



# INTRO UNE INTRODUCTION À TION DUC TION

## LE TEMPS DES NEURONES

Les horloges du cerveau

Dean Buonomano

*Traduction de Michel Le Bellac*

edp sciences

## LE TEMPS DES NEURONES Les horloges du cerveau

Qu'est-ce que le temps ? L'écoulement du temps est-il une illusion ? Le temps a-t-il une flèche ? Peut-on voyager dans le temps ? Est-ce que le libre arbitre existe ou bien le futur est-il prédéterminé ? En s'appuyant sur les résultats les plus récents des neurosciences, ce livre expose comment on peut tenter de répondre aujourd'hui à ces questions.

Le cerveau humain est un organe complexe qui ne se contente pas de percevoir le temps, il le construit. Il fabrique notre sens de la chronologie et c'est aussi une machine à explorer le temps qui nous permet de simuler les événements passés et futurs, une faculté qui a joué un rôle déterminant dans l'évolution de l'humanité.

L'ouvrage combine neurosciences, physique et philosophie. La première partie décrit les différents types d'horloges biologiques qui permettent au cerveau de percevoir le temps. La deuxième partie est consacrée à la nature du temps et à la manière dont la physique en rend compte, en particulier dans le cadre des relativités d'Einstein. Le livre se conclut en développant les aspects psychologiques de la perception du temps et la façon dont la conscience fait le lien entre le passé et l'avenir.

*Dean Buonomano est professeur de neurobiologie et de psychologie à l'Université de Californie à Los Angeles. Il mène une activité de recherche de pointe comme théoricien des neurosciences du temps. Il a écrit un livre de vulgarisation « Brain Bugs » (Les dysfonctionnements du cerveau).*

*Michel Le Bellac est professeur émérite de physique à l'Université de Nice. Il a écrit de nombreux livres de physique et il est co-auteur dans cette collection de « Le temps : mesurable, réversible, insaisissable ».*

Isbn : 978-2-7598-2270-6



9 782759 822706

Création graphique : Béatrice Couëdel

22 €

**edp sciences**  
www.edpsciences.org

La collection « **UNE INTRODUCTION À...** » se propose de faire connaître à un large public les avancées les plus récentes de la science. Les ouvrages sont rédigés sous une forme simple et pédagogique par les meilleurs experts français.

**Collection « Une Introduction à »**  
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

# **Le temps des neurones**

**Les horloges du cerveau**

**Dean Buonomano**

**Traduction de Michel Le Bellac**



EDP Sciences  
17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

## Dans la même collection

*La cryptologie*

Philippe Guillot

*L'aventure du grand collisionneur LHC*

Daniel Denegri, Claude Guyot, Andreas Hoecker et Lydia Roos,  
préface de C. Rubbia

*Le climat : la Terre et les hommes*

Jean Poitou, Pascale Braconnot et Valérie Masson-Delmotte, préface de J. Jouzel

*Aux origines de la masse : particules élémentaires et symétrie fondamentales*

Jean Iliopoulos, préface de F. Englert

*Les relativités : espace, temps, gravitation*

Michel Le Bellac, préface de T. Damour

*Le temps : mesurable, réversible, insaisissable ?*

Mathias Fink, Michel Le Bellac et Michèle Leduc

*La révolution des exoplanètes*

James Lequeux, Thérèse Encrenaz et Fabienne Casoli

*À l'orée du cosmos*

Alain Omont

*Vertigineuses symétries*

Antony Zee, traduit par Michel Le Bellac

*Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur <http://laboutique.edpsciences.fr>*

Authorized French translation from the English language edition, entitled "Your Brain is a Time Machine: The Neuroscience and Physics of Time" by D. Buonomano published by WW Norton & Co © 2017.

