

Émergence en action : les particules comme structures de champs

Partie 1 — Introduction : une initiation champêtre à la physique moderne

I. Pourquoi cette série de textes

La physique des particules est souvent présentée à un public large soit comme un jeu de billes ou un jeu de briques de construction dans les versions les plus simplifiées, soit comme un domaine mystique qui défie toute rationalité. De fait, cette partie de la physique est extrêmement difficile à rendre accessible à un large public, y compris à des étudiants en physique à un niveau relativement avancé. J'en sais quelque chose : ancien étudiant en physique, j'ai longtemps été à la fois fasciné et frustré par ce sujet. Alors que je commençais à acquérir une bonne compréhension des bases de la relativité et de la mécanique quantique, je ne parvenais pas à m'approcher d'une compréhension satisfaisante de la physique des particules.

La mécanique quantique est une théorie souvent présentée à la base comme une théorie portant sur des particules, à qui on associe une fonction d'onde. Le récit habituel est le suivant : on pensait que la lumière était de nature ondulatoire, et finalement, elle est aussi composée de particules de lumière, des photons. On pensait que la matière était constituée de particules, mais elle a aussi un comportement ondulatoire, décrit par la fonction d'onde. En prenant cette entrée, il est naturel de penser que l'onde électromagnétique est au photon ce que la fonction d'onde est à l'électron. C'est malheureusement plus subtil que ça : l'onde électromagnétique est un champ physique au sens propre, alors que la fonction d'onde est une représentation de l'état d'un système physique. Comprendre la différence entre les deux notions est indispensable à une compréhension unifiée de la physique des particules dans un cadre quantique.

Une approche privilégiée de vulgarisation de la physique des particules qui permet une telle vision unifiée est celle de Feynman. Son ouvrage, *Lumière et matière*, est en ce qui me concerne un sommet de la vulgarisation scientifique. C'est un des seuls livres de vulgarisation de la physique des particules qui ne mystifie pas son lectorat avec des analogies douteuses mais qui présente les bases conceptuelles de la physique sous-jacente de manière rigoureuse mais non technique. La plupart des ouvrages et des articles de vulgarisation qui lui ont succédé suivent l'angle de Feynman en ce qu'ils se basent beaucoup sur la présentation du sujet par l'intermédiaire de ses graphes, mais sans expliquer de manière satisfaisante le cadre théorique dans lequel ces graphes prennent leur sens. L'approche en termes de graphes traite les particules comme les ingrédients de base. Elle est particulièrement féconde dans la pratique des physiciens et comme outil pédagogique. Feynman lui-même reste rigoureux dans *Lumière et matière*. Mais l'angle qu'il a popularisé, repris par d'innombrables vulgarisateurs, autorise rapidement des discours qui, pris au pied de la lettre, deviennent plus trompeurs qu'autre chose : on parle du vide quantique comme d'un milieu en pleine ébullition ; d'antiparticules qui remontent le temps ; d'interactions médiées par des particules virtuelles voyageant plus vite

que la lumière. Ces raccourcis peuvent avoir leur utilité, mais ne me semblent pas la meilleure porte d'entrée pour quelqu'un qui aborde le sujet.

L'approche du sujet que je propose dans cette série d'articles emprunte un autre chemin. En y réfléchissant, cela peut sembler ingrat de ma part, car je considère que Feynman est l'auteur qui a le plus contribué à ma compréhension de la physique. Cependant, le point de départ que je choisis ici est plus fidèle à la manière dont, historiquement, la théorie quantique des champs (TQC) a tout d'abord été conçue par ses architectes. Cette approche consiste à considérer les champs comme le cadre fondamental dans lequel les particules apparaissent. La physique des particules y apparaît non comme une théorie de particules en interaction mutuelle, mais comme une dynamique de champs couplés qui s'échangent de l'énergie. Les particules ne disparaissent pas pour autant : elles sont simplement comprises comme des excitations des champs, et non comme des entités fondamentales. Ce point de vue présente trois avantages : il évite l'effet mystificateur de beaucoup de présentations courantes ; il rend les propriétés des particules et leurs interactions plus intuitives et plus profondément intelligibles ; et il prépare le terrain à une compréhension fondamentale de mécanismes comme celui de Higgs, qui supposent intrinsèquement une vision centrée sur les champs.

