

Introduction

De son premier nom « renversement du temps », le retournement temporel est un sujet de recherche actif depuis ces vingt dernières années, investigué par Mathias Fink, physicien et professeur à l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle (ESPCI) et directeur de l'Institut Langevin, anciennement connu sous Laboratoire Ondes et Acoustique (LAO). Lors de la conférence nommée « Les mardis de l'espace des sciences » le 7 mai 2011 à Rennes [23], Mathias Fink présente le retournement temporel sous le thème «Renversement du temps, ondes et innovation» où il propose un petit historique sur le retournement temporel et ses premières applications.

Dans ce chapitre, nous allons voir le problème de réversibilité du temps avec quelques illustrations ensuite l'invariance de l'équation de propagation dans le temps, quelques applications du retournement temporel et enfin passer à son application dans le cadre diagnostic filaire.

3.1. Problème de réversibilité du temps

La réversibilité ou l'irréversibilité est un phénomène qui a intéressé les physiciens dans divers domaines de la physique. En effet, dans notre environnement, les phénomènes physiques se révèlent généralement irréversibles. Sont cités comme exemples le vieillissement des êtres vivants et les mélanges de fluides, par Mathias Fink. En revanche, les physiciens ont constaté que les équations de la mécanique ont un caractère réversible en temps au niveau microscopique. C'est le physicien Paul Langevin (1872-1946) qui s'est intéressé le premier aux ondes et au temps. Il est par ailleurs l'inventeur du sonar, grâce à l'utilisation qu'il a fait des transducteurs piézo-électriques, qui sont un outil fondamental dans la conception du retournement temporel.

Un transducteur est un instrument qui permet de transformer des variations en quantité physique, par exemple une pression en signal électrique, et inversement. Un transducteur piézo-électrique est composé d'un cristal piézo-électrique qui a la faculté de créer un courant électrique lorsqu'il subit une pression. De la même façon, un courant électrique peut déformer ce cristal. Ainsi, un transducteur piézo-électrique peut à la fois être émetteur et récepteur.

Nous allons nous intéresser à la réversibilité et à l'irréversibilité. Pour comprendre ces notions, nous considérons d'abord les lois de la mécanique de Newton.

Ces lois nous disent que l'accélération d'un corps dépend des forces appliquées sur ce corps :

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \vec{F} \quad (3.1)$$

Où m est la masse du corps, \vec{x} sa position et \vec{F} la somme des forces extérieures exercées sur le corps.

De l'équation (3.1), nous remarquons que l'accélération est une dérivée seconde en temps de la position x . Comme pour la racine carrée d'un nombre où il y a toujours une solution positive et une solution négative, la relation fondamentale de la dynamique (3.1) a aussi deux solutions : une dans les temps croissants $x(t)$, dite causale, et l'autre dans les temps décroissants $x(-t)$, dite anti-causale [25].

3.2. Illustrations

✚ Considérons une boule de billard qui est envoyée avec une certaine vitesse \vec{v}_0 d'une position \vec{x}_0 au temps t_0 vers une paroi de la table de billard, comme montrée dans la figure III.1.a. Cette boule va heurter la paroi au temps t_s et continuera sa trajectoire vers une autre direction. Au temps t_f , la position de la boule \vec{x}_f et sa vitesse \vec{v}_f sont enregistrées par des capteurs, que les physiciens appellent « démons de Loschmidt », du nom du physicien autrichien Johann Josef Loschmidt. Ces démons de Loschmidt sont des transducteurs réversibles.