*Imprimé en France*

**ISBN (papier) : 978-2-7598-2270-6 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2271-3**

© 2018, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de  
Courtaboeuf, 91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

# Remerciements

Le temps de l'horloge est une grande source nivellement. Chacun d'entre nous reçoit équitablement 86 400 secondes chaque jour. Un nombre incalculable de livres ont été écrits afin de nous aider à faire le meilleur usage possible de cette allocation quotidienne de secondes. Le psychologue Philip Zimbardo suggère que nous considérions nos fragments de temps, en particulier ceux qui sont appelés de temps libre, comme des dons qui devraient être livrés sous forme de paquets cadeaux aux personnes et aux activités auxquelles nous attachons le plus de valeur. Je suis reconnaissant aux nombreux amis et collègues qui m'ont fait don d'une partie de leur temps, car s'ils ne l'avaient pas fait, ce livre n'aurait pas vu le jour.

Ce livre est le résultat d'un intérêt de longue date dans la façon dont le cerveau marque le temps – un problème auquel j'ai consacré la plus grande partie de ma carrière scientifique. Au cours de cette traversée, j'ai immensément bénéficié des travaux et des encouragements d'un grand nombre de scientifiques de pointe dans ce domaine de recherches, et je suis en particulier reconnaissant pour leur soutien à Richard Ivry, Michael Mauk et Warren Meck. Je remercie aussi mes autres amis du domaine : Domenica Bueti, Catalin Buhusi, Jenny Coull, Mehrdad Jazayeri, Hugo Merchant, Matt Matell, Kia Nobre, Virginie van Wassenhove et Beverly Wright pour leurs enseignements et leur expertise.

Une partie de la satisfaction dans l'écriture d'un livre réside dans l'exploration de champs situés en dehors du confort de sa propre niche scientifique. En écrivant ce livre, j'ai pris la décision de mettre le doigt dans la physique du temps, et j'ai une dette envers plusieurs physiciens et philosophes qui ont patiemment répondu à mes questions naïves sur le temps, la relativité et la mécanique quantique, parmi eux Richard Arthur, Vincent Buonomano, Sean Carroll, Craig Callender, Per Kraus, Dennis Lehmkuhl, Terry Sejnowski, Lee Smolin, et tout particulièrement Harvey Brown.

Je suis sans aucun doute coupable d'avoir omis ou simplifié à outrance les contributions de nombreux collègues afin de ne pas faire trop long, en m'efforçant d'écrire un exposé accessible d'un vaste domaine scientifique. Mais, au bout

du compte, cela reflète plutôt mes propres limitations comme scientifique et auteur. Je m'excuse par avance auprès des scientifiques dont j'aurais omis les travaux ou auxquels je n'aurais pas donné le crédit mérité.

Plusieurs amis, collègues et collaborateurs ont, soit relu des chapitres particuliers, soit m'ont enseigné une partie du matériau exposés dans ce livre. Je voudrais en particulier remercier Judy Buonomano, David Burr, Chris Colwell, Jack Feldman, Dan Goldreich, Jason Goldsmith, Vishwa Goudar, Sam Harris, Nicholas Hardy, Sheena Jossely, Rodrigo Laje, Michael Long, Hakwan Lau, Helen Motanis, Joe Pieroni, Carlos Portera-Cailliau, Rafael Nùñez et Alcino Silva.

Ma propre recherche sur la façon dont le cerveau marque le temps n'aurait pas été possible sans le soutien du National Institute of Mental Health et du National Science Foundation, aussi bien que du Department of Neurobiology and Psychology à l'UCLA. Je suis reconnaissant à Annaka Harris et à mon éditeur chez Norton, Tom Mayer, pour leurs conseils et leur expertise éditoriale. Finalement je voudrais remercier mon épouse, Ana, qui m'a fait le cadeau d'un si grande partie de son temps.

## Note du traducteur

La principale difficulté de la traduction vient de la différence entre l'utilisation anglaise du mot *time* et l'utilisation française du mot *temps*. Une fois pris en compte le fait que *temps* dans ce livre n'est jamais le temps qu'il fait, traduire *to tell time* pose un problème. En principe on traduit par *dire l'heure* ou *donner l'heure*, mais *donner l'heure à l'échelle de la milliseconde* n'est pas très heureux. D'autre part, en ce qui concerne le cerveau, *to tell time* dans ce livre est souvent associé à l'idée d'un processus actif : le cerveau ne se contente pas de percevoir ou d'indiquer passivement le temps, il utilise cette perception pour induire activement un processus. Faute de mieux, j'ai donc utilisé *marquer le temps*.