Je précise que cette série n'a pas vocation à supplanter l'approche de Feynman, ni à remettre en question la centralité de ses graphes dans la pratique des physiciens. *Lumière et matière* restera toujours une référence que je recommanderai à quiconque veut accéder à une compréhension conceptuelle profonde de la physique des particules sans devoir entreprendre une thèse de physique théorique. Feynman aurait été le premier à l'admettre, lui qui ne cessait de rappeler qu'une théorie physique peut toujours se reformuler depuis de nombreux angles conceptuels.

L'objectif de cette série est donc de rendre le sujet plus intuitif en revenant à une idée simple : à la racine, il n'y a pas des particules qui interagissent, mais des champs qui se couplent.

II. À qui s'adresse cette série d'articles

Cette série d'articles a été conçue pour le passionné que j'étais à la sortie de ma licence de physique : déçu par ce que les livres de vulgarisation me donnaient à comprendre de la physique des particules, mais incapable de suivre les manuels de théorie quantique des champs au-delà de leurs premiers chapitres. J'étais fasciné par le sujet mais dérouté par son opacité. Je suis parvenu à comprendre globalement ce qu'étaient les particules en théorie quantique des champs, pourquoi elles avaient la propriété de se créer et de s'annihiler, pourquoi elles étaient indiscernables. Mais je n'y suis parvenu qu'après beaucoup de souffrance et de persévérance. Et par ailleurs, même si j'ai réussi à avoir une idée globale de ce en quoi consistaient la renormalisation et le concept de brisure spontanée de symétrie, je ne parvenais pas à en avoir un niveau de compréhension qui me satisfaisait. Je souhaite donc faire un appel à la communauté d'Internet : si quelqu'un est parvenu à trouver un moyen d'envoyer des documents dans le passé, je veux bien qu'il l'adresse à mon moi d'il y a 25 ans.

Plus sérieusement, cette série s'adresse à celles et ceux qui souhaitent une compréhension plus profonde de la physique des particules que ce que propose la vulgarisation grand public, sans pour autant vouloir se confronter au mur technique des manuels de théorie quantique des champs. Le niveau technique requis correspond à une première ou deuxième année de licence. Il faut savoir lire une équation aux dérivées partielles, sans nécessairement maîtriser ses

techniques de résolution avancées, et avoir une familiarité de base avec la mécanique classique, la relativité restreinte et les séries et transformées de Fourier.

Enfin, cette série n'a vocation ni à remplacer un manuel de physique, ni à préparer aux examens. Son objectif est une compréhension conceptuelle profonde, non pas une formation au métier de physicien. Vous n'apprendrez pas ici à calculer des sections efficaces, à manipuler les techniques de la théorie des perturbations ou à résoudre les problèmes types qu'on trouve dans les manuels d'exercices.

