

## L'expérience de *William Bertozzi*

Vraie ou fausse preuve la théorie de la relativité ?

### Introduction :

En 1964, l'expérience de William Bertozzi a été considérée comme une preuve de la théorie de la relativité. A la sortie d'un accélérateur linéaire, la vitesse d'un électron ne pouvait dépasser la vitesse de la lumière.

Depuis, tous les cours de physique présentent cette expérience comme une validation de la théorie de la relativité restreinte. Aujourd'hui encore, elle conserve son rôle didactique. On en trouve la description sur INTERNET. Des commentaires et des exercices à l'intention des étudiants sont disponibles sur de nombreux sites.

### Quels sont les résultats de cette expérience ?

Les résultats de William Bertozzi tiennent dans une liste de cinq mesures. La figure 1 présente les quatre premières valeurs de la vitesse d'un électron en fonction du rapport  $k$  de son énergie cinétique à son énergie au repos.

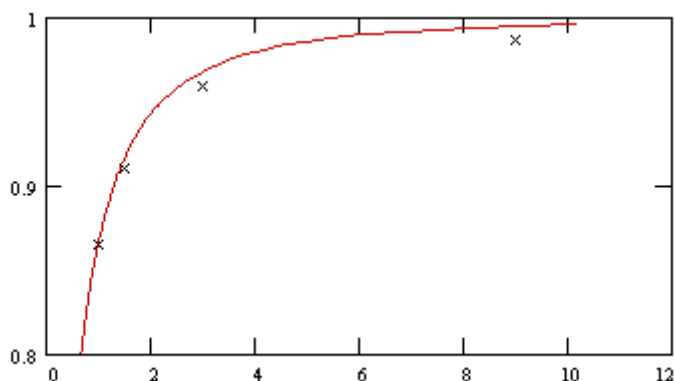


Figure 1 : Formule relativiste : rapport énergie cinétique sur énergie au repos de l'électron.

Dans cette figure, les points marqués d'une croix sont les quatre premières mesures de William Bertozzi, la cinquième ( $v=c$  pour  $k=30$ ) n'étant pas significative n'a pas été retenue. La courbe en rouge correspond aux valeurs prédites par la théorie de la relativité restreinte. Elles ne sont pas parfaitement conformes aux observations.

Comment doit-on interpréter les différences observées entre mesures et théorie ? Correspondent-elles à des erreurs de mesure ? Résultent-elles d'erreurs théoriques ?

## Une analyse basée sur les théories antérieures :

Avant l'apparition de la théorie de la relativité, la science disposait de l'ensemble des théories nécessaires à l'étude d'un accélérateur linéaire. Citons par ordre chronologique :

- L'électromagnétisme, complété en 1865 par les équations de Maxwell,
- La masse de l'énergie, définie par la formule  $E=mc^2$  établie par Poincaré en 1900.
- Le principe de relativité proposé en septembre 1904, par Poincaré.
- Enfin, les équations de changement de base entre repères relativistes, explicitées par Poincaré en juin 1905. Ces formules ont été appelées par Poincaré "transformations de Lorentz" en hommage au célèbre physicien, conservent les lois de l'électromagnétisme.

Les équations de Maxwell sont très antérieures à la théorie de la relativité. La transformation de Lorentz ne sera pas utilisée, bien qu'elle conserve son utilité comme formules de changement de repère. L'analyse de l'expérience de William Bertozzi ne fera donc appel qu'à la physique classique.

## Un calcul résolument non relativiste :

Les résultats obtenus par William Bertozzi se calculent également très simplement en faisant les hypothèses suivantes, différentes de celles retenues habituellement :

- L'énergie de l'électron au repos se partage en parties égales entre sa masse mécanique et l'énergie de son champ électromagnétique calculée selon les formules de l'électromagnétisme classique.
- L'énergie de son champ électromagnétique est calculée en faisant appel à une représentation ondulatoire du champ électromagnétique.