Les notes repérées par le numéro du chapitre et par une lettre, du type<sup>3g</sup>, sont de l'auteur, et elles sont rassemblées à la fin du livre. Les notes en bas de page sont du traducteur.

Je remercie de leur aide pour cette traduction : Pascal André, Jean-Marc Lévy-Leblond, Aurélien Liarge, Agnès Mougeot, Nicole Ostrowsky, André Sénik et Bruno Trentini.

Michel Le Bellac, professeur émérite de physique



# Table des matières

<b>Partie I. Le temps du cerveau</b>	<b>1</b>
<b>1 Parfums de temps</b>	<b>3</b>
1.1 La découverte du temps .....	5
1.2 Le temps et les neurosciences .....	8
1.3 Présentisme <i>versus</i> éternalisme .....	11
1.4 La pluralité du temps .....	14
<b>2 Votre meilleure machine à explorer le temps</b>	<b>17</b>
2.1 Le cerveau est une machine à explorer le temps .....	19
2.2 Le temps comme professeur .....	22
2.3 L'orientation temporelle et les erreurs de destination .....	24
2.4 La cause et l'effet synaptiques .....	26
2.5 Marquer le temps sur plusieurs échelles .....	29
<b>3 Le jour et la nuit</b>	<b>34</b>
3.1 Les expériences en isolement .....	36
3.2 Le noyau suprachiasmatique .....	38
3.3 Les cellules qui donnent l'heure .....	39
3.4 La première horloge .....	40
3.5 Les mécanismes de l'horloge circadienne .....	43
3.6 Le décalage horaire .....	44
3.7 Se battre contre l'horloge .....	47
3.8 Le principe des horloges multiples .....	49
<b>4 Le sixième sens</b>	<b>53</b>
4.1 Les minutages prospectif et rétrospectif .....	55
4.2 La dilatation et la compression du temps .....	57
4.3 Chronopharmacologie .....	59
4.4 Les causes du mouvement au ralenti .....	63

4.5	La compression du temps dans le cerveau .....	70
<b>5</b>	<b>Motifs de temps</b>	<b>73</b>
5.1	Le minutage est comique .....	75
5.2	Le langage bébé .....	76
5.3	Le code Morse .....	77
5.4	Apprendre à marquer le temps .....	79
5.5	Garder la mesure .....	82
5.6	Les oiseaux chanteurs .....	84
5.7	La neuroanatomie du temps .....	87
<b>6</b>	<b>Temps, dynamique neuronale et chaos</b>	<b>93</b>
6.1	Minutages supra-périodique et infra-périodique .....	94
6.2	Ondulations et rides .....	96
6.3	La plasticité synaptique à court terme .....	97
6.4	Les réseaux dépendant de l'état .....	101
6.5	Horloges de population .....	102
6.6	Les horloges pour événements spécifiques .....	104
6.7	Dynamique du cerveau .....	107
6.8	Le chaos déterministe .....	109
<b>Partie II. La nature physique et mentale du temps</b>		<b>117</b>
<b>7</b>	<b>Les gardiens du temps</b>	<b>119</b>
7.1	Des neurones et de la prolifération nucléaire .....	120
7.2	Calendriers .....	124
7.3	Les premières horloges .....	125
7.4	Pendules .....	127
7.5	Quartz et césium .....	130
7.6	Vendre du temps .....	132
<b>8</b>	<b>Le temps : qu'est-ce que cela peut bien être ?</b>	<b>135</b>
8.1	Retour sur le présentisme et l'éternalisme .....	137
8.2	Le temps, qui en a besoin ? .....	138
8.3	Sans opinion sur le présent .....	140
8.4	La flèche obstinée du temps .....	142
<b>9</b>	<b>La spatialisation du temps en physique</b>	<b>149</b>
9.1	La relativité restreinte .....	150
9.2	La simultanéité est perdue .....	155