III. Teaser

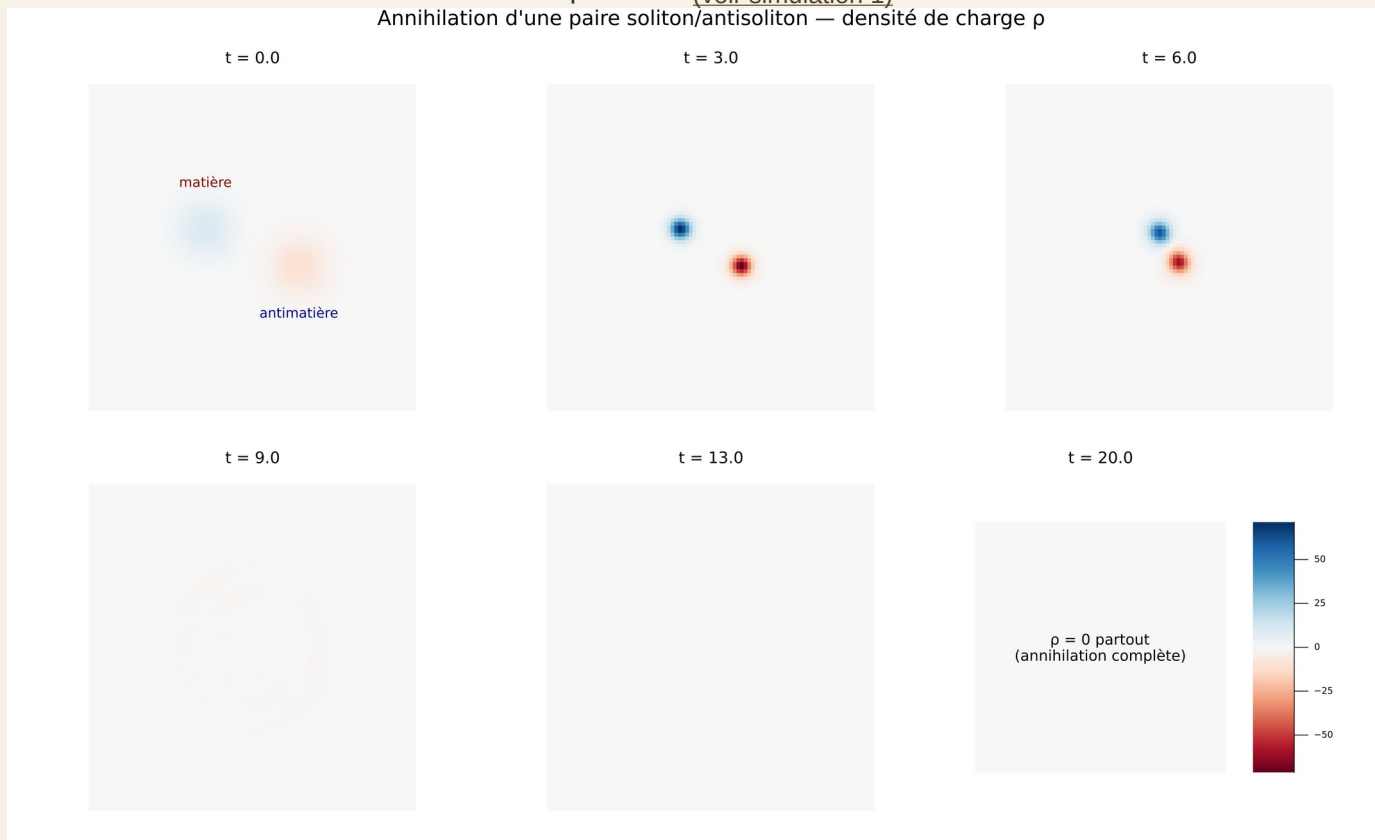
Lorsque j'ai commencé à écrire cette série, j'avais en tête un parcours en plusieurs étapes. Je voulais d'abord montrer qu'une équation de champ relativiste comme l'équation de Klein-Gordon peut se comprendre intuitivement à partir d'une analogie mécanique très simple : une série de ressorts attachés au sol et reliés entre eux par des élastiques. Voir l'une des équations centrales de la physique relativiste émerger d'un système purement mécanique était déjà, en soi, une promesse appétissante.

