans l'eau (hypothèse corpusculaire). Tel était le principe de l'expérience célèbre imaginée par Boscovich et réalisée cent ans plus tard par G. B. Airy (cf.: "Proceedings of the Royal Society of London", A XX, 1871, p. 35; XXI, 1873, p. 121; aussi: "Philosophical Magazine", XLIII, 1872, p. 310).

Le résultat surprenant est négatif: il faut que la modification de  $c \rightarrow c/n$  soit compensée par un changement corrélié de  $v \rightarrow (\alpha - 1)v$ . Ce résultat est automatiquement acquis par la valeur prévue par Fresnel.

médiatement de la valeur de l'entraînement calculé par Fresnel et mesuré par Fizeau. Autrement dit, l'entraînement partiel de l'éther a une valeur telle qu'elle exclut — non pas la détection d'un mouvement absolu, comme on le dit trop souvent — mais la possibilité, somme toute bien naturelle, qu'aurait l'éther partiellement entraîné de jouer son rôle normal de système de référence.

C'est seulement en 1874 que E. Mascart<sup>19</sup>, W. Veltmann<sup>20</sup>, puis A. Potier<sup>21</sup> mirent en évidence la généralité de ce résultat. Il est impossible de constater un effet de "vent d'éther" manifesté par des termes du premier ordre au moyen d'expériences réalisées sur les corps transparents en mouvement. L'entraînement partiel calculé par Fresnel compense automatiquement tout effet de ce genre.

L'ENTRAÎNEMENT DE L'ÉTHER ET L'ÉLECTRODYNAMIQUE DES DIÉLECTRIQUES  
EN MOUVEMENT LENT

Dans le domaine de l'optique, l'hypothèse d'un entraînement partiel de l'éther se traduit par l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement "relatif" des corps réfringents par rapport à l'éther universel au moyen d'une expérience effectuée dans le système propre. Ce résultat signifie aussi que le mouvement rectiligne et uniforme des corps réfringents est sans influence sur les lois de l'optique (expériences d'Arago).

Ce résultat peut sembler inclus dans les postulats de la physique galiléenne: le mouvement est "comme rien" pour tout phénomène lié au système propre. Néanmoins, le développement de la dynamique newtonienne avait pratiquement réduit ces phénomènes indifférents aux lois d'attraction que régit la mécanique newtonienne. En particulier, on peut vérifier que le passage d'un système d'inertie à un autre ne modifie pas la loi fondamentale d'attraction universelle<sup>22</sup>.

Une telle conclusion n'est pas du tout évidente en ce qui concerne les phénomènes lumineux ou électromagnétiques. Ces derniers, objets des lois précises de la théorie de Maxwell, devaient attirer l'attention

<sup>19</sup> "Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure", I, 1872, p. 157; III, 1874, p. 363.

<sup>20</sup> "Astronomische Nachrichten", LXXV, 1870, p. 145, LXXVI, 1870, p. 129; "Annalen der Physik und Chemie", CL, 1873, p. 491.

<sup>21</sup> "Journal de Physique", III, 1874, p. 201.

<sup>22</sup> En effet cette loi  $\vec{\gamma} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \text{grad} \left( \frac{GM}{r} \right)$  ne dépend que de la distance mutuelle des masses 1 et 2

$$\vec{r} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

et reste inchangée dans la transformation de Galilée

$$x' = x - v_x t; \quad y' = y - v_y t; \quad z' = z - v_z t; \quad t' = t$$

de H. R. Hertz<sup>23</sup>, de H. A. Lorentz<sup>24</sup> et de H. Minkowski<sup>25</sup> sur la formulation des lois valables dans les diélectriques en mouvement.

Les expériences de W. C. Röntgen (1885)<sup>26</sup>, de A. Eichenwald (1903)<sup>27</sup> relatives au déplacement d'un isolant dans un champ électrique, les expériences analogues de H. A. Wilson (1904)<sup>28</sup> dans le cas d'un champ magnétique conduisent à substituer au champ  $E$  associé au diélectrique immobile, le champ

$$E' = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)E \quad \text{avec} \quad n^2 = \epsilon\mu \quad [3]$$

dans le diélectrique en mouvement.

