

L'effet Sagnac

Entretien avec Pierre Spagnou

Ingénieur chez Thales (systèmes terrestres et aériens), auteur scientifique et enseignant à l'Isep

Propos recueillis par Marc Leconte, Membre émérite SEE



La relativité restreinte a bouleversé la conception du temps au début du XX^{ème} siècle. Elle a été bien souvent mal comprise et enseignée de manière incomplète. Elle connaît aujourd'hui des applications très importantes comme le GPS ou les gyrolasers qui utilisent la multiplicité des temps propres caractéristique de la relativité. Ces dernières applications s'appuient sur un effet physique purement relativiste mis en évidence en 1913 par Georges Sagnac qui était paradoxalement un physicien opposé à la relativité. Constatant l'importance des applications et la méconnaissance théorique de l'effet Sagnac, Pierre Spagnou, enseignant en physique à l'Isep et qui s'intéresse à l'évolution et à la logique de la connaissance scientifique, vient de consacrer un ouvrage lisible par tous sur l'effet Sagnac. Nous l'avons rencontré pour qu'il nous explique sa démarche.

REE : Tout d'abord, pouvez-vous nous en dire quelques mots, qui êtes-vous ?

Pierre Spagnou : Je suis ingénieur chez Thales depuis plusieurs décennies, je travaille dans le domaine du contrôle du trafic aérien civil. Par ailleurs, j'enseigne la physique à l'Isep (Ecole d'ingénieurs du numérique) et je suis auteur scientifique (cet ouvrage est mon neuvième).

Je m'intéresse depuis longtemps aux effets physiques (résultats de mesures de grandeurs physiques reproductibles dans des conditions spécifiées), à leur compréhension précise et aussi à la manière dont la relativité intervient dans des dispositifs technologiques.

REE : Pourquoi ce livre ?

PS : Comme je l'indique dès la page de 4^{ème} de mon livre : parce que l'effet Sagnac

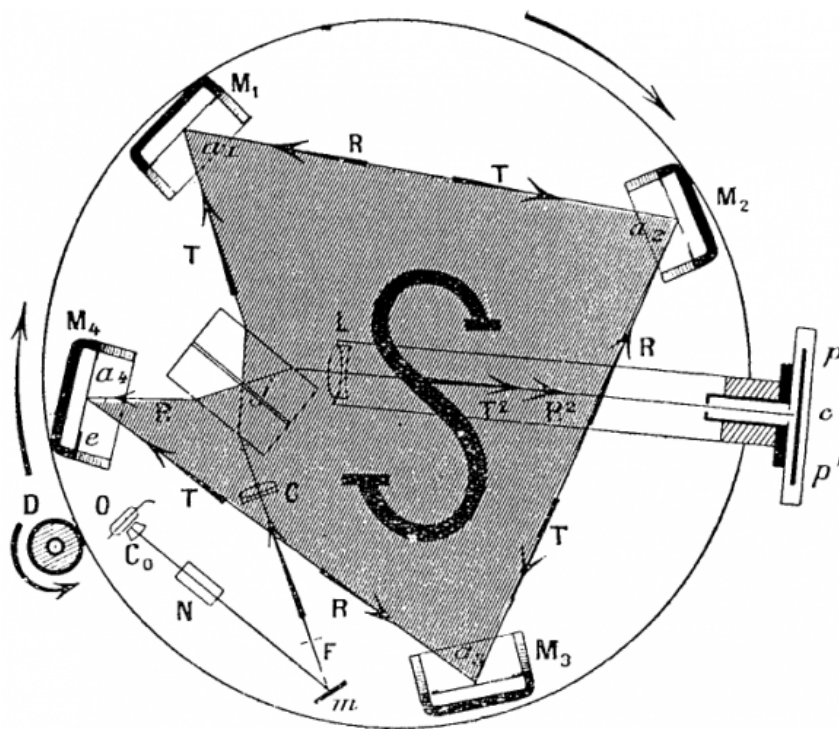


Figure 1 : Interféromètre utilisé par Sagnac, tiré de son article de 1913. Les ondes lumineuses parcourent le pourtour du polygone à contresens.

est à la fois extraordinaire, méconnu et incompris. Excusez du peu !