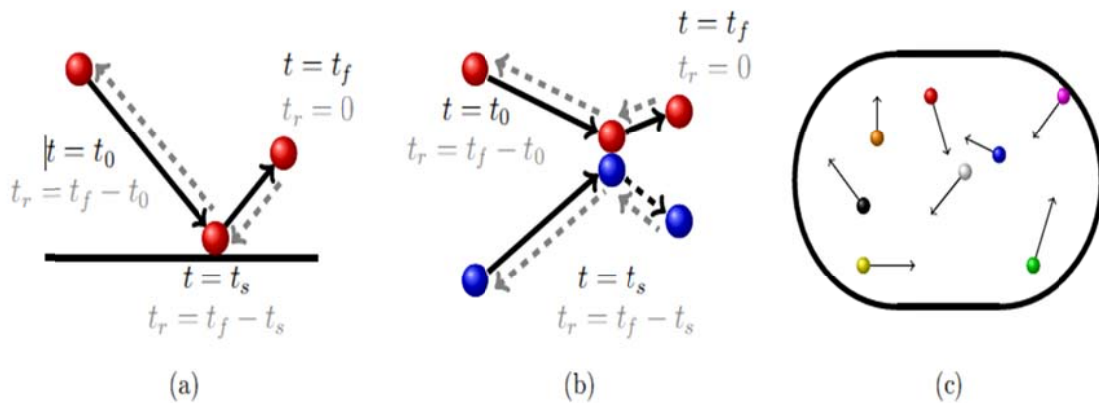


Figure III.1 - Trajectoire des boules de billard : en trait plein noir dans le sens direct (des temps positifs), en pointillé gris pour le retournement temporel. (a) Une boule percutant la paroi de la table. (b) Deux boules de billard entrant en collision. (c) Table de billard (géométrie chaotique).

Notons t_r la variable t retournée temporellement ($t_r = -t$) et on veut retourner la trajectoire de la boule vers sa position d'origine. On replace alors la boule au temps $t_r = 0$ à la position x_f avec la vitesse $-\vec{v}_f$. La boule va heurter la table à $t_r = t_f - t_s$ et aura retrouvé sa position et sa vitesse initiales au temps $t_r = t_f - t_0$.

On peut procéder de même en considérant la trajectoire de deux boules de billard qui entrent en collision, (cf. **Figure III.1.b**). Grâce à deux démons de Loschmidt, on arrête les boules au temps $t = t_f$ et on enregistre leur vitesse. Ensuite les boules vont être renvoyées au temps $t_r = 0$ avec l'opposé de la vitesse enregistrée pour chacune d'elles. Les boules n'auront d'autre choix que de refaire leurs trajectoires en sens inverse.

Des problèmes de stabilité apparaissent lorsque l'on augmente le nombre de boules et lorsque l'on complique le milieu. Un premier constat pratique est que pour un nombre élevé

de boules de billard, il devient difficile d'avoir assez de capteurs pour enregistrer la position et la vitesse de chacune d'entre elles. De plus, les appareils de mesure font des erreurs de mesure, liées dans le meilleur des cas aux arrondis. Ainsi dans un milieu à géométrie chaotique, comme une table de billard (cf. **Figure III.1.c**), les erreurs sur la trajectoire croissent de façon exponentielle. Dans [23], Mathias Fink donne l'ordre de grandeur suivant : par exemple une erreur de mesure à 10^{-15} fait perdre aux particules leur trajectoire originelle, après seulement dix collisions dans un milieu chaotique. Finalement le retournement temporel n'est pas stable au niveau microscopique [19].

✚ Considérons un bloc de matière qui explose en de nombreux fragments et l'on veut créer la scène inverse afin de reconstituer le bloc. Conceptuellement, il est possible d'envisager qu'après avoir mesuré la vitesse et la position de chacun de ces fragments sur une sphère, on les renvoie dans la direction exacte d'où ils viennent et avec la même vitesse. Les fragments convergent alors vers le point d'explosion initial, comme si l'on avait filmé le phénomène et passé la bande en sens inverse. En effet, les équations qui gouvernent le mouvement de chacune des particules sont invariantes par renversement du temps. Cette expérience, bien que physiquement acceptable, est en fait irréalisable.

En premier lieu, le nombre de particules mises en cause est beaucoup trop grand pour avoir toutes les informations les concernant, et ainsi recréer la scène à l'envers. De plus, ce système chaotique est très sensible aux conditions initiales : sur ce type de mouvements divergents, une erreur commise sur un vecteur « vitesse initial » se propage exponentiellement lors de la réémission du fait des multiples collisions entre les particules. Pour cette raison, le retournement du temps en mécanique classique est impossible et c'est donc vers un type de physique moins sensible qu'il faut se tourner. En physique ondulatoire, au contraire, une quantité d'information finie permet de décrire parfaitement un champ d'ondes. De plus, les équations d'onde sont linéaires alors que celles de la mécanique ne le sont pas [20].

3.3. Invariance de l'équation de propagation dans le temps

La technique du retournement temporel repose sur la propriété d'invariance par renversement du temps, c'est-à-dire la substitution de la variable temporelle t en $-t$ dans un milieu hétérogène réciproque et non dissipatif.