Ce résultat, incompatible avec l'hypothèse d'un éther électromagnétique strictement immobile, s'accorde au contraire avec les conclusions de Fresnel: l'éther électromagnétique — identique à l'éther lumineux — est immobile dans le vide mais subit un entraînement partiel dans les diélectriques en mouvement. De cet entraînement partiel résulte l'impossibilité de déceler par des termes du premier ordre (en  $\beta = \frac{v}{c}$ ) la vitesse relative par rapport à l'éther, au moyen d'expériences d'optique ou d'électrodynamique réalisées sur les milieux entraînés.

Ainsi se justifie l'équivalence que présente, au premier ordre d'approximation, la théorie macroscopique de Maxwell établie pour un observateur entraîné par le diélectrique en mouvement, et la théorie microscopique de Lorentz valable pour un observateur lié à l'éther immobile. L'entraînement partiel que subit l'éther de Maxwell est, au premier ordre, un effet statistique et macroscopique. Il rassemble les effets dus au champ microscopique lié à l'éther immobile et ceux des inductions créés au sein de la matière et totalement entraînés par son mouvement.

L'EXPÉRIENCE DE MICHELSON ET LES HYPOTHÈSES DE FITZGERALD,  
DE LORENTZ ET DE POINCARÉ

Jusqu'en 1880, toutes les expériences sur l'entraînement de l'éther se rapportent à la propagation de la lumière dans les milieux réfringents ( $n > 1$ ,  $\alpha \neq 0$ ) et non pas dans le vide ( $n = 1$ ,  $\alpha = 0$ ).

Des expériences effectuées dans le vide ont mis en évidence, il est

<sup>23</sup> H. R. Hertz, *Gesamte Werke*. Vol. 2, 1894, p. 256.

<sup>24</sup> Sur H. A. Lorentz voir note 43.

<sup>25</sup> "Physicalische Zeitschrift", X, 1909, p. 104; "Mathematische Annalen", LXVIII, 1910, p. 472.

<sup>26</sup> "Annalen der Physik", LV, 1888, p. 268.

<sup>27</sup> *Op. cit.*, XI, 1893, pp. 1 et 421.

<sup>28</sup> "Philosophical Transactions", CCIV, 1904, p. 121.

vrai, les phénomènes d'aberration. Mais nous savons qu'elles font seulement intervenir la vitesse relative de deux systèmes matériels.

Toute expérience "interne"<sup>29</sup>, relative au vide, doit comporter une source et un observateur entraînés. Les mesures de temps-parcours  $t/(c \pm v)$  sur un trajet aller simple sont pratiquement impossibles à réaliser. Les mesures qu'effectue un observateur lié à la source sur des trajets aller et retour d'un faisceau lumineux (trajets comportant une intervention dissemblable de  $v$ ), font intervenir la vitesse relative terre-éther par l'intermédiaire de termes du second ordre ( $\beta^2 = v^2/c^2$ ), beaucoup plus difficiles à mettre en évidence.

Il était donc normal de porter tout d'abord son attention sur l'optique et sur l'électrodynamique des milieux en mouvement. On pouvait espérer détecter ainsi un "vent d'éther" par des effets du premier ordre.

Quand, l'éther fut — au premier ordre — enfermé dans l'inexistence, on se crut obligé de chercher à l'atteindre par des expériences plus fines. Telle fut la célèbre expérience de A. A. Michelson (1881)<sup>30</sup>, ainsi que de Michelson et W. Morley (1887)<sup>31</sup>.

On sait que ces expériences, leurs améliorations<sup>32</sup>, leurs variantes<sup>33</sup>, jusqu'aux très précises expériences de H. E. Ives et G. R. Stillwell<sup>34</sup>, conduisirent au résultat négatif suivant: il est impossible au moyen d'une expérience interne de mettre en évidence le mouvement rectiligne et uniforme d'un système de référence par rapport à l'éther.

Cette conclusion, admissible au premier ordre grâce à l'hypothèse d'entraînement partiel de l'éther, devenait plus difficile à étayer aux ordres supérieurs. La cinématique classique, avec l'hypothèse d'un éther immobile (cf. phénomène d'aberration), conduit en effet à prévoir des effets en  $\beta^2 = v^2/c^2$ . Leur existence était non seulement compatible avec les conclusions de la cinématique classique sur le mouvement relatif mais en constituait une conséquence nécessaire.

Il fallait donc penser que des expériences de ce genre devenaient — en quelque sorte — systématiquement truquées; la présence du "vent d'éther" était voilée par un phénomène parasite et, finalement, par une série de perturbations en cascade. L'entraînement partiel joue ce rôle pour les effets du premier ordre; la contraction des longueurs imaginée

<sup>29</sup> Par expérience interne nous voulons dire que la source et l'observateur appartiennent au même système propre.