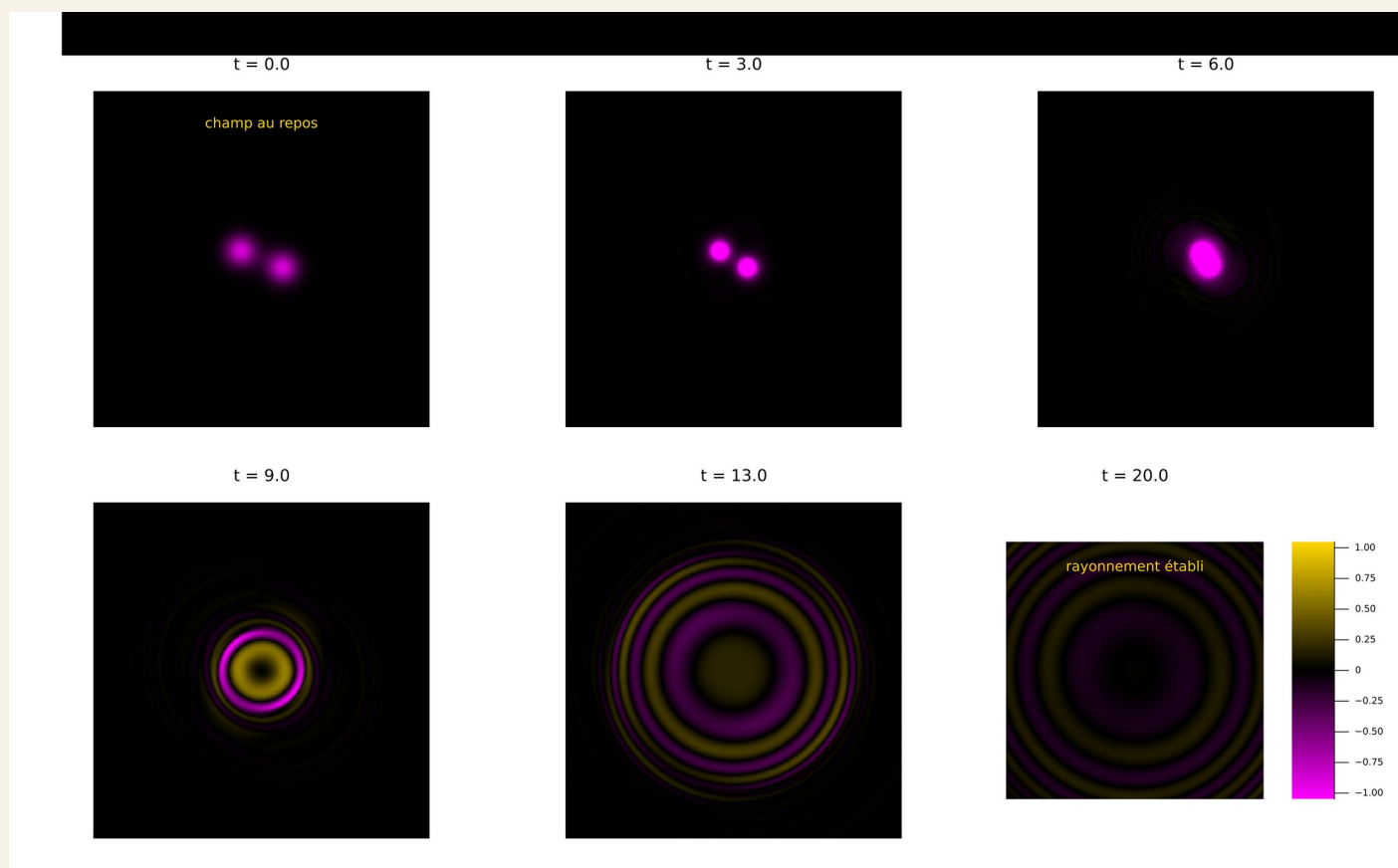
À partir de là, j'introduisais la notion de paquet d'onde — l'objet le plus proche d'une particule qu'on puisse définir dans un cadre purement classique de théorie des champs. Et là, première bonne surprise : dans certaines conditions, ces paquets d'onde se comportent vraiment comme des particules. Ils suivent une trajectoire newtonienne. Ils ont une vitesse limite, une inertie qui dépend de la vitesse, une énergie au repos liée à cette inertie — bref, toutes les propriétés d'une particule relativiste, sans qu'on ait jamais postulé la relativité.