Prenons l'exemple d'un milieu homogène et isotrope comme l'espace libre en faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de perte. Nous pouvons décrire une onde électromagnétique par une fonction scalaire $u(r, t)$ qui représente l'amplitude d'un champ électrique ou d'un champ magnétique avec t , la variable du temps et r un vecteur correspondant à la position spatiale de l'onde. Si nous considérons une onde monochromatique dont la dépendance temporelle est harmonique, nous pouvons écrire :

$$u(r, t) = 2\text{Re}[U(r)e^{j\omega t}] \quad (3.2)$$

Avec ω la fréquence angulaire de l'onde et $U(r)$ une amplitude complexe qui ne dépend que des coordonnées spatiales r . Cette onde vérifie l'équation de propagation d'Helmholtz,

$$\left[\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] u(r, t) = 0 \quad \text{et} \quad [\Delta + k^2]U(r) = 0 \quad (3.3)$$

Avec $\Delta = \nabla^2$: opérateur mathématique laplacien.

Λ : longueur d'onde associée à la fréquence de l'onde.

c : célérité et $k = 2\pi/\lambda$: nombre d'onde.

Nous pouvons remarquer que cette équation ne présente que des dérivées partielles d'ordre 2 et donc peut avoir deux solutions : une pour les temps $t > 0$ et l'autre pour les temps $t < 0$.

Ceci se traduit par le fait que si $u(r, t)$ est solution de cette équation alors $u(r, -t)$ est également solution de celle-ci. Au regard de ce résultat, nous en déduisons que si nous désirons retourner le champ $u(r, t)$ dans le temps il faut un moyen de générer la solution $u(r, -t)$.

Bien que d'une façon conceptuelle il soit possible de représenter cette opération, elle ne semble pas réalisable en pratique de prime abord en raison du nombre important de points de mesures nécessaires à sa réalisation.


3.4. Applications du retournement temporel

La focalisation est la convergence d'ondes vers un point. Le retournement temporel est très souvent précédé d'une focalisation. Il présente des applications intéressantes dans des domaines aussi variés que les thérapies contre le cancer ou bien les télécommunications.

3.4.1. Contrôle non-destructif

Les techniques de retournement temporel ont été largement utilisées dans le domaine de l'évaluation non-destructive ultrasonore, pour la détection de défauts ou d'inclusions dans les structures. Plus récemment, la technique d'optimisation du gradient topologique, basée sur le retournement temporel, a fait l'objet d'un brevet par la société Airbus pour la détection de défauts dans les structures aéronautiques. Ces techniques héritent du processus de retournement temporel en l'adaptant de manière à réaliser une imagerie ultrasonore de la structure de manière non-destructive, à partir de la modélisation d'un milieu idéal, qui est comparé aux mesures dans le milieu réel. De cette comparaison, basée sur la corrélation avec le signal rétro-propagé, est extraite une imagerie des défauts dans la structure dont la résolution correspond à la résolution maximale imposée par le phénomène de diffraction lors du processus de retournement temporel.

3.4.2. Diagnostic médical

 Dans le domaine de l'acoustique médicale, l'une des applications essentielles est l'amélioration des techniques de lithotripsie (ou fusion laser). Les techniques de lithotripsie classiques utilisant des barrettes de transducteurs ne permettent pas de prendre en compte le mouvement de la cible dû à la respiration du patient. Ce mouvement peut parfois provoquer la focalisation d'une onde de choc sur des tissus proches de la cible, et déclencher des saignements internes. Les techniques de retournement temporel itératives permettent

d'éviter ce genre de problèmes grâce à leur caractère adaptatif. Le processus de retournement temporel itératif permet de s'adapter au mouvement respiratoire, puisque l'onde focalisée l'est toujours sur l'objet le plus réfléchissant. Par ailleurs, ces techniques permettent de ne pas poser d'hypothèse a priori sur l'épaisseur des tissus, ni sur la célérité des ondes ultrasonores dans le milieu tissulaire séparant la barrette de transducteurs de la cible à détruire. Ces deux avantages ont donné lieu à de nombreuses recherches et à des dépôts de brevets sur les techniques de retournement temporel pour la lithotripsie.

✚ La focalisation du cerveau est une autre application en développement du retournement temporel, notamment pour l'hyperthermie transcrânienne. Cette technique consiste à focaliser une onde ultrasonore à travers le crâne sur une cible (typiquement une tumeur maligne localisée dans le cerveau). Cette focalisation permet un échauffement local des tissus, jusqu'à 60°C, ce qui détruit la tumeur. Dans le cas de l'utilisation du retournement temporel, la présence du crâne, structure extrêmement poreuse et réfractante, introduit de nombreuses pertes et fait perdre la symétrie lors du processus de retournement temporel. La technique de retournement temporel a alors été adaptée pour compenser les effets dissipatifs du crâne en ajoutant une étape de compensation des pertes et du phénomène de réfraction [22].