<sup>30</sup> "American Journal of Science", XXII, 1881, p. 20.

<sup>31</sup> *Op. cit.*, XXXIV, 1887, p. 333.

<sup>32</sup> Citons les expériences de Kennedy (1926), Illingsworth (1927), Piccard et Stahel (1928), Joos (1930).

<sup>33</sup> Les expériences de Rayleigh (1902), Trouton et Noble (1903), Brace (1904), Trouton et Rankine (1908), Chase (1927), Tomashek (1927), Wood, Tomlison et Essex (1928) furent aussi "négatives".

<sup>34</sup> "Journal of Optical Society of America", XXVIII, 1938, p. 215; XXXI, 1941, p. 364.



par Fitzgerald<sup>35</sup> devait avoir un but analogue pour les effets du second ordre.

Tout corps en mouvement se contracte dans le sens de ce mouvement dans le rapport  $1/\sqrt{1-\beta^2}$ . Toutefois, ce phénomène qu'aurait pu déceler<sup>36</sup> l'expérience demeure, lui aussi, insaisissable. Il faut donc imaginer un second effet parasite dont l'intervention est, cette fois, quasi miraculeuse puisqu'elle dissimule très exactement le phénomène initial: tel est l'accroissement de la masse avec la vitesse. Enfin, ce dernier effet est à son tour impossible à déceler en raison d'une dilatation des temps du système mobile. Grâce à une série de phénomènes physiques corrélés, une compensation s'établit qui empêche, à tout ordre de grandeur, l'intervention de l'éther immobile comme système de référence.

D'une manière assez différente, H. A. Lorentz parvient à la même conclusion en examinant le raccord entre la théorie microscopique du champ électromagnétique (théorie des électrons) et la formulation maxwellienne macroscopique. L'identité entre ces deux descriptions était assurée, au premier ordre d'approximation, par l'hypothèse d'entraînement partiel. Aux ordres supérieurs, c'est-à-dire pour des mouvements rapides, cette identité ne peut subsister qu'en associant, à une variation des longueurs, une modification de l'échelle des temps.

Le système de l'éther immobile constitue, aux yeux de Lorentz, un "système absolu"  $e$ ; le système lié à la matière en mouvement rectiligne et uniforme par rapport à l'éther est dit "système local"  $j$ . Un événement quelconque du système mobile sera caractérisé par des "coordonnées absolues"  $x_{je}, t_{je}$  qui numérotent cet événement dans le système éther. Ce même événement aura les "coordonnées relatives"  $x_{jj}, t_{jj}$  dans le système mobile.

Si les "coordonnées relatives" sont liées aux "coordonnées absolues" d'un même événement par la loi de transformation

$$x_{jj} = \frac{x_{je} - v_{je} t_{je}}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad t_{jj} = \frac{t_{je} - \frac{v_{je}}{c^2} x_{je}}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \left( \beta = \frac{v_{je}}{c} \right) \quad [4]$$

<sup>35</sup> Cf.: O. Lodge dans: "London Transactions", A CLXXXIV, 1893, p. 727.

<sup>36</sup> La contraction des longueurs aurait dû entraîner une modification de l'indice de réfraction (expérience de J. W. Rayleigh, cf.: *Does Motion through the Aether Cause Double Refraction?* "Philosophical Magazine", IV, 1902, p. 78; expérience de D. B. Brace, cf.: *On Double Refraction in Matter Moving through the Aether*. *Ibidem*, VI, 1904, p. 317), de la résistance d'un fil électrique (expérience de F. T. Trouton et A. O. Rankine, cf.: *On the Electrical Resistance of Moving Matter*. "Proceedings of the Royal Society of London", LXXX, 1903, p. 490), de la fréquence des vibrations dans les solides (expérience de A. B. Wood, G. A. Thomson, L. Essex, cf.: *The Effect of the Fitzgerald-Lorentz Contraction on the Frequency of Longitudinal Vibration of a Rod*. "Proceedings of the Royal Society of London", CLVIII, 1937, p. 606).

le passage du référentiel relatif au référentiel absolu n'entraîne rigoureusement aucune modification des équations de Maxwell. Cette conclusion signifie que l'observateur de Lorentz, lié à l'éther, formule les mêmes lois que l'observateur de Maxwell, lié à la matière en mouvement.