L'effet Sagnac est un sujet fascinant : il est central pour comprendre certains concepts de la relativité et, pourtant, il reste largement incompris par la communauté des physiciens (si on exclut, bien sûr, les spécialistes clairsemés de la relativité). J'avais à cœur d'éclairer ce phénomène, non seulement en exposant son importance historique et scientifique considérable, mais aussi en corrigeant les idées fausses exceptionnellement nombreuses qui l'entourent depuis toujours. Enseigner l'effet Sagnac m'a permis de constater l'ampleur de ces malentendus.

L'effet Sagnac est également passionnant car il s'agit d'un phénomène fondamental de la relativité restreinte observable dans des situations concrètes assez ordinaires, avec des applications directes dans l'aéronautique, la navigation et même le GPS. Il y avait vraiment une lacune dans la littérature en relativité restreinte et j'espère avoir au moins commencé à la combler (figure 1). Cet effet a été pour la première fois vérifié il y a 112 ans, il devenait d'autant plus urgent de remédier à ces insuffisances chroniques.

Enfin cet effet reste très peu connu du grand public mais aussi des physiciens et ingénieurs malgré son caractère irrésistible.

Vous voyez donc que les motivations ne m'ont pas manqué !

REE : Qui était Georges Sagnac ?

PS : Georges Sagnac était un physicien français fin du XIX^e siècle - début du XX^e siècle, partisan convaincu de l'existence de l'éther luminifère (ce mystérieux milieu supposé de propagation pour la lumière). Ses travaux en optique ne se limitent pas à l'effet qui porte son nom. À travers son expérience de 1913, il pensait démontrer l'existence de cet éther, à contre-courant des idées relativistes naissantes, puisque l'article fondateur d'Einstein *Sur l'Electrodynamique des corps en mouvement*, date de 1905. Ironiquement, l'expérience

de Georges Sagnac allait devenir avec le temps un pilier indirect de la théorie de la relativité, bien que Sagnac lui-même restât un anti-relativiste forcené jusqu'à la fin de sa vie en 1928.

REE : Vous parlez de l'acmé du contresens à propos de l'effet Sagnac. Pourquoi ?

PS : Parce que cet effet regorge de contresens. Difficile de faire mieux, il est jubilatoire dans le domaine des contresens.

Toute expérience permettant d'observer l'effet est déjà littéralement à contresens puisqu'il s'observe avec deux entités se mouvant en sens contraire en parcourant le même circuit.

Par ailleurs, Sagnac lui-même a commis un *contresens historique* en ce qui concerne l'interprétation de l'effet. Dans le cadre d'une physique non relativiste, l'effet Sagnac devrait être nul. Si l'on raisonne avec une physique classique, sans tenir compte de la relativité, le délai observé entre deux faisceaux voyageant en sens opposés ne s'explique pas lorsque les vitesses sont identiques dans les deux sens par rapport au circuit tournant, puisque nous avons alors deux signaux qui se propagent à la même vitesse et parcourent la

même distance avant de revenir au point de départ. Le fait que l'effet soit pourtant bien réel souligne combien il est ancré dans un cadre purement relativiste, *malgré son apparente simplicité*.

REE : Quel est donc le raisonnement de Georges Sagnac pour prédire l'effet qui porte son nom ?

PS : Considérons un circuit de forme quelconque englobant l'aire S qui peut tourner autour de l'axe perpendiculaire à son plan. On suppose que les deux ondes lumineuses sont émises au même instant depuis le point O mais à contresens. La question est de savoir si elles reviennent au même instant ou non au point O (auquel cas le déphasage est non nul) lorsque le circuit tourne à la vitesse angulaire ω autour de l'axe perpendiculaire à son plan (figure 2).