Nous obtenons ainsi une expression de l'énergie totale en fonction de la vitesse, directement liée au potentiel appliqué à l'accélérateur linéaire. Les prévisions sont alors parfaitement conformes aux observations de William Bertozzi :

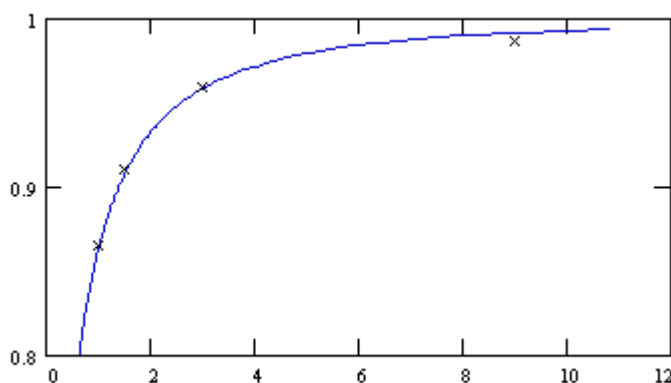


Figure 2 : Formule proposée : rapport énergie totale sur énergie au repos de l'électron.

Comme dans la figure précédente, les points marqués d'une croix sont les quatre premières mesures de William Bertozzi. La courbe en bleu de la figure 2 correspond aux valeurs prédites par la physique classique, compte tenu d'une nouvelle hypothèse présentée ci-dessous.

### Une expression nouvelle de l'énergie de l'électron :

Selon ce nouveau mode de calcul, l'énergie cinétique totale de l'électron correspond à la somme de l'énergie cinétique de sa masse mécanique calculée par la formule de la mécanique classique (la masse étant supposée constante avec la vitesse), et de l'énergie du champ électromagnétique de l'électron calculée à partir d'une analyse ondulatoire.

L'énergie cinétique de la masse mécanique de l'électron considéré comme une particule est alors, en admettant que la masse mécanique de l'électron est  $m = E/c^2$  et  $\beta = v/c$  :

$$W_M = \frac{E}{2} \cdot \frac{\beta^2}{2}$$

Selon cette hypothèse, le champ accompagnant l'électron mobile correspondrait à l'énergie de deux ondes directes et rétrogrades dont la somme est le champ observé dans le repère fixe. Puisque la charge électrique des mobiles est conservée l'énergie cinétique du champ électrique de l'électron mobile serait selon cette hypothèse :

$$W_E = \frac{E}{4} \cdot \left( \frac{1}{1-\beta^2} - 1 \right)$$

L'énergie cinétique totale de l'électron rapportée à son énergie au repos  $W_0$  serait donc de la forme suivante :

$$W = \frac{W_0}{4} \cdot \left[ \frac{1}{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right] = \frac{W_0 \cdot \beta^2}{4} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{1-\beta^2} \right]$$

L'accélération de l'électron se calcule à partir de la loi fondamentale de la mécanique :

$$F \cdot dl = \frac{dW}{dv} \cdot \frac{dv}{dt} \cdot dt = \frac{dW}{dv} \cdot \gamma \cdot dt$$

Soit :

$$\gamma = \frac{F \cdot v}{\frac{dW}{dv}}$$

Ce qui donne finalement l'accélération de l'électron et donc sa masse :

$$M = \frac{(1-\beta^2)^2 + 1}{(1-\beta^2)^2}$$

Bien évidemment, l'intégration de l'accélération au cours du temps conduit à la vitesse, puis à la distance parcourue dans l'accélérateur. Par ailleurs, on peut vérifier que l'énergie acquise par l'électron correspond alors au produit de sa charge par le potentiel appliqué. Ceci correspond parfaitement aux résultats de William Bertozzi.

## Comparaison entre théorie et expérience :

La comparaison entre théorie et expérience conduit aux valeurs de la figure 3. Dans ce graphique, nous avons souhaité mettre en évidence les écarts entre les mesures réalisées par Bertozzi et les résultats théoriques correspondant aux deux formules : la formule classique et de la nouvelle formule proposée ci-dessus. L'abscisse correspond à la vitesse réduite de l'électron (rapport entre la vitesse mesurée et la vitesse de la lumière). L'ordonnée correspond à l'écart en pourcentage entre la valeur de l'énergie appliquée à l'électron et les valeurs calculées avec les deux formules.