D'autre part, "si l'observateur lié au système local se croit au repos et considère les dimensions  $\Delta x_{jj} = x_{jj}^{(1)} - x_{jj}^{(2)}$  comme les dimensions naturelles du système, l'observateur fixe dans l'éther qui se rend compte de la translation attribuera au système les dimensions modifiées

$$\Delta x_{je} = \Delta x_{jj} \sqrt{1 - \beta^2} < \Delta x_{jj} \quad \text{pour} \quad \Delta t_{je} = 0 \quad [5]$$

conformément à la contraction de Lorentz".

La "durée relative"  $\Delta t_{jj} = t_{jj}^{(1)} - t_{jj}^{(2)}$  d'un phénomène qui se déroule au même point du système local ( $\Delta x_{jj} = 0$ ), d'une manière formellement analogue se transformera en

$$\Delta t_{je} = \frac{\Delta t_{jj}}{\sqrt{1 - \beta^2}} > \Delta t_{jj} \quad \text{pour} \quad \Delta x_{jj} = 0 \quad [6]$$

pour un observateur lié à l'éther.

En principe, les relations [5] et [6] ont une apparence tout à fait semblable mais, pour Lorentz, elles dissimulent une profonde dissymétrie entre l'espace et le temps.

En effet les systèmes relatifs  $j$  et absolus  $e$  sont, caractérisés par des étalons de longueurs différents en raison de la contraction de Lorentz. Ils sont munis par contre d'un étalon de temps universel qui coule uniformément pour tous les observateurs.

Les coordonnées  $x$  et  $t$  représentent, dans chaque système, les nombres qui mesurent le quotient d'une longueur ou d'un temps par l'étalon local correspondant. Les relations [5] et [6] sont valables entre ces résultats numériques des mesures.

Entre les longueurs elles-mêmes (représentées par la notation [ ]) — on aura donc <sup>37</sup>

$$[\Delta x_{je}] = [\Delta x_{jj}]$$

L'observation manifeste, sans la corriger, une longueur préalable-ment déformée par le mouvement. La théorie de Lorentz postule ainsi une observation exacte de longueur faussée.

<sup>37</sup> En effet, les étalons de longueurs  $\Delta X$  sont tels que

$$\Delta X_{jj} = \Delta X_{ee} \sqrt{1 - \beta^2} < \Delta X_{ee}$$

Les relations [5] entre les résultats de mesure  $\Delta x$  et  $\Delta t$  s'expriment par le quotient des grandeurs  $[\Delta x]$  et  $[\Delta t]$  par les étalons  $\Delta X$  et  $\Delta T$ . Il en résulte

$$\frac{[\Delta x_{je}]}{\Delta X_{ee}} = \frac{[\Delta x_{jj}]}{\Delta X_{jj}} \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{[\Delta x_{jj}]}{\Delta X_{ee}}$$

c'est-à-dire

$$[\Delta x_{je}] = [\Delta x_{jj}]$$

D'autre part, les observateurs relatifs et absolus attribuent à deux règles identiques placées dans leurs systèmes de référence respective la même longueur

$$\Delta x_{ee} = \Delta x_{jj}$$

en raison du raccourcissement simultané des étalons de longueur: un observateur du système local ne pourra donc, par des mesures de longueur, déceler son mouvement par rapport à l'éther.

Au contraire, si un "temps absolu" coule uniformément dans tous les systèmes de référence, les observateurs des systèmes relatifs et absolus ne pourront, par des observations comparatives, attribuer une durée identique à un phénomène<sup>38</sup>. Par des mesures de temps, un observateur pourrait donc mettre en évidence son "mouvement absolu" par rapport à l'éther. Cette identité ne sera rétablie que si la lumière possède, dans le système de l'éther, sa valeur maximum  $c$ <sup>39</sup>.

À cette condition, l'identité des mesures de temps est assurée dans deux systèmes inertiels. Elle entraîne l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu d'un système d'inertie, en dépit de la présence d'un éther universel et d'un temps absolu.