9.3	L'espace-temps .....	159
9.4	Pouvons-nous réconcilier la physique et les neurosciences du temps ? .....	163
9.5	L'univers-bloc est-il compatible avec les neurosciences ? .....	165
<b>10</b>	<b>La spatialisation du temps en neurosciences</b>	<b>171</b>
10.1	Les enfants et le temps .....	172
10.2	Mercredi .....	174
10.3	Kappa .....	176
10.4	Horloge ou mémoire ? .....	178
10.5	La relativité en physique et en neurosciences .....	181
<b>11</b>	<b>Le voyage mental dans le temps</b>	<b>185</b>
11.1	Revisiter et prévisiter .....	186
11.2	Le voyage mental dans le temps chez les animaux .....	188
11.3	Vivre au présent .....	191
11.4	Envoyer des messages pour l'avenir .....	192
11.5	La myopie temporelle .....	194
11.6	Le cerveau et le voyage mental dans le temps .....	197
<b>12</b>	<b>La conscience : le lien entre le passé et le futur</b>	<b>203</b>
12.1	Fragments de temps .....	204
12.2	La recalibration du temps .....	205
12.3	Les corrélations de la conscience .....	207
12.4	Temps et libre arbitre .....	209
12.5	Les humains sont-ils prédictibles ? .....	211
12.6	Crime et châtement .....	215
	<b>Notes</b>	<b>221</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>241</b>
	<b>Index</b>	<b>265</b>



# **PARTIE I**

## **Le temps du cerveau**



# 1

## Parfums de temps

La seule chose qui nous appartient vraiment est le temps ; même celui qui n'a rien d'autre possède au moins cela.

– BALTAZAR GRACIAN

homme

femme

jour

temps

an

Qu'est-ce que les mots de la liste ci-dessus ont en commun ?

Le lecteur sera certainement pardonné de ne pas avoir reconnu une liste de cinq des substantifs parmi les plus utilisés de la langue française<sup>1a</sup>. Que trois de ces mots soient « temps » ou des unités de mesure du temps est une conséquence de l'énorme importance que joue le temps dans notre vie quotidienne. Quand nous ne sommes pas en train de demander l'heure, nous parlons *d'économiser le temps, de tuer le temps, de ne pas avoir le temps, de temps mort, de gagner*

*du temps, du bon vieux temps, de temps du voyage, de temps libre, et mon exemple favori, le temps des vacances*<sup>1</sup>.

De leur côté, les scientifiques et les philosophes parlent de *temps subjectif, de temps objectif, de temps propre, de temps-coordonnée, de temps émergent, de perception du temps, de codage du temps, de temps relativiste, de cellules de temps, de dilatation du temps, de temps de réaction ou d'espace-temps*.

Incidentement, bien que *temps* soit un des substantifs les plus utilisés, il n'y a pas de consensus sur sa définition. De fait, le défi posé par la tentative de définir le temps a été appréhendé dans une citation fameuse du philosophe chrétien Saint Augustin il y a 1600 ans :

Qu'est-ce que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais. Si je veux l'expliquer à quelqu'un, je ne le sais plus.

Il y a peu de questions aussi embarrassantes et profondes que celles qui ont trait au temps. Les philosophes méditent sur la nature du temps et se demandent si c'est un moment unique ou bien une dimension à part entière. Les physiciens débattent pour savoir pourquoi le temps semble s'écouler dans une seule direction, se demandent si le voyage dans le temps est possible, ou même si le temps existe vraiment. De leur côté, les spécialistes des neurosciences – les neuroscientifiques – et les psychologues bataillent pour comprendre ce que veut dire « ressentir » le passage du temps, comment le cerveau marque le temps et pourquoi les humains ont une capacité unique à se projeter mentalement dans le futur. Et le temps est au cœur de la question du libre arbitre : est-ce que le futur est une voie ouverte, ou est-il prédéterminé par le passé ?