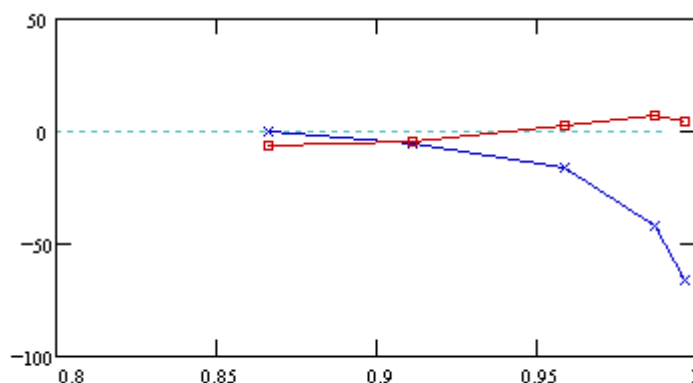


Figure 3 : Comparaison entre théories et expérience (écarts en %).

- La courbe rouge correspond à l'écart entre les mesures et la théorie nouvelle,
- La courbe bleue à l'écart entre les mesures et la théorie de la relativité restreinte.

Ces deux courbes présentent ainsi, en fonction de la vitesse des électrons, les différences (en pourcentage) entre les énergies réellement appliquées et celles calculées avec les deux formules. La cinquième valeur de vitesse mesurée par Bertozzi a été  $v = c$ . Cette dernière mesure correspond à un temps de 2,8 ns connu avec une précision insuffisante à l'époque pour conduire à une mesure de vitesse significative.

En effet, en 1964, la qualité des mesures des très hautes tensions, et l'imprécision des mesures de vitesse à partir de photos d'écrans d'un oscilloscope suffisent à expliquer l'écart restant entre les mesures et les résultats théoriques. Quelle que soit la formule de calcul, l'énergie de l'électron serait infinie pour la valeur  $v = c$ . Le 5<sup>e</sup> point de ces courbes a donc pris en compte une valeur corrigée de la vitesse de l'électron, légèrement inférieure à  $c$ , assurant la meilleure extrapolation possible des deux courbes théoriques. Les différences entre la théorie alternative et les résultats de William Bertozzi ne sont donc pas significatifs. En revanche, la théorie de la relativité restreinte conduit à des écarts nettement plus importants.

## L'effondrement de la théorie de la relativité ?

Si Maurice Allais avait analysé les résultats de l'expérience, déjà ancienne, de William Bertozzi, il y aurait vu "*l'effondrement de la théorie de la relativité*" qu'il attendait. Il est certain qu'avec le recul dont nous disposons, il faut bien admettre que cette expérience n'est pas une preuve irréfutable de la théorie de la relativité. Elle prouve tout au plus qu'un champ électrique ne

permet pas d'accélérer des électrons au delà de la vitesse de la lumière. Par ailleurs, nous constatons que la nouvelle formule proposée pour le calcul de l'énergie cinétique de l'électron soumis au champ d'un accélérateur linéaire donne des résultats bien plus proches des mesures de William Bertozzi que la formule relativiste. Les différences ne sont toutefois importantes que pour les vitesses supérieures à 20% de la vitesse de la lumière.

Pouvons-nous, comme Maurice Allais, conclure sur la base de ce résultat très partiel que la théorie de la relativité doit être définitivement rejetée ?

### ***Comparaison des méthodes de calcul :***

La nouvelle formule présente par rapport à la formule de la relativité restreinte deux avantages essentiels :

- Elle conserve intégralement la mécanique classique, ce qui est particulièrement important dans la plupart des problèmes pratiques.
- Elle conserve également l'électromagnétisme classique. En effet, le champ d'une charge mobile s'obtient simplement en conservant le champ de l'électron dans le repère mobile. Son champ dans le repère fixe est alors calculé par une méthode ondulatoire dont la description sort du cadre de ce document.

En pratique, cette approche conduit à conserver l'espace et le temps absolus, et donc abandonner la contraction de Lorentz.