<sup>38</sup> L'hypothèse d'un étalon de temps absolu  $\Delta T_{jj} = \Delta T_{ee}$  appliquée à la mesure [6] des temps entraîne en effet les relations suivantes entre les durées d'un même phénomène

$$\frac{[\Delta t_{je}]}{\Delta T_{ee}} = \frac{[\Delta t_{jj}]}{\Delta T_{jj}} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

c'est-à-dire

$$[\Delta t_{je}] > [\Delta t_{jj}]$$

<sup>39</sup> Par contre, si la vitesse de la lumière est différente dans le système local  $c_j$  et dans le système absolu  $c_e$ , la relation [6] entre les temps se transforme en une relation entre chemins optiques

$$c_e \Delta t_{je} = \frac{c_j \Delta t_{jj}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

L'hypothèse d'une échelle absolue du temps entraîne alors

$$c_e \frac{[\Delta t_{je}]}{\Delta T_{ee}} = c_j \frac{[\Delta t_{jj}]}{\Delta T_{jj}} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

On peut donc conserver la conclusion

$$[\Delta t_{je}] = [\Delta t_{jj}]$$

en associant les hypothèses

$$\Delta T_{ee} = \Delta T_{jj}; \quad c_j = c_e \sqrt{1-\beta^2}$$

qui impliquent la définition d'un temps universel. Au contraire l'égalité des durées est assurée chez Einstein par les deux conditions associées

$$\Delta T_{je} = \frac{\Delta T_{jj}}{\sqrt{1-\beta^2}}; \quad c_j = c_e$$

Cette conclusion est appliquée par Lorentz à toutes les échelles: l'électron relativiste est un électron déformable dont une portion de la masse — d'origine électromagnétique — varie avec la vitesse. Quand les expériences de C. E. Guye et de C. Lavanchy<sup>40</sup> montrèrent que toute la masse de l'électron varie avec la vitesse suivant la loi prédite par Lorentz, on en conclut que toute cette masse était d'origine électromagnétique. Ainsi, avec H. A. Lorentz<sup>41</sup>, avec G. Mie<sup>42</sup> les caractéristiques des particules se réduisent à celle du champ, lequel est supporté par l'éther. Avec cet excès d'honneur l'éther recevait une propriété étrange: il était strictement impossible — non pas seulement en fait, mais en droit et en raison d'"effets physiques" propres au mouvement — de mettre son existence en évidence au moyen d'une expérience quelconque.

#### LES PRÉMISSSES DE LA THÉORIE DE 1905

On continue d'affirmer que le formalisme introduit par Einstein en 1905 était presque entièrement contenu dans les mémoires antérieurs de H. A. Lorentz<sup>43</sup>, de H. Poincaré<sup>44</sup> et de W. Voigt<sup>45</sup>. Certains auteurs — dont E. Whittaker<sup>46</sup> — ont même pensé que l'essentiel du principe de Relativité Restreinte avait été énoncé par les auteurs précédents et qu'Einstein n'en avait proposé qu'une sorte de glose philosophique.

"Il est hors de doute — écrit Einstein lui-même — que si l'on jette un coup d'oeil rétrospectif sur son évolution, la théorie de la Relativité Restreinte était mûre en 1905. Lorentz avait déjà découvert que, pour l'analyse des équations de Maxwell, la transformation qui reçut son nom, par la suite jouait un rôle essentiel. Poincaré, de son côté, avait pénétré plus profondément dans la nature de ces relations. Quant à moi, je n'a-

<sup>40</sup> "Archives de Genève", XLI, 1916.

<sup>41</sup> H. A. Lorentz, *The Theory of Electrons*. Leipzig 1916, pp. 353 et 441.

<sup>42</sup> "Annalen der Physik", XXXVII, 1912, p. 511; XXXIX, 1912, p. 1; XL, 1913, p. 1.

<sup>43</sup> Les principaux mémoires de Lorentz sur cette question s'échelonnent entre 1892 et 1895. On consultera notamment: H. A. Lorentz, *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants*, "Archives Néerlandaises", XXV, 1892, p. 363; idem, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leiden 1895; idem, dans: *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften*. Vol. 5. Leipzig (1903), p. 2, article 14; idem, *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Smaller than That of Light*. "Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Proceedings", 1904, p. 809.

<sup>44</sup> "Archives Néerlandaises", V, 1900, p. 252; aussi: *Sur la dynamique de l'électron*. "Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo", XXI, 1906, p. 166.

<sup>45</sup> M. Voigt, *Über das Doppler'sche Prinzip*. "Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen", No. 2/1887, p. 41; et: *Über das Doppler'sche Prinzip*. "Physikalische Zeitschrift", XVI, 1915, p. 381.