Si l'on se place dans le référentiel tournant (donc par exemple au point de départ et d'arrivée O), on prédit un décalage temporel car les faisceaux lumineux voyagent à des vitesses différentes par rapport au circuit en parcourant la même distance. Si on se place dans le référentiel du laboratoire, on prédit un décalage temporel car les faisceaux lumineux voyagent à la même vitesse c dans les deux sens mais ne par-

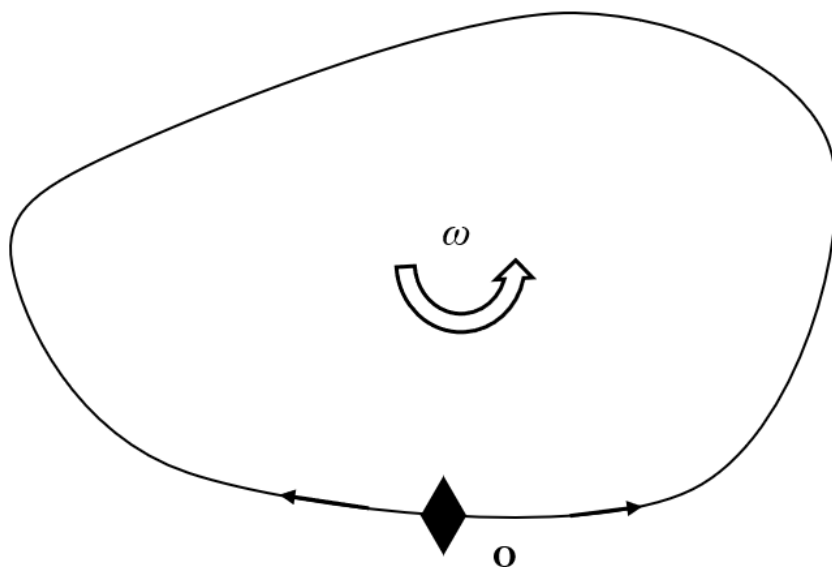


Figure 2 : Schéma de principe pour l'effet Sagnac avec un circuit quelconque (Source P.Spagnou). Il faut imaginer pour une propagation dans l'air des miroirs disposés le long du circuit.

- courent pas la même distance (puisque le point O se rapproche ou s'éloigne durant le trajet selon le sens).

Le décalage temporel prédit à l'arrivée est (dans les deux cas ci-dessus) :

$$\Delta\tau_{\text{sagnac}} \approx \frac{4S\omega}{c^2}$$

Dans la formule ci-dessus, la constante c est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou l'air (proche de $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$). La formule est approchée car on suppose que la vitesse de rotation est faible devant celle de la lumière, ce qui est vrai dans toutes les situations pratiques.

REE : Quel est alors le bon raisonnement pour comprendre l'effet Sagnac ?

PS : On se place dans le cadre de la cinématique einsteinienne, régie par la métrique d'espace-temps de Minkowski.

Le plus simple est de choisir le référentiel du laboratoire dans lequel on voit le circuit tourner. On peut le considérer comme un référentiel inertiel (en bonne approximation dans la situation considérée).

Dans le cas général, si deux entités quelconques - des faisceaux lumineux, des particules, etc. - se déplacent en sens opposés le long d'un circuit en rotation, deux termes interviennent dans le décalage temporel total :

- Un terme non relativiste dépendant de leurs vitesses locales v_+ et v_- par rapport au circuit ;
- Un terme purement relativiste, qui subsiste même quand les vitesses locales sont identiques. C'est le *décalage Sagnac*.

Le décalage temporel mesuré dans le référentiel du laboratoire entre les deux entités à l'arrivée pour un circuit quelconque est donné par :

$$\Delta\tau \approx P \left(\frac{1}{v_+} - \frac{1}{v_-} \right) + \frac{4S\omega}{c^2}$$

Où S est l'aire englobée par le circuit (en supposant que le circuit tourne autour de l'axe perpendiculaire au plan du circuit), P le périmètre du circuit, ω la vitesse angulaire de rotation du circuit et c la vitesse limite (facteur de conversion entre l'espace et le temps dans la métrique de Minkowski). Je donne la démonstration détaillée dans mon livre. L'élément clé est *la loi de composition relativiste des vitesses* qui n'est plus une simple addition.

La formule est approchée car on suppose que la vitesse de rotation est négligeable par rapport à la vitesse limite, ce qui est bien sûr vérifié dans tous les cas pratiques. On peut donc considérer que $\Delta\tau$ est aussi le décalage temporel mesuré par l'observateur au point O (point de départ et d'arrivée) qui tourne avec le circuit.