Enfin, les deux méthodes de calcul ne font apparaître aucune différence entre l'énergie électrique appliquée et celle acquise par la particule. En réalité, l'énergie appliquée par l'accélérateur linéaire se partage entre l'énergie accumulée par l'électron et l'énergie rayonnée. Il est possible que, dans le cas de trajectoires rectilignes et d'électrons faiblement accélérés, ceci soit une hypothèse raisonnable, conforté par les mesures calorimétriques de William Bertozzi. Toutefois, nous aurons besoin d'une théorie plus générale applicable à toutes les trajectoires, décrivant aussi bien l'action des champs magnétiques qu'électriques, et permettant de calculer l'énergie rayonnée par l'électron. L'évolution en un siècle de la théorie des antennes doit permettre de calculer avec précision le rayonnement des électrons rapides fortement accélérés.

### ***Respectent-elles le principe de relativité ?***

Comme le prévoit la physique classique, cette expérience montrerait que les masses mécaniques et les champs électromagnétiques se comportent différemment en fonction de la vitesse. Peut-on en déduire qu'elle ne respecte pas le principe de relativité ?

Tel qu'il a été défini par Poincaré, le principe de relativité explicite une notion fondamentale en physique. Les lois doivent donc être les mêmes pour tous les observateurs. Elles sont universelles. Ce principe ne peut souffrir aucune exception.

Pour autant, l'environnement du laboratoire peut modifier le résultat d'une expérience. En particulier, les forces de gravitation jouent un rôle essentiel et doivent être prises en compte. Le principe d'équivalence d'Einstein en est l'illustration parfaite de l'influence de l'environnement du laboratoire. Il permet de déterminer la courbure gravitationnelle des rayons lumineux, même si le

calcul exact de cette déviation est plus délicat qu'il ne semble à priori (Le résultat exact obtenu en 1916 est le double de la valeur calculée initialement en 1912).

Les lois de la physique peuvent donc dépendre de "paramètre d'environnement" parmi lesquels le champ de gravitation, la vitesse relative d'un satellite par rapport à l'astre autour duquel il tourne... Il est donc hasardeux d'affirmer qu'une loi respecte ou ne respecte pas le principe de relativité. En tous cas, la conservation de la vitesse de la lumière ne saurait suffire à le démontrer ...

### ***Une nécessaire rigueur mathématique:***

Contrairement aux mathématiques qui décrivent de façon rigoureuse les conséquences d'hypothèses, les lois de la physique résultent d'expériences. Elles résultent alors d'une construction intellectuelle permettant de prévoir les résultats de nouvelles expériences.

La cohérence mathématique des lois de la physique sont alors une condition nécessaire, mais pas suffisante, de leur validité. Considérons par exemple la propagation complexe des ondes électromagnétiques dans l'ionosphère. Dans ce milieu, la propagation des ondes dépend de la longueur d'onde, les rayons ne se propagent pas en ligne droite, des absorptions interviennent...

Le comportement de ce milieu peut être décrit par des équations différentielles. Ses propriétés étaient inconnues en 1912, lors des premières publications sur le principe d'équivalence et la courbure gravitationnelle des rayons lumineux. Aujourd'hui, au lieu d'adopter une géométrie non-euclidienne, pourrions-nous faire un autre choix : décrire la propagation de la lumière par une équation différentielle de coefficients dépendant de la gravitation ? Toute équation de propagation étant du second ordre, le facteur deux observé entre le gradient de vitesse de propagation et la courbure des rayons apparaîtrait sans doute naturellement.

### **Une coexistence pacifique entre les théories :**

N'oublions pas que nous sommes totalement incapables de parler de l'univers sans supposer implicitement l'existence d'un repère euclidien. Comment mesurer autrement des distances ou un effet Doppler ? Les effets "relativistes" sont toujours présentés dans un repère particulier, par exemple le repère terrestre. Comment calculerait-on les dérives gravitationnelles ou liées à la vitesse des satellites de géo-localisation sans faire appel à ce repère ?