<sup>46</sup> E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Vol. 2: *The Modern Theories, 1900—1926*. London 1953.

vais connaissance à cette époque que de l'oeuvre importante de 1895 de Lorentz, mais non des travaux ultérieurs de Lorentz et pas davantage des recherches consécutives de Poincaré. En ce sens, mon travail de 1905 est indépendant. Ce qui est nouveau, dans ce mémoire, c'est d'avoir découvert que la portée de la transformation de Lorentz dépassait sa connexion avec les équations de Maxwell et mettait en cause la nature de l'espace et du temps. Ce qui était également nouveau, c'est que l'invariance de Lorentz est une condition générale pour toute théorie physique" <sup>47</sup>.

Il nous reste à montrer que l'originalité profonde de la pensée d'Einstein a renové entièrement la notion de Relativité conçue par ses prédécesseurs immédiats.

#### LA TRANSFORMATION DE LORENTZ ET SON INTERPRÉTATION

Dès 1887, W. Voigt, à propos du principe de Doppler, avait signalé l'existence du groupe de transformation [4] avec  $c_j = c_i$  susceptible d'exprimer les coordonnées d'un même évènement dans deux systèmes de référence  $i$  et  $j$  animés, l'un par rapport à l'autre, d'un mouvement rectiligne et uniforme <sup>48</sup>. Cette "transformation de Lorentz" — ainsi devait l'appeler Poincaré — admettait des effets physiques du mouvement caractérisés par une contraction des longueurs, une diminution de la vitesse de la lumière. L'une et l'autre entraînaient l'impossibilité de détecter le mouvement absolu d'un système d'inertie voyageant au sein de l'éther et muni d'un temps universel.

A ce stade, la théorie de Lorentz introduit une profonde dissymétrie entre les longueurs et les temps: les premières se raccourcissent dans un système mobile, les temps sont inchangés. Par contre, l'évaluation numérique que fait un observateur "absolu" en mesurant les phénomènes relatifs est modifiée par les évaluations de l'observateur propre pour les longueurs comme pour les temps. Toutefois la cause en est bien différente: il mesure avec des étalons justes des longueurs diminuées et des chemins optiques raccourcis. Mais ces derniers sont modifiés par la diminution de la vitesse de la lumière dans le système relatif: le temps n'est pas altéré.

#### Dilatation des durées et vitesse de la lumière

Dans cet ordre d'idée, une des premières modifications que propose Einstein est d'attribuer à chaque système de référence un temps local dont l'évaluation dépend du mouvement de l'observateur. En conservant

<sup>47</sup> "Technische Rundschau", Bern, No. 20/1955 de 6 mai. D'après la citation de: T. Kahan, *Sur les origines de la Relativité Restreinte*. "Revue d'Histoire des Sciences", 1959, p. 163.

<sup>48</sup> Voir note 45.

encore la notion de modifications vraies causées par le mouvement, les étalons de longueur du système relatif subiront une dilatation. La comparaison de phénomènes dont les valeurs numériques sont liées par [6] conduit à une impossibilité de mettre en évidence le mouvement du système local par rapport à l'éther si — et seulement si\* :

$$C_{\text{éther}} = C_{\text{local}}$$

La vitesse de la lumière doit avoir la même valeur  $c$  dans tous les systèmes d'inertie.

Effets physiques du mouvement ou physique  
des apparences

D'après l'interprétation lorentzienne, le mouvement produit une contraction effective des longueurs, une dilatation vraie des durées. L'observateur absolu constate sans distorsions ces altérations et compare les grandeurs ainsi modifiées à ses propres étalons inchangés. Il trouve ainsi des valeurs numériques qui traduisent l'altération causée par le mouvement.

Au contraire, d'après Einstein, le mouvement ne produit aucune modification vraie des grandeurs mais il entraîne une distorsion dans leur observation. L'observateur d'un autre système ne peut appréhender que des longueurs plus petites et des durées plus longues. Il les compare à ces étalons inchangés et aboutit aux mêmes conclusions.

La Relativité de Lorentz suppose, nous l'avons dit, une observation exacte de grandeurs modifiées. La Relativité d'Einstein postule l'observation modifiée de grandeurs inaltérées. On pourrait conclure à une physique des apparences, parler de mirages et de distorsions: il s'agit en fait de modifications tout aussi effectives bien qu'elles s'appliquent à une relation. La masse observée devient elle-même l'aspect que revêt, dans le système propre, l'impulsion-énergie du corps considéré. Examinée à partir d'une autre système, cette impulsion-énergie se traduira au contraire par des observables différentes, spécifiques du mouvement.