Dans le cas de faisceaux lumineux, seul le terme purement relativiste subsiste puisque la vitesse de la lumière est c dans le référentiel du laboratoire mais aussi localement en tout point du pourtour du circuit. Ceci montre la nature profondément relativiste de l'effet.

REE : Quelle fut donc l'erreur dans le raisonnement de Georges Sagnac ?

PS : Reprenons la formule ci-dessus avec ses deux termes. Seul le premier terme est prédit par la théorie de l'éther. Georges Sagnac a cru mesurer le premier terme qui selon lui devait être non nul alors qu'en réalité, il a mesuré le second terme (purement relativiste), le premier terme étant nul pour la lumière car elle se propage dans le vide à la vitesse limite. L'ironie est que le premier terme dans la théorie de l'éther conduit à la même prédiction théorique que le second, dans le cas de la lumière. Il faut bien comprendre que Sagnac, sans le savoir et sans le vouloir, a mis en évidence l'instance d'un phénomène purement relativiste beaucoup plus général car il est observable quelle que soit l'entité utilisée : onde, particule ou même objet macroscopique. C'est pourquoi on parle d'*universalité* de l'effet Sagnac.

REE : Quelles sont les principales erreurs que vous relevez à propos de l'effet Sagnac ? Vous consacrez un chapitre entier à « des erreurs dans tous les sens » ?

PS : J'en détaille au moins dix très fréquentes mais il en existe un très grand nombre. Grigori Borisovich Malykin (auquel je rends hommage dans mon livre) a consacré un article majeur, en 2000, à la variété incroyable des explications (la plupart erronées) proposées par les physiciens. J'en citerai deux ici.

La première erreur, la plus courante, est une variante de l'erreur commise par Sagnac. On n'évoque plus l'éther directement mais on continue à utiliser la cinématique galiléenne avec son temps universel unique et l'addition pour la composition des vitesses. De nombreux physiciens et ingénieurs pensent encore que l'effet Sagnac est dû à la différence des vitesses par rapport au circuit tournant, donc que le premier terme dans la formule à deux termes est non nul.

Le point important à comprendre est qu'il n'y a *pas d'approximation non relativiste* pour l'effet Sagnac. Il n'a pas de contrepartie en physique non relativiste : on a affaire ici à un effet purement relativiste où *la vitesse de rotation intervient au premier ordre*.

La seconde erreur consiste à croire que le raisonnement rigoureux ne peut se faire que dans le cadre de la relativité générale car la relativité restreinte ne s'appliquerait qu'aux observateurs inertiels et non, par exemple, aux mouvements de rotation. C'est là encore un contresens car la relativité restreinte s'applique parfaitement aux observateurs quelconques. La relativité générale n'est nécessaire que si l'on veut prendre en compte les effets gravitationnels. Elle contient la relativité restreinte comme un cas limite. L'effet Sagnac est purement cinématique et la gravitation ne joue aucun rôle, donc la relativité restreinte suffit.

REE : Comment sait-on expérimentalement que l'effet est vraiment purement relativiste ?

PS : Cela a été démontré de manière éclatante par l'expérience de Hafele et Keating en 1971.

En embarquant des horloges atomiques dans des avions volant autour du globe (en réalisant deux tours du monde avec escales à peu près au niveau de l'équateur, l'un vers l'est, l'autre vers l'ouest), ils ont mis en évidence une asymétrie dans la désynchronisation relativiste des horloges qui correspond précisément à l'effet Sagnac attendu : les horloges ayant voyagé vers l'est retardaient par rapport aux horloges du point de départ et d'arrivée, tandis que celles ayant voyagé vers l'ouest avançaient. C'est une confirmation directe du caractère relativiste de ce phénomène.