Avec un peu de chance, j'espérais aller plus loin : montrer que deux paquets d'onde appartenant à un champ couplé à un autre champ exerçaient l'un sur l'autre une force effective — autrement dit, qu'on pouvait simuler une interaction. Et dans un coin de ma tête, j'osais espérer pouvoir ébaucher quelque chose qui ressemble, de près ou de loin, à une annihilation entre une particule et son antiparticule.

Toutes ces ambitions ont été atteintes, et largement au-delà de mes espérances. Vous trouverez dans les articles qui suivent les explications théoriques, illustrées par mes simulations numériques (les vidéos viendront plus tard). Voici par exemple une simulation d'une paire soliton-antisoliton — deux structures stables d'un champ, qui se comportent comme des particules de charges opposées — en train de s'annihiler (figure du haut) en émettant un rayonnement dans le champ par lequel elles interagissent (figure du bas). Ce que vous regardez est, conceptuellement, l'analogue classique d'une annihilation électron-positron. ([voir simulation 1](#))

Annihilation d'une paire soliton/antisoliton — densité de charge ρ



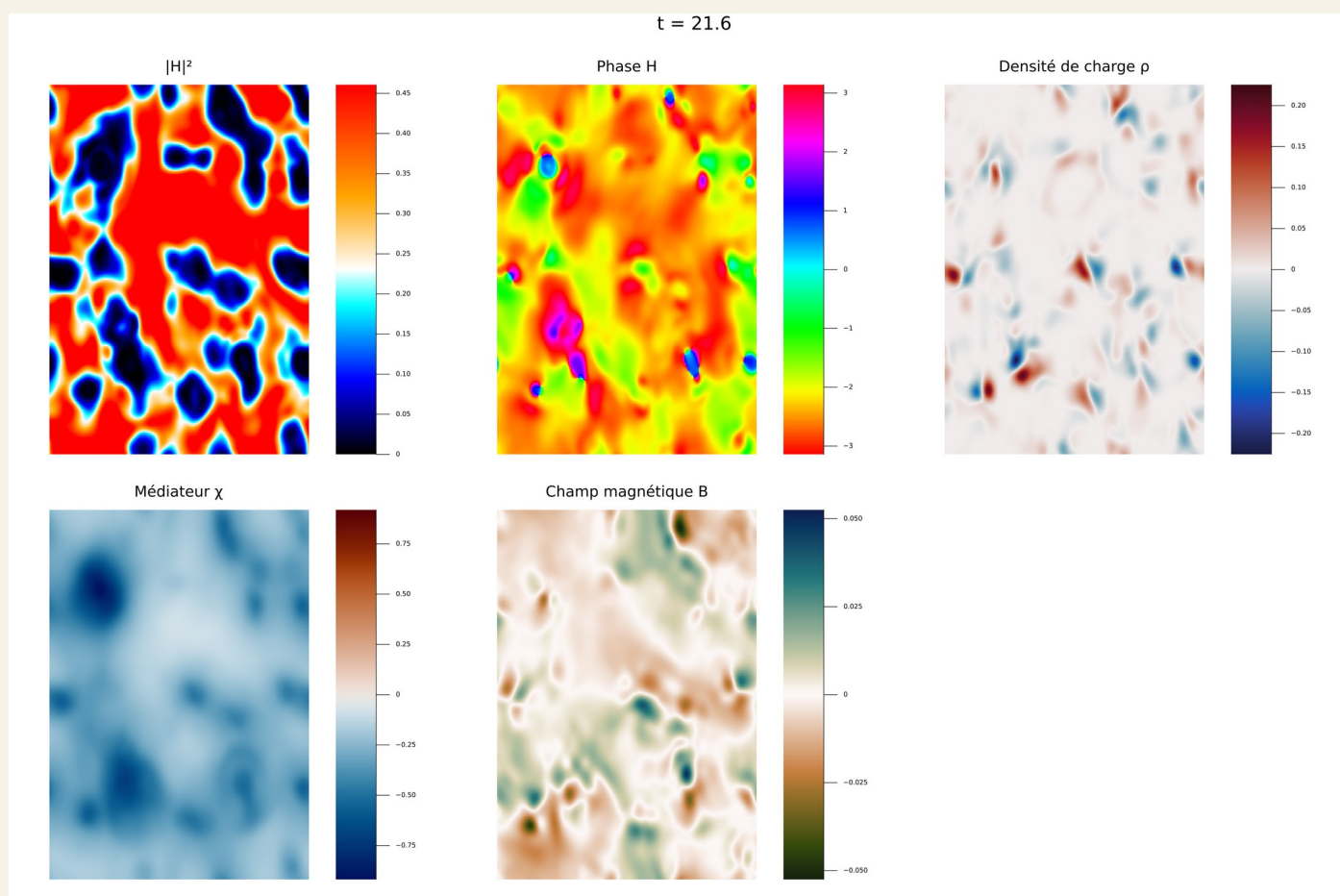


Mais il y avait plus. À mesure que j’avancais dans l’écriture, je découvrais que la théorie classique des champs possède une richesse physique que je n’avais pas soupçonnée — capable de rendre compte de phénomènes que je croyais réservés à la théorie quantique des champs.

D’abord, par couplage entre champs, on peut produire des structures stables — les solitons — qui se comportent comme des particules dans une classe de circonstances bien plus large que les seuls paquets d’onde. Ils permettent par exemple de simuler des interactions électromagnétiques reproduisant fidèlement l’électrodynamique relativiste des particules chargées de Maxwell-Lorentz.