3.4.3. Télécommunications

Le retournement temporel est utilisé pour la communication dans les milieux complexes, notamment pour les communications sous-marines dans le domaine ultrasonore. Des essais ont également été réalisés pour la communication dans le domaine audible. Dans le domaine de l'acoustique sous-marine, les méthodes de retournement temporel se révèlent être un excellent moyen de faire de l'imagerie adaptative, notamment dans les fonds sous-marins où la célérité des ondes acoustiques peut varier d'un facteur 2 sur de courtes distances.

3.4.4. Géophysique

Au-delà de ces applications, les techniques récentes de détection de séismes ou de mines enfouies utilisent également le principe du retournement temporel, en tant que technique de focalisation et d'imagerie à haute résolution pour la détection et l'analyse de phénomènes géophysiques [22].

3.5. Application pour le diagnostic filaire

3.5.1. Concept de base de la technique du retournement temporel électromagnétique (RTEM)

L'opérateur de retournement du temps correspond au changement de signe du temps c.-à-d. la transformation suivante :

$$t \rightarrow -t \quad (3.4)$$

Une équation est définie comme «invariante par retournement temporel» si elle est invariante sous l'application de l'opérateur de retournement temporel. L'équation des télégraphistes en tension pour une ligne de transmission monofilaire sans perte s'écrit:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.5)$$

où $u(x, t)$ est la tension de la ligne (tension de phase) à la position x et au temps t . L et C sont respectivement, l'inductance et la capacitance de la ligne. L'inversion du temps s'écrit :

$$\frac{\partial^2 u(x,-t)}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u(x,-t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.6)$$

Par conséquent si $u(x, t)$ est solution de l'équation d'onde alors $u(x, -t)$ l'est aussi. En d'autres termes, une équation d'onde est invariante sous retournement temporel s'il n'y a pas absorption durant la propagation dans la ligne qui, dans notre cas est un guide d'onde

de transmission. C'est la raison pour laquelle dans ce mémoire, nous allons restreindre l'application de la technique RTEM à une ligne sans perte.

Concernant l'application pratique de la méthode RTEM, supposons que nous avons enregistré un signal transitoire $s(x, t)$ avec une période T où $t \in [0, T]$, au point x de la ligne de transmission. L'application de la technique RTEM au signal $s(x, t)$ s'écrit :

$$s(x, t) \rightarrow s(x, -t) \quad (3.7)$$

On ajoute au temps renversé, un délai T pour que le temps reste positif pour la durée qui nous intéresse.

$$s(x, t) \rightarrow s(x, T - t) \quad (3.8)$$

Il est à noter que, bien que la technique RTEM soit définie dans le domaine temporel, elle peut également être appliquée dans le domaine fréquentiel en utilisant l'équivalence suivante:

$$f(\vec{r}, -t) \leftrightarrow F^*(\vec{r}, \omega) \quad (3.9)$$

où $F(\vec{r}, \omega)$ est la transformée de Fourier de $f(\vec{r}, t)$ et $(*)$ désigne le complexe conjugué. Notons que (4.5) est valable si $f(\vec{r}, t)$ est un réel.

En effet par définition, la transformée de Fourier d'une fonction $u(x, t)$ s'écrit :

$$F\{u(x, t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) e^{-j\omega t} dt$$

La transformée de Fourier de la fonction $u(x, t)$ retournée temporellement est :

$$F\{u(x, -t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, -t) e^{-j\omega t} dt$$

En opérant le changement de variable $t' = -t$ et $dt' = -dt$.

$$F\{u(x, -t)\} = \int_{+\infty}^{-\infty} u(x, t') e^{j\omega t'} (-dt')$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t') (e^{-j\omega t'})^* (dt')$$

Où * est le complexe conjugué.

Si u est une fonction réelle alors $u = u^*$

$$F\{u(x, -t)\} = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t') e^{-j\omega t'} dt' \right)^*$$

$$F\{u(x, -t)\} = (F\{u(x, t)\})^*$$

$$f(\vec{r}, -t) \leftrightarrow F^*(\vec{r}, \omega)$$

Nous avons donc démontré qu'une fonction retournée temporellement (fonction de la forme $u(x, -t)$) est équivalente au conjugué de la transformée de Fourier de cette même fonction.