L'objectif de ce livre est d'explorer ces questions et, autant que possible, d'y donner une réponse. Cependant, nous devons reconnaître au préalable que notre capacité à répondre aux questions relatives au temps est contrainte par la nature même de l'organe qui pose ces questions. Bien que la masse gélatineuse des quelques 100 milliards de cellules neuronales dissimulées dans notre boîte crânienne soit le dispositif le plus sophistiqué de l'Univers connu, il n'a pas été « conçu » pour comprendre la nature du temps, pas plus que votre ordinateur portable n'a été conçu pour écrire ses propres logiciels. Ainsi, à mesure que nous

---

<sup>1</sup> La liste est encore plus révélatrice en anglais, où les cinq substantifs les plus fréquents sont *time* (temps), *person* (personne), *year* (année), *way* (chemin) et *day* (jour). De même l'anglais utilise *time* là où le français choisit souvent un autre mot. Dans la version originale anglaise, la seconde liste est : *asking for the time* (demander l'heure), *saving time* (économiser le temps), *killing time* (tuer le temps), *servicing time* (purger sa peine), *keeping time* (garder la cadence), *not having time* (ne pas avoir le temps), *to track time* (pister le temps), *bedtime* (heure du coucher), *time outs* (temps mort), *buying time* (gagner du temps), *good old times* (le bon vieux temps), *time travel* (voyage dans le temps), *overtime* (heures supplémentaires), *free time* (temps libre), *lunchtime* (heure du déjeuner).

allons explorer la question du temps, nous apprendrons que nos théories et nos intuitions sur le temps en révèlent autant sur la nature du temps que sur l'architecture et les limitations de notre cerveau.

## **1.1** La découverte du temps

Le *temps* est compliqué, bien plus que l'espace.

Bien sûr il est vrai que l'espace possède plus de dimensions que le temps : trois nombres sont nécessaires pour localiser la position d'un point dans l'espace, par exemple la latitude, la longitude et l'altitude pour un point de la Terre, alors qu'un seul nombre suffit pour spécifier un instant dans le temps. Ainsi, en un sens, l'espace est plus compliqué, mais l'idée que je défends est qu'il est au contraire beaucoup plus compliqué pour le cerveau humain de comprendre le *temps* que l'espace.

Considérons nos cousins vertébrés, avec lesquels nous partageons une large part de notre câblage neuronal. Les vertébrés sont capables de naviguer dans l'espace, de créer une carte interne de leur environnement et donc, en un sens, de « comprendre » le concept d'espace. Les animaux peuvent migrer sur de très longues distances avec un objectif clair de l'endroit dans l'espace vers où ils se dirigent : ils se rappellent où ils ont stocké leur nourriture, et même un chiot sait que si une friandise est tombée derrière son panier, il peut essayer de contourner celui-ci et récupérer la friandise du côté gauche, du côté droit ou bien du dessus. Nous savons que les cerveaux des mammifères possèdent une carte interne hautement sophistiquée de l'espace parce que les spécialistes des neurosciences ont procédé, depuis quatre décennies, à des enregistrements à partir des *cellules d'espace* de l'hippocampe. Les cellules d'espace sont des neurones qui déchargent (se déclenchent) quand un animal est localisé à un endroit spécifique, par exemple à l'intérieur d'une pièce, c'est-à-dire en un point particulier de l'espace. Dans leur globalité, ces cellules forment un réseau qui crée une carte spatiale du monde extérieur, une sorte de GPS, mais bien plus adaptable : par exemple, nos cartes spatiales internes semblent être mises instantanément à jour quand les limites de la pièce sont modifiées ou que les objets de cette pièce sont déplacés.

Non seulement les animaux peuvent naviguer dans l'espace, ils peuvent aussi le visualiser<sup>1b</sup>. Debout au sommet d'une montagne, nous pouvons voir le ciel au-dessus de notre tête, et en-dessous la forêt ainsi qu'une rivière sinueuse qui coule vers l'océan – chaque élément trouve sa place dans l'espace. Nous pouvons aussi « entendre » l'espace, c'est-à-dire localiser le point dans l'espace d'où provient un son. Notre sens du toucher nous informe non seulement de la

position et de la forme des objets, mais aussi de la localisation dans l'espace de notre bien le plus précieux : nos membres.