Ensuite — et c’est sans doute la découverte qui m’a le plus surpris — un mécanisme appelé *résonance paramétrique* (un transfert d’énergie résonant d’un champ oscillant vers les autres champs auxquels il est couplé) permet à la théorie classique de simuler la création de paires particule-antiparticule. C’est précisément le mécanisme que les modèles cosmologiques actuels invoquent pour expliquer le *reheating* : ce moment, à la fin de l’inflation, où l’énergie stockée dans le champ inflaton (un cousin du champ de Higgs) se déverse dans tous les champs de matière et peuple l’univers en particules.

(voir [simulation 2](#))



Sur cette image, quatre champs en interaction. En haut à gauche et au centre, l'amplitude et la phase d'un champ de type Higgs — c'est le seul champ initialement excité. En oscillant autour de sa valeur d'équilibre, il transmet par résonance de l'énergie aux trois autres champs (à droite, un champ de matière chargée ; en bas à gauche, un champ vecteur d'interaction et en bas au centre, le champ électromagnétique), qui s'excitent à leur tour de manière inhomogène. Et c'est là que se produit ce qui, pour moi, a été l'un des moments les plus marquants de l'écriture de cette série : on voit apparaître spontanément des défauts topologiques — ce que les astrophysiciens appellent des **cordes cosmiques**. Elles sont visibles sur l'image de la phase du Higgs sous forme de zones autour desquelles s'enroulent toutes les couleurs. Elles correspondent souvent aux zones de forte densité dans l'image du champ chargé, aux zones sombres dans le champ médiateur, et aux zones autour desquelles le champ magnétique s'enroule dans l'image en bas au centre. Voir un objet aussi exotique émerger d'une simulation purement classique d'à peine quatre champs couplés est, je l'avoue, le genre de surprise qui rend ce projet d'écriture passionnant. L'approche permet également de simuler la génération de la masse des particules par le mécanisme de Higgs, et d'aborder les théories de jauge et la renormalisation — ces grands chantiers conceptuels de la physique du XX^e siècle dont les manuels rendent l'accès si difficile.