Pour bien comprendre le lien crucial entre l'effet Sagnac et la *désynchronisation cinématique des horloges parfaites* (purement relativiste), nous allons imaginer deux jumeaux Pierre et Paul partant au même instant du point O attaché au circuit tournant. Pierre part dans le sens contraire à la rotation, il revient donc le premier au point O après un tour complet. Supposons qu'il enregistre une heure à sa montre pour un tour complet. Paul part dans le sens de la rotation, il mesure aussi 1 heure à sa montre pour un tour complet mais il arrive au point O 10 minutes plus tard que son frère Pierre. Les deux jumeaux constatent que leurs montres respectives sont décalées de 10 minutes. Il s'agit bien d'un effet purement relativiste, c'est clairement d'une différence d'âge dont nous parlons pour nos deux jumeaux à l'arrivée. Nous avons une variante subtile du fameux *pseudo-paradoxe des jumeaux*. Hafele et Keating (figure 3) ont montré que cette désynchronisation relativiste entre deux tours à contresens est bien réelle. Or nous savons qu'elle est indissociable de l'effet Sagnac. En conclusion, Hafele et Keating n'ont pas mesuré directement l'effet Sagnac mais ont prouvé l'origine purement relativiste de l'effet.

REE : Quelles sont les applications pratiques de l'effet Sagnac ?

PS : Elles sont beaucoup plus nombreuses qu'on pourrait le penser, ce qui rend l'effet Sagnac encore plus attrayant !

On peut les regrouper en deux grandes classes (chacune à l'origine de multiples applications):

- **Le transfert de temps** (technique consistant à accorder les temps propres d'horloges distantes), par exemple dans les systèmes GPS, où l'effet Sagnac doit être corrigé pour assurer la précision du positionnement. A chaque fois que l'on souhaite synchroniser un réseau d'horloges à la surface de la Terre, il faut en général tenir compte de l'effet Sagnac. Il joue un rôle important dans les systèmes de géolocalisation par satellites tels que le GPS américain, le Galileo européen ou le Beidou chinois.

- **Les gyromètres**, qui utilisent l'effet Sagnac pour mesurer très précisément des vitesses de rotation. Les meilleurs gyromètres industriels actuels sont à effet Sagnac et occupent 80 % du marché de l'inertiel : gyromètres et accéléromètres sont les composants des *centrales inertielles* qui équipent drones,

avions de ligne commerciaux, bateaux, sous-marins, robots de chirurgie, etc. Il existe deux types de gyromètres optiques : les gyrolasers (figure 4) et les gyromètres à fibre optique. Je les décris plus en détail dans mon livre.

Les gyromètres optiques sont en fait *l'application de la relativité restreinte la plus répandue sur Terre* car il en existe des millions d'exemplaires. L'effet mesuré est purement relativiste et observé pour des vitesses de rotation ridiculement faibles. L'idée que la relativité restreinte pourrait être ignorée lorsque les vitesses en jeu sont faibles devant celle de la lumière est une idée fautive splendidement contrecarrée par les gyromètres optiques actuels.

REE : Vous évoquez dans votre livre un problème ouvert concernant les gyromètres atomiques. Pouvez-vous nous en dire plus ?

PS : Oui, il existe aujourd'hui une contradiction non résolue dans les thèses ou articles portant sur les gyromètres atomiques. Ici on utilise les paquets d'onde associés aux atomes pour mesurer un déphasage à la sortie qui permet d'estimer la vitesse de rotation de l'interféromètre atomique.



Figure 3 : Joseph Hafele et Richard Keating (source Time magazine 18/10/1971).