Pouvons-nous assurer que la physique classique ne respecte pas aussi bien le principe de relativité que les théories modernes ? En tous cas, personne ne peut assurer que tout a été trouvé et que nos concepts ne devront plus être modifiés de façon à mieux décrire la réalité. Donnons donc aux théories de la relativité (restreinte et générale) la place qui leur revient : des étapes dans l'évolution de notre connaissance. N'en faisons pas des vérités éternelles.

Nous comprenons alors mieux la formule provocatrice de Maurice Allais. En physique, il n'y a pas de vérité révélée! La justesse des résultats d'un calcul mathématique peuvent être prouvés. En revanche, une théorie physique ne peut qu'être confrontée avec l'expérience. Dans tous les domaines, et particulièrement en optique, de nombreuses théories existent et sont utilisées au cas par cas, dans leur domaine de validité.

## Des lacunes théoriques acceptées :

Toutes nos théories scientifiques présentent des zones d'ombre. Les exemples sont innombrables. Dans le domaine de l'électromagnétisme, nous faisons toute confiance aux équations de Maxwell. Nous savons cependant que le courant de déplacement qu'il a introduit reste une énigme. Il s'agit d'un courant "fictif" grâce auquel la symétrie entre le champ électrique et le champ magnétique conduit aux modes ondulatoires.

Ne devrait-on pas donner à ce courant une signification physique ? Comment son existence est-elle compatible avec le rejet d'un milieu de propagation ?

A la fin d'une des "Journées Internationale de Nice sur les Antennes", sans doute en 1986, un calcul du champ électromagnétique diffracté par un obstacle mobile a été présenté, hors programme officiel. Grâce à une convention de dessin, ce champ ressemblait aux allées de Von Karmann observées en hydrodynamique. Dans son commentaire, l'orateur expliquait que ce résultat n'était pas surprenant, les équations étant les mêmes...

Ne devrions-nous pas réfléchir à des analogies entre domaines techniques différents ?

## Des données expérimentales à exploiter :

Depuis 1905, la technologie a fait des progrès remarquables. Citons l'électronique, l'ensemble des théories des antennes, des tubes électroniques (klystrons, TOP, Gyrotrons), les dispositifs nouveaux comme les LASERS à électrons libres. Nous disposons également d'horloges atomiques, de gyromètres Laser, de réseaux de satellites de géo-localisation. Il y a là une mine de données expérimentales qui pourraient être exploitées en vue de valider nos concepts.

Enfin, l'observation de l'univers nous permet d'observer des phénomènes qui se sont déroulés au cours de milliards d'années et qui continuent à évoluer sous nos yeux. Comme je l'ai écrit en 2011 dans une présentation faite au cours des journées scientifiques de l'URSI (La physique du 21<sup>e</sup> siècle sera-t-elle ondulatoire ?) :

*Au 21<sup>e</sup> siècle, le développement de la physique ne pourra se faire qu'après l'abandon de l'approche abstraite et dogmatique adopté au siècle dernier.*

*Ayant pris conscience de la fragilité des bases expérimentales et conceptuelles de la physique moderne, les étudiants et chercheurs pourront explorer des voies nouvelles. Libre de laisser leur imagination construire, sur les mêmes faits expérimentaux, des concepts et des représentations concrètes des lois de la physique, ils pourront faire preuve de créativité.*

*Bien évidemment, science et science fiction n'étant pas de même nature, leurs rêves devront être en permanence confrontés aux réalités expérimentales, toutes les explications équivalentes des faits expérimentaux étant toutefois jugées également recevables.*

*Les chercheurs, redevenus acteurs, donneront le meilleur d'eux-mêmes. Impliqués dans une science en perpétuelle évolution et dont ils connaîtront l'histoire, ils n'auront plus l'impression de naître trop tard dans un monde trop vieux.*

*Bien évidemment, l'astronomie et l'astrophysique, sciences porteuses depuis toujours d'une capacité à émerveiller les hommes, joueront dans cette évolution de la physique un rôle essentiel.*

En 1905, Poincaré entrevoyait l'avènement d'une nouvelle physique. Somme-nous sur le point de continuer son œuvre ?

Pierre Fuerxer,

Membre de l'AIRAMA.