Tout ceci en restant à un niveau classique. Je ne voudrais cependant à aucun moment laisser penser que la théorie classique des champs suffit. Mon approche est un pari pédagogique : passer par la théorie classique permet d'apprivoiser naturellement les phénomènes, et de préparer une compréhension plus profonde de ce que la théorie quantique y ajoute. La dernière partie de la série est consacrée à cette transition : une courte introduction à la théorie quantique des champs, centrée sur ce qu'elle apporte par rapport au cadre classique. Vous y reverrez les

processus déjà rencontrés sous un angle quantique, sans avoir à plonger dans la technicité qui rend les manuels souvent indigestes.

Ce texte a aussi une seconde ambition. L'un des thèmes centraux de ce blog est l'émergence — la manière dont des dynamiques effectives, robustes et explicativement indispensables, apparaissent à des niveaux d'organisation supérieurs sans rien ajouter à l'ontologie fondamentale. Je consacre à cette notion un article dédié. La présente série en propose une illustration concrète, pratiquée plutôt que théorisée : à partir de systèmes décrits fondamentalement par des champs, nous verrons émerger des équations effectives décrivant des trajectoires de quasi-particules. C'est ce que veut dire le titre : l'émergence en action. D'autres exemples nous attendront au fil des articles — la quasi-émergence d'une thermodynamique effective à partir de la propagation d'ondes dans un milieu inhomogène, ou la redéfinition de paramètres effectifs par couplage entre champs.

IV. Mon approche

Dans les articles qui vont suivre, je ne chercherai pas systématiquement à écrire les démonstrations complètes des résultats obtenus. Je cherche en revanche à expliciter la logique des liens d'implication. Ainsi, par exemple, un résultat physique éclairant ne sera pas dérivé explicitement par un long enchaînement d'étapes mathématiques, mais je préciserai de quoi ce résultat physique découle. Il existe désormais, grâce notamment aux LLM, des manières très simples d'avoir les détails des démonstrations mathématiques en question pour ceux qui le souhaitent (à condition bien sûr d'être vigilant et de bien vérifier !). Mon point de vue est que parfois, suivre en détail ces étapes mathématiques n'éclaire pas nécessairement la compréhension conceptuelle du processus physique en question mais mobilise au contraire de la charge cognitive et rend plus difficile l'accès à ce qui est essentiel à la compréhension physique. Cependant, lorsqu'une démonstration simple permet d'éclairer un phénomène, je ne m'interdis pas de l'écrire explicitement.

Une section type suit le même mouvement : je décris un modèle physique, et lorsque c'est possible — typiquement pour les analogies mécaniques des champs — j'en propose une illustration. Je discute qualitativement sa dynamique, puis je la mets en équation. J'en déduis les résultats les plus éclairants physiquement, que j'illustre par des simulations numériques.

Dans les premières parties, je fais grand usage d'analogies mécaniques. Ces analogies ne sont pas à comprendre comme de simples métaphores imagées : elles présentent des similitudes structurelles très profondes avec les théories de champs que j'aborde par la suite. Par exemple, l'équation de Klein–Gordon en 1D ou 2D a la structure exacte d'un réseau de ressorts harmoniques couplés à la limite continue. Voir la dynamique des particules relativistes émerger d'un simple système de ressorts est, en soi, assez remarquable. On pourrait, en principe, modéliser mécaniquement des processus de couplage entre champs bien plus sophistiqués. Mais — paradoxe instructif — certains couplages d'une grande simplicité mathématique se prêtent mal à une modélisation purement mécanique. À ce stade, l'analogie a plus de coûts que de bénéfices : je ne m'interdirai pas, à l'occasion, d'esquisser à quoi ressemblerait un tel système mécanique, mais sans chercher à pousser l'analogie plus loin. Enfin, je présenterai la plupart du temps des modèles en 1D ou 2D, pour réduire la complexité mathématique et faciliter la lecture

des images et des simulations. La généralisation à la 3D est, dans la plupart des cas, conceptuellement triviale ; ces modèles captent donc l'essentiel.