Pour le temps, c'est différent. Bien entendu, les animaux ne peuvent pas naviguer physiquement dans le temps. Le temps est une route sans la moindre bifurcation, intersection, sortie ou rond-point. C'est probablement pour cette raison qu'il n'y a eu que peu de pression de la part de l'évolution pour que les animaux cartographient, représentent et comprennent le temps avec la même fluidité que l'espace. Nous verrons que les animaux peuvent certainement se repérer dans le temps et anticiper l'instant où des événements vont se produire, mais il est peu probable que nos cousins vertébrés puissent comprendre les différences entre le présent, le passé et le futur de la même façon que leurs cerveaux perçoivent les différences entre le haut, le bas, la droite et la gauche. Nos organes sensoriels ne détectent pas directement le passage du temps<sup>1c</sup>. À la différence des Tralfamadoriens fictionnels du roman de Kurt Vonnegut *Abattoir-5 (Slaughterhouse-Five)*, nous ne pouvons pas voir au travers du temps, en embrassant d'un seul regard le passé, le présent et le futur.

Le cerveau de tous les animaux, humains inclus, se présente sous une forme mieux équipée pour naviguer dans l'espace, le ressentir, se le représenter et le comprendre bien mieux que dans le cas du temps. De fait, une des théories décrivant la façon dont les humains en sont venus à comprendre le concept de temps postule que le cerveau humain s'est emparé de circuits déjà en place pour se représenter et comprendre l'espace (chapitre 10). Ainsi que nous le verrons, c'est peut-être une des raisons pour lesquelles toutes les cultures semblent utiliser des métaphores spatiales pour parler du temps : c'était une *longue* journée, je me *projette* dans le futur de ma relation, avec le *recul* je n'aurais pas dû dire cela.

Pour les scientifiques également, le temps est plus compliqué que l'espace. Les domaines de la science, tout comme les humains, passent par des phases de développement : ils mûrissent et changent à mesure qu'ils se développent. Et dans de nombreux domaines une signature de ce mûrissement est la prise en compte progressive du temps.

On peut raisonnablement affirmer que la science moderne a commencé avec la géométrie, formalisée par Euclide au troisième siècle avant notre ère. On définit souvent la géométrie comme « *la branche des mathématiques qui traite des relations entre les points, les lignes, les surfaces et les solides* »<sup>1d</sup>. La géométrie euclidienne est remarquable parce que c'est une des théories les plus élégantes et les plus flexibles de l'histoire des sciences et parce qu'elle a acquis sa stature en dépit de sa totale indifférence au temps. La géométrie aurait aussi bien pu s'appeler *spacéométrie* : l'étude des objets qui sont gelés dans le temps et qui ne changent jamais. La géométrie fut un des tout premiers domaines de la science

pour une excellente raison : la science est incomparablement plus simple si on peut se débrouiller en ignorant le temps.

Les mathématiques dont disposaient les philosophes et scientifiques grecs n'étaient pas adaptées à l'étude de la manière dont les objets changent avec le temps. De plus, dans l'Antiquité, il était bien plus simple de mesurer les distances que de mesurer le temps. Aujourd'hui c'est exactement le contraire : nous pouvons mesurer le temps avec une bien meilleure précision que l'espace (chapitre 7). Cela a pris deux mille ans après Euclide pour que l'on soit capable d'incorporer pleinement le temps dans les mathématiques et la physique. Un pas important dans cette direction fut fait à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle lorsque, selon une histoire probablement apocryphe, un Galilée qui s'ennuyait en observant le balancement d'une lampe suspendue au plafond, remarqua que le temps pris par la lampe pour exécuter une oscillation complète était indépendant de l'amplitude de cette oscillation – autrement dit, la période de l'oscillation était la même que la lampe se balance faiblement ou fortement. On montra ultérieurement que la période augmentait légèrement avec l'amplitude<sup>1e</sup>. En étudiant le mouvement, la façon dont la position des objets varie avec le temps, Galilée fit un pas vers la naissance du domaine de la dynamique. Mais, à l'instar des Anciens Grecs, Galilée ne disposait pas des outils mathématiques nécessaires pour définir précisément les relations entre forces, mouvement, vitesse et accélération. Ce sont Newton et Leibniz qui inventèrent l'outil mathématique ultime capable d'appréhender la façon dont les objets changent avec le temps : *le calcul différentiel et intégral*<sup>lf</sup>. Avec cet outil, Newton fut capable de décrire les lois qui régissent aussi bien la chute des pommes que le mouvement des planètes en orbite autour du Soleil.