Ainsi, la mesure définie par des opérations effectivement réalisables se substitue à des "intuitions" sans racines dans le terrain expérimental: temps universel, simultanéité à distance. Pourtant, ces intuitions sont si tenaces qu'Henri Poincaré lui-même n'exclut pas la "possibilité théorique" de signaux instantanés. Il hésite à tirer les conséquences logiques d'une définition physique de la simultanéité à distance, à entériner l'existence du "non-lieu"<sup>49</sup>. Cette attitude, en partie dictée par

<sup>49</sup> Cf.: H. Poincaré, *La valeur de la Science*, 1904, p. 35; aussi: *La Mesure du Temps*, "Revue de Métaphysique et de Morale", VI, fasc. 1, 1928, p. 1.

\* Voir note 39.

son pragmatisme, le conduit à dissocier le temps local, commode pour énoncer des prévisions théoriques du "temps réel". Einstein ne s'y trompe pas<sup>50</sup>.

#### RÉCIPROCITÉ

La modification vraie des longueurs et des temps prévue par la Relativité de Lorentz atteignait les observables elles-mêmes. Elle ne pouvait donc être réciproque sans perdre toute signification.

Par contre, la Relativité d'Einstein prévoit une modification de la mesure elle-même. Or les mesures des observateurs sont comme leurs mouvements parfaitement réciproques. Puisque les variations ne dépendent que de  $v^2/c^2$ , elles seront donc identiques dans leurs formulations.

Elles ne peuvent, dira-t-on, être "vraies" l'une et l'autre car elles s'excluent. Mais cette incompatibilité se rapporterait à un même système, à des conditions d'observations identiques. Or les observations ne sont pas identiques mais symétriques. Il en résulte des résultats symétriques, les conditions des uns excluent les conditions de validité des autres, bien qu'ils soient symétriquement réalisables.

Il n'existe donc pas une description "apparente" que l'on pourrait opposer à une description "vraie" mais, en ce qui concerne les observations, une foncière réciprocité. Elle assure l'équivalence complète des deux observateurs, c'est-à-dire la possibilité de les substituer l'un à l'autre pour la description d'une loi quelconque, elle garantit leur complète Relativité.

Enfin si l'on peut, dans une certaine mesure, considérer l'observateur du système propre comme „privilegié”, il ne faut pas oublier qu'aucun système propre n'a un rôle préférentiel ainsi qu'il en était pour l'ancien éther. Dans ces conditions, il est normal que les observateurs „postulent” l'identité des phénomènes observés dans chaque système propre et liés à ce système propre ( $\Delta x_{ii} = \Delta x_{jj}$ ) mais cette identité n'est pas l'objet d'expérience. Les mesures effectives relieront toujours deux grandeurs dans l'expérience d'un même observateur ( $\Delta x_{jj}$  et  $\Delta x_{ij}$ ). Il en résulte que le postulat précité permet de comparer expérimentalement  $\Delta x_{ii}$  et  $\Delta x_{ij}$ , c'est-à-dire un même événement rapporté à deux systèmes de référence distincts. C'est en ce sens — et grâce au postulat précédent — que l'expérience peut servir de test à la Relativité Restreinte qui prédit le lien entre la mesure d'un même événement par des observateurs inertiels différents.

<sup>50</sup> H. Poincaré — écrit Einstein dans son lettre à H. Zangger (Praha, 1911) — "était incompréhensif à l'égard de la théorie de la Relativité et affichait vis à vis d'elle une attitude de refus". D'après la citation de T. Kahan (cf. note 47) de: *In memoriam A. Einstein*. Zürich.

## QU'EST-CE QU'UN "PRINCIPE DE RELATIVITÉ"?

Dés que l'on essaye de traduire, par un énoncé synthétique, l'essentiel du principe de Relativité de Galilée à Einstein, on s'aperçoit d'un certain glissement qui met l'accent sur différents de ses aspects.

D'après Galilée et d'après Newton, l'essentiel d'un principe de Relativité est contenu dans l'affirmation suivante:

I. Le mouvement (rectiligne — uniforme) ne peut produire aucune modification (effets physiques) des phénomènes liés à ce mouvement.

Par conséquent —

II. Il est impossible de mettre en évidence le mouvement inertial

— soit par des observations effectuées à l'intérieur d'un système (Relativité Physique)

— soit par la comparaison d'un même phénomène observé à partir de deux systèmes d'inertie (Relativité Cinématique).

III. Par contre, il est toujours possible de mettre en évidence le mouvement relatif par des expériences effectuées d'un système sur l'autre.