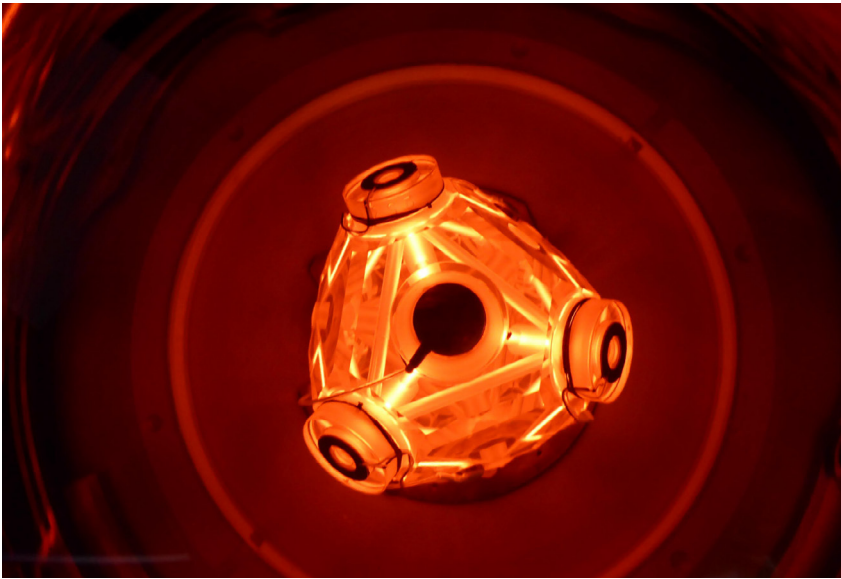


Figure 4 : Gyrolaser Hélium-Néon triaxe en fonctionnement (Source Thales).

●●● Deux approches coexistent pour la prédiction théorique du déphasage mesuré :

- L'une, purement relativiste, explique le déphasage observé par un raisonnement basé sur la désynchronisation relativiste. Ce serait donc un effet Sagnac ;
- L'autre s'appuie sur l'intégrale des chemins de Feynman, dans un cadre non relativiste.

Ces deux approches conduisent aux mêmes expressions du déphasage mesuré. La question de savoir laquelle décrit correctement la réalité physique est encore ouverte. Mon livre invite à réfléchir sur cette énigme fascinante et je propose une piste. Nous sommes encore trop peu nombreux à avoir alerté sur ce sujet crucial pour quiconque s'intéresse à la *compréhension* en physique. Le fait que si peu de physiciens s'intéressent à la question est en soi troublant et devrait intéresser les épistémologues qui, malheureusement, ont semble-t-il déserté le sujet jusqu'ici.

REE : Vous donnez une définition pour l'effet Sagnac universel qui diffère quelque peu de l'habituelle. Pourquoi ?

PS : L'effet Sagnac (universel) est le décalage temporel dans l'arrivée de deux

entités quelconques (ondes ou particules) émises à contresens depuis un même point d'un circuit fermé en rotation et dont *les durées propres pour parcourir ce circuit sont identiques*. Je laisse le lecteur méditer cette définition (qui selon moi met bien en relief l'essence de l'effet), il trouvera sa justification détaillée dans mon livre.

REE : Que souhaitez-vous conclure sur ce beau sujet ?

PS : L'effet Sagnac est merveilleux sur de nombreux plans : historique, théorique, conceptuel, prédictif, expérimental, technologique, épistémologique, etc. Qui dit mieux ?

L'aspect extraordinaire de cet effet pour quiconque s'intéresse à la physique n'a d'égal que l'indifférence dont il est toujours victime vis-à-vis de la communauté des physiciens dans leur ensemble, 112 ans après sa première détection. Il y a un facteur aggravant : *l'effacement complet* de l'enseignement de physique jusqu'au baccalauréat (mais aussi dans les classes préparatoires aux Grandes Ecoles) de la relativité (restreinte ou générale). Les élèves ingénieurs intègrent aujourd'hui leur école sans avoir eu la *moindre seconde* de leur programme de physique consacrée à la relativité (de-

puis le début de leur scolarité), ce qui est difficilement compréhensible en 2025 et certainement préjudiciable à plus ou moins long terme.

Je suis conscient qu'il faudra encore beaucoup de persévérance pour diffuser la richesse de l'effet Sagnac mais je vous remercie en tout cas de m'avoir offert l'opportunité de dessiller les yeux sur cette *perle rare* de la physique relativiste. ■

L'ouvrage sur l'effet Sagnac paru aux Editions Ellipses en 2024 :



Références

- Olivier Darrigol, *Georges Sagnac - A life for optics*, *Comptes Rendus Physique*, Tome 15, 2014.
- Albert Einstein, *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* (1905), traduction en français par Maurice Solovine (1920), rééditions Jacques Gabay, 2005.
- Eric Gourgoulhon, *Relativité restreinte : des particules à l'astrophysique*, EDP Sciences, 2010.
- Grigori B. Malykin, *The Sagnac effect: correct and incorrect explanations*, *Physics-Uspekhi*, Vol. 43, 2000.
- Georges Sagnac, *L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme*, *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, Vol. 157, 1913.