Newton croyait à un temps absolu, un temps qui, « *par sa nature même, s'écoule équitablement et sans aucune considération pour quoi que ce soit d'extérieur.* » Pour lui, il existait un temps vrai et universel qui s'appliquait sans équivoque en tout point de l'espace. L'univers de Newton apparaît déterministe : quel que soit l'instant dans le temps, passé ou futur, la configuration de cet instant pourrait être en principe entièrement déterminée par celle de l'instant présent. Mais plusieurs percées scientifiques étaient en stock. Deux d'entre elles sont particulièrement pertinentes pour notre propos. En premier lieu, petit à petit, les scientifiques se rendirent compte de la dure et décourageante (pour certains) réalité que même dans un univers obéissant aux superbes lois de Newton, il n'était pas possible *en pratique* de prédire le futur (ou de reconstituer le passé). Les travaux de plusieurs scientifiques, et parmi eux le mathématicien et physicien français Henri Poincaré et le météorologiste américain Edward Lorenz, mirent au jour le fait que des différences minuscules dans l'état initial d'un système pouvaient donner des résultats complètement différents

dans une phase ultérieure, ce que l'on appelle la sensibilité aux conditions initiales ; l'exemple le plus fameux est *l'effet papillon* dans la prévision météorologique. C'est ce que l'on appelle aussi le *chaos*, ou de façon plus correcte, le *chaos déterministe*, et nous verrons qu'il pointe le bout du nez quand on étudie le système dynamique le plus complexe que nous connaissions : notre cerveau (chapitre 6). La seconde avancée fut l'œuvre d'Albert Einstein, qui balaya la notion d'un temps absolu et universel. Défiant toute intuition, Einstein établit que le temps était relatif, propre à chaque observateur (chapitre 9). Nous examinerons cette propriété en détail mais, pour l'instant, le point est que le problème du temps s'est progressivement enraciné et est devenu fondamental en physique, à mesure que celle-ci mûrissait. Jusqu'à un certain point. Ironiquement, dans certains cercles, il existe une tendance à éliminer complètement le temps de la physique<sup>1g</sup>, avec un retour à un univers géométrique statique que le physicien Julian Barbour appelle *Platonica* – une allusion à la notion platonicienne suivant laquelle les formes géométriques idéales sont des entités réelles qui existent dans un univers intemporel.

## 1.2 Le temps et les neurosciences

On a également observé un mûrissement analogue dans plusieurs autres domaines scientifiques. Par exemple, la biologie moderne a commencé au XIII<sup>e</sup> siècle comme une taxonomie assez descriptive et statique des formes de la vie, mais elle a mûri et incorporé le temps sous forme de la dynamique de l'évolution. Darwin a joué pour la biologie le rôle de Galilée pour la physique : il a compris que les espèces sur la planète Terre étaient en « mouvement » constant : elles connaissent des mutations, des extinctions et des évolutions.

Le domaine des neurosciences et celui de la psychologie ont aussi évolué et incorporé progressivement le concept de temps. Quelle que soit votre opinion sur la pseudoscience qu'est la phrénologie, au moins les phrénologues reconnaissent la signification de notre sens du temps. Ils ont attribué notre conception du temps à une aire des lobes frontaux commodément localisée entre *accord* et *espace* (« localité ») (figure 1.1). Selon un manuel de phrénologie :

La fonction de cette faculté est de marquer le passage du temps, de la durée, de la succession des événements, etc. Elle a aussi pour fonction de se rappeler les dates, de garder la cadence dans la musique et dans la danse et de susciter la ponctualité dans le respect de ses engagements<sup>1h</sup>.