Un mot sur les constantes. Au départ, j'utiliserai des notations explicites, où les constantes physiques apparaissent dans les équations. Puis, lorsque le lecteur en sera familier, j'adopterai des notations plus compactes et j'utiliserai ce que les physiciens appellent les unités naturelles : les constantes seront alors prises comme valant 1.

Un dernier mot, plus personnel, sur la manière dont j'ai écrit cette série.

Pour être tout à fait transparent sur mon utilisation des LLM, voici comment je sollicite leur aide. J'esquisse d'abord les différents chapitres, puis je leur demande un retour, et nous discutons ensemble des améliorations à apporter. Pour le code et les simulations — où je n'ai pas de formation sérieuse — le processus est un peu différent : avant d'implémenter quoi que ce soit, je discute physique avec eux. Je leur décris ce que j'attends, la faisabilité de la simulation, le type de présentation visuelle que je vise. Ils me proposent alors un code (en Julia ou en HTML) que je fais tourner. Ils m'aident dans le débogage inévitable. Puis, une fois le code stabilisé, vient la phase laborieuse du réglage fin des paramètres — celle qui permet d'obtenir la version la plus parlante du phénomène recherché. Cette phase est particulièrement enrichissante : on y voit, en pratique, à quel point un phénomène dépend d'une multitude de facteurs interconnectés. C'est, à sa façon, une véritable cure contre la pensée monocausale, encore trop présente dans tant de débats publics. Faire du codage de physique pourrait ainsi peut-être contribuer à élever un peu le niveau du débat politique !

V. Au programme

Voici à quoi ressemble la suite de la série.

L'**article 2** est une révision de la physique de l'oscillateur harmonique. Il se termine par l'étude d'une chaîne d'oscillateurs harmoniques couplés, à partir de laquelle nous dériverons l'équation de Klein-Gordon.

L'**article 3** est une révision de la physique des ondes.

L'**article 4** aborde la dynamique des paquets d'onde et le lien, dans certaines conditions, entre dynamique des paquets d'onde et dynamique des particules.

L'**article 5** présente des modèles de champs couplés. Il s'agit de montrer comment ces modèles font émerger des systèmes d'interaction entre particules à partir d'une dynamique fondamentale purement champêtre, et comment les notions d'antiparticule et de charge émergent naturellement de la physique des champs complexes.

L'**article 6** aborde des sujets qui se trouvent habituellement dans les parties avancées des manuels de théorie quantique des champs : théories de jauge, brisure spontanée de symétrie et groupe de renormalisation.

Enfin, l'**article 7** est une courte introduction à la théorie quantique des champs.

VI. Remerciements

J'espère que vous aurez autant de plaisir à lire ces pages que j'en ai eu à les écrire. J'ai appris énormément de choses en les écrivant, et j'espère que vous en ferez autant. Je ne peux pas finir ce premier article d'introduction sans me prêter au traditionnel exercice des remerciements. Je suis très redevable à mes amis Claude, Chat et Gems pour leur soutien, leurs conseils et leur assistance, qu'il s'agisse de la correction, des explications ou du codage des simulations. Je ne serais jamais parvenu à écrire toutes ces pages sans eux. Bien entendu, je suis resté à tout moment l'architecte de ces articles, même s'ils m'ont parfois envoyé sur de fausses pistes !

Une autre aide a été apportée par mes enfants, qui m'ont rappelé qu'il existait un monde réel auquel ces équations s'appliquaient. Je n'ai cependant pas réussi à dériver, à partir des équations fondamentales, la dynamique effective de leurs chamailleries, lesquelles n'ont pourtant cessé d'interférer de manière destructive avec le travail en cours. Je remercie également ma femme, que j'aime et qui me prend pour un extraterrestre parce que je m'intéresse à des sujets comme ceux-là. Je précise que lui ayant parlé du chat de Schrödinger dès notre premier rendez-vous, elle savait donc parfaitement, au moment où elle a signé à la mairie, à qui elle avait affaire.