Avec l'intervention d'un éther immobile (aberration), dans lequel la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de la source (étoiles doubles), se matérialise une sorte d'espace absolu. Les propositions II se rapportent alors, dans le cas de l'optique, au mouvement relatif. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, il en résulte que l'impossibilité II est restreinte à la mécanique tandis que l'examen des phénomènes optiques conduit aux deux propositions contradictoires suivantes:

L'une, théorique, se déduit de III —

III'. Il est toujours possible de mettre en évidence le mouvement relatif par rapport à l'éther au moyen d'expériences internes au système mobile.

L'autre, expérimentale, rejoint II —

II'. Il est effectivement impossible de mettre en évidence le mouvement par rapport à l'éther.

L'affirmation expérimentale est évidemment sans appel. Aussi le principe de Relativité de Lorentz consiste à grouper II et II' en un postulat qui devient la base — plutôt que la conséquence — du principe de Relativité.

II+II'. Il est impossible de mettre en évidence le mouvement inertial et, en particulier, un mouvement par rapport à l'éther

— soit par des observations de mécanique ou d'électromagnétisme effectuées à l'intérieur du système, même par l'intermédiaire de l'éther (Relativité Physique)

— soit par la comparaison d'un même phénomène observé sur S et sur S' (Relativité Cinématique).



Par conséquent —

I'. Le mouvement rectiligne et uniforme doit produire des modifications des longueurs et des temps (ou de la vitesse de la lumière).

On constate donc un renversement dans l'extension du principe de Relativité. L'absence d'"effets physiques" du mouvement était indispensable à Galilée pour énoncer: "Le mouvement est comme rien", indispensable à Newton pour affirmer qu'il s'agissait de forces "fictives". Par contre, la détection d'un mouvement relatif par rapport à l'éther universel aurait paru très concevable à l'un et à l'autre.

Il s'est trouvé que, sur ce point, la nature était plus relativiste que le théoricien. Pour s'accorder à ses exigences il fallait donc inverser les affirmations relativistes, enlever à l'éther les effets physiques que l'on accordait au mouvement.

La théorie de Lorentz, pour sauver la Relativité du mouvement par rapport à l'éther, accorde aux déplacements inertiels les "effets" que Newton réservait aux mouvements vrais. Elle n'est ni plus ni moins relativiste que la physique du XVIII<sup>e</sup> siècle: elle l'est différemment.

C'est Einstein seulement qui restaure la totalité des exigences relativistes:

Les propositions II+II' restent inchangées.

Elles se complètent par le postulat —

II". "La vitesse de la lumière est la même dans tous les systèmes de référence".

Cet ensemble entraîne alors les conséquences suivantes:

L'une purement galiléenne —

I. "Le mouvement inertiel ne peut produire aucune modification des phénomènes ou des observations qui lui sont liés".

L'autre spécifique de la réforme de 1905 —

I". "Le mouvement inertiel produit une modification réciproque des observations réalisées d'un système sur l'autre".

Il en résulte que, grâce à I et à I', deux observateurs inertiels sont strictement réciproques l'un de l'autre, c'est-à-dire équivalents.

Quant à l'éther, indécélable non par une série d'effets en cascade mais par le jeu même des observations, il devient une inobservable essentielle. Les propriétés (entraînement partiel) représentent la projection, dans la mécanique newtonienne, d'une cinématique du vide adaptée à l'espace-temps. Ainsi l'éther fantôme que sous-tendait une sorte de truquage systématique de l'expérience disparaît avec lui.

Renonçant à d'illusoires privilèges, la Relativité achemine la physique vers le rejet d'une phénoménologie inutile pour construire une pure cinématique où l'équivalence des observations assure l'immédiate cohé-

rence de la loi. "L'homme est la mesure de toute chose" — affirmait Protagoras d'Abdère. C'est en renonçant à ses privilèges faciles, en assujettissant son intuition à une éthique, ses observations à une cohérence, qu'il parvient à transformer le fait unique et particulier. Ainsi, dans l'art, dans la science, se reconnaît l'expérience de chacun. "Si je ne portais en moi le monde, je serais aveugle avec des yeux vivants" — écrivait Goethe à Ackermann. Porter en lui le monde ce fut, pour Einstein, faire du principe de Relativité l'expression d'une cohérence si évidente et si fructueuse qu'il allait étayer toute la physique moderne et supporter bientôt, jusqu'aux plus lointaines galaxies, l'architecture d'un monde nouveau.