William James, le fondateur de la psychologie moderne, a également reconnu l'importance du temps quand on cherche à comprendre comment l'esprit

potentiel d'action 27, 64, 86  
 précision 7, 31, 35, 36, 40, 49, 81,  
     95, 97, 119, 120, 129, 130, 132,  
     134, 153, 218  
 présentisme 11–14, 137–139, 162,  
     169, 184, 204  
 principe  
     des horloges multiples 31, 49  
     d'équivalence 161  
     d'invariance de la vitesse de la  
         lumière 151  
     de relativité 150, 151, 153  
 processus sans mémoire,  
     ou markovien 123  
 prosodie 30, 75, 77, 79

## R

radioisotope 15, 121  
 rayonnement  
     électromagnétique 21, 93, 131,  
     139, 166, 203  
     ultra-violet (UV) 42  
 réchauffement climatique 194  
 réduction de la fonction d'onde 147  
 référentiel 150  
     galiléen 151, 153, 154  
 règle de Born 146  
 relativité  
     générale 19, 133, 140, 155,  
     161, 162, 169, 216  
     restreinte 18, 134, 140, 150,  
     152, 155, 156, 159–162, 169,  
     172, 173, 181, 182  
 renversement du temps 141, 142  
 réseaux de neurones  
     et chaos 110  
     état actif 101, 102  
     état caché 102

    états récurrents 28, 109, 111  
 résonance 42, 48, 49, 131, 184, 204  
 retard interauriculaire 29  
 réversible 146  
 révision rétrospective temporelle  
     207  
 roue libre 38, 40, 43, 47, 48, 51  
 rythme circadien 38–40, 42, 47, 51

## S

saccade 58, 204, 205  
 scrub jay 189, 190  
 seconde (s) 4, 8, 20, 23, 29–31, 35,  
     49, 50, 53, 57–62, 64, 65, 69,  
     71, 75, 76, 78, 80, 82, 85, 87,  
     88, 90, 91, 93, 94, 96, 98, 102,  
     105–107, 109, 119, 120, 125,  
     127, 130, 131, 133, 134, 138,  
     139, 153, 154, 156, 157, 164,  
     175, 177, 178, 180, 192,  
     207–209, 212  
 second principe de la  
     thermodynamique 142, 143,  
     144, 145, 146  
 sensibilité aux conditions initiales 8  
 simultanéité 155, 157, 159, 181, 207  
 spatialisation du temps 164, 174,  
     202  
 STDP (*Spike-Timing-Dependent  
 Plasticity*) 27–29  
 surcadence 64, 67  
 synapse 22, 26–29, 64, 98, 99,  
     100–102, 112, 114, 115, 199,  
     213, 218  
 synchronisation d'horloges  
     éloignées 130  
 syndrome familial du sommeil 47

## T

taux d'actualisation 195–197

temps

absolu de Newton 236

coordonné universel (UTC) 125

de l'horloge 14, 15

naturel 14, 15

non temporalisé 138

propre 4

subjectif 4, 14, 15, 137, 164, 181

temporalisé 138, 139

THC (tétrahydrocannabinol) 61, 62

trajectoire neuronale 71, 109

transformation de Lorentz 152, 158

tronc cérébral 62

trouble du sommeil 47

trou de ver 19

## U

univers-bloc 11, 19, 138, 159, 163,  
168, 169, 211, 216, 217

UTC : *Universal Time Coordinated*  
125

## V

vitesse

limite 151, 161, 162

de la lumière 151–153, 173,  
181, 205

du son 29, 128

voyage

dans le temps 4, 11, 17–19, 162,  
169, 218

mental dans le temps 21, 186,  
188, 190, 191, 193, 197,  
199–202, 218, 219