3.5.2. Ondes électromagnétiques associées aux défauts dans les systèmes électriques

Un défaut dans un système d'alimentation peut être associé à une injection d'une série d'ondes dans le système d'alimentation lui-même. Les ondes de défaut générées se propagent le long des lignes du réseau et sont réfléchies aux extrémités de la ligne qui sont caractérisées par des coefficients de réflexion dont les valeurs dépendent de l'impédance caractéristique de la ligne et des impédances d'entrée des composants de puissance connectés. Dans ce cas, les extrémités de ligne peuvent être regroupées en trois catégories qui sont : extrémités de ligne avec transformateurs de puissance, point de dérivation et emplacement de défaut. Pour chacune des conditions aux limites, les suppositions suivantes peuvent être raisonnablement effectuées :

- Les extrémités où un transformateur de puissance est connecté peuvent être considérées pour les ondes se propageant, comme circuits ouverts et par conséquent le coefficient de réflexion en tension est égal à 1. En effet, les ondes de défauts sont caractérisées par un spectre avec des composantes à haute fréquence pour lesquelles l'impédance d'entrée du transformateur de puissance est généralement dominée par un comportement capacitif avec des valeurs de capacité de l'ordre de quelques centaines de μF .

▪ Les extrémités qui correspondent à une jonction de plus de deux lignes (point de dérivation) sont caractérisées par un coefficient de réflexion négatif.

▪ Au niveau de l'emplacement d'un défaut, le coefficient de réflexion vaut -1 puisque la valeur de l'impédance du défaut peut être nettement inférieure à l'impédance caractéristique de la ligne.

Avec les considérations ci-dessus et pour un réseau de topologie donnée, il est possible de déterminer un certain nombre p de chemins, chacun délimité par deux extrémités. La **figure IV.1** illustre ces chemins pour un réseau de topologie simplifiée composé d'une ligne principale et d'une ligne latérale.

Un point d'observation m où des signaux de tension ou de courant sont mesurés observera une superposition d'ondes de propagation sur divers chemins.

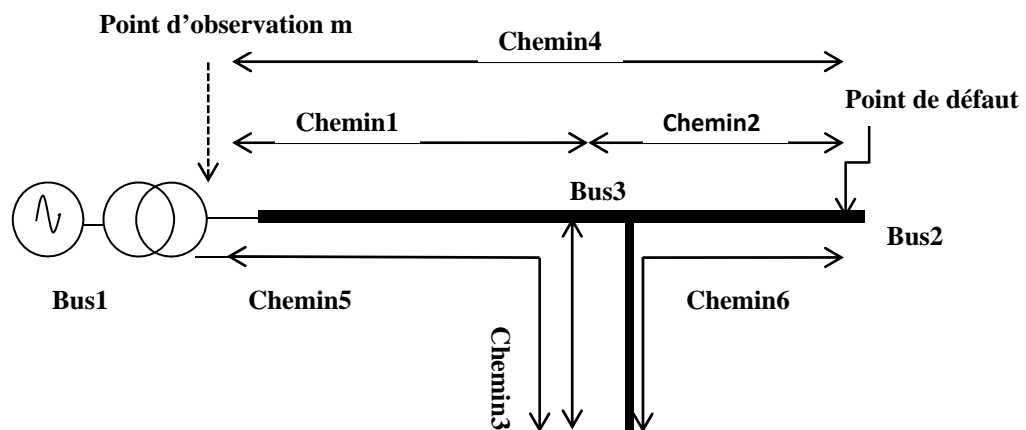


Figure III.2 - Chemins couverts par des ondes de propagation causées par un défaut au bus2 [26].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord abordé l'histoire du retournement temporel. Puis nous avons aussi évoqué les problèmes de réversibilité du temps avec des illustrations. L'invariance de l'équation de propagation dans le temps étant discutée. Ensuite les applications de la théorie RTEM qui sont surtout basées sur la focalisation d'ondes sur une cible ont été présentées. Il est important de noter que c'est seulement tout récemment qu'elle a été appliquée au diagnostic filaire.

Le concept de base de la technique RTEM est expliqué et appliqué à l'équation des télégraphistes en tension pour une ligne de transmission monofilaire sans perte puisque l'applicabilité de la théorie RTEM l'exige.

Puisque nous allons étudier la ligne dans le domaine fréquentiel nous avons donc démontré qu'une fonction retournée temporellement est équivalente au conjugué de la transformée de Fourier de cette même fonction. Enfin nous avons étudié la propagation des ondes électromagnétiques générées par les défauts dans les systèmes électriques.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons la technique RTEM pour le cas d'une de transmission monofilaire sans perte.