

Préface

Après des années de travail en commun, Pascal Sommer et moi organisons au siège du Centre national de la recherche scientifique à Paris une conférence scientifique intitulée « Réparer l'humain élastique, des sciences fondamentales à la salle de chirurgie ». Pascal Sommer comme chercheur biologiste, spécialiste reconnu de l'élasticité des tissus, entre autres, et moi comme mécanicien des matériaux et biomatériaux, et spécialiste des sciences pour l'ingénieur avions préparé cet événement dans le cadre de nos responsabilités auprès de la direction du CNRS. Le titre de cette conférence était surprenant pour plus d'un et n'a pas manqué d'attirer l'attention. Ce fut un succès. Des scientifiques de grand talent ont expliqué les avancées des connaissances sur le sujet, et surtout les enjeux de cet humain élastique, cœur de l'essai de Pascal Sommer que j'ai l'honneur et le plaisir de commenter ici. Les questions fusaient : quel pouvait bien être le rôle de l'élasticité dans le corps humain ?

Quelques jours plus tard, Pascal Sommer et moi étions les invités de Madame Fabienne Chauvière, journaliste et productrice de l'émission *Les Savanturiers* sur France Inter, consacrée aux avancées scientifiques. La participation à des émissions de radio, sans être exceptionnelle, n'était pas dans nos habitudes régulières. Aussi, dès que l'émission débuta, la journaliste me demanda à brûle-pourpoint si le titre de notre colloque n'était pas un peu provocateur. Surpris par cette entame incisive, je fis une réponse générale et, il faut bien le dire, convenue, un peu désarçonné par la question. Pascal Sommer prit alors la parole et répondit à Fabienne Chauvière que sans élasticité, elle ne serait pas vivante, son cœur ne battrait pas, ses poumons ne fonctionneraient pas et ne permettraient pas sa respiration, le sang ne coulerait pas longtemps dans ses artères, les mouvements de son corps seraient impossibles, que sa peau craquerait et que l'âge affaiblirait cette fonctionnalité dans toutes les parties du corps. La surprise fut inversée et l'émission partit sur de bonnes bases. Je crois que c'est cette réponse, qui a duré moins d'une minute, qui m'a montré de façon concentrée à quel point l'élasticité du corps humain était vitale. Le colloque avait montré

que l'observation de cette élasticité était aujourd'hui bien avancée et fortement documentée, que son rôle était pris vraiment au sérieux, mais que ses déterminants n'étaient qu'imparfaitement connus. Il fallait les comprendre à toutes les échelles de l'humain : de l'échelle de l'ADN ou des protéines à celle macroscopique des tissus, en passant par les échelles des composants cellulaires ou tissulaires variés. Mais revenons à la description mécanique de l'élasticité, puisque j'ai l'honneur d'introduire ce concept dans cet essai, à la demande de Pascal Sommer.

L'élasticité est une propriété de la matière dont la connaissance fine est à la base de toutes les conceptions des objets et outils façonnés ou utilisés par l'Homme. Aujourd'hui, l'élasticité est bien comprise et modélisée dans le domaine mécanique. On distingue des formes différentes, qui ont toutes en commun de relier l'état de contrainte à l'état de déformation d'un matériau en un point de l'espace. On conviendra que ces lois sont fort utiles, car elles permettent de modéliser par exemple le point de rupture d'une aile d'avion ou de l'enceinte du réacteur d'une centrale nucléaire. Lorsque les comportements mécaniques sont linéaires, c'est-à-dire avec des matériaux simples et non structurés, cette élasticité est décrite par une loi (dite « de Hooke ») dont la formulation mathématique est introduite en annexe, section A.1. Cette organisation s'appelle l'isotropie, quand les propriétés mécaniques d'un segment sont indépendantes d'une organisation de l'ensemble (ce point est en discussion pour caractériser le comportement de l'univers).

Et dans le cas des tissus vivants, me demanderez-vous ? Nous n'avons pas d'information précise. Il est évident que les milieux biologiques sont rarement organisés de façon uniforme et qu'ils possèdent aussi tous une élasticité, même réduite, dont la formulation est très complexe. En langage physique, on qualifie d'anisotrope leur organisation quand des directions organisationnelles s'imposent, comme dans une paroi veineuse ou un os. Il faut alors davantage de constantes mécaniques pour les caractériser et les modéliser mathématiquement. C'est notamment le cas chez les animaux à sang chaud, dont l'élasticité peut dépendre de la température, car les lois de la thermodynamique sont d'autant plus à prendre en compte. Il est probable que nous soyons en présence d'un mélange de plusieurs types d'élasticités, à l'instar de certains polymères élastiques, mais la question reste ouverte et dépendra probablement de l'échelle à laquelle on se placera.

Enfin, rappelons également que la matière nous offre des variantes intéressantes d'élasticité.

Tout d'abord, la visco-élasticité, qui introduit des retards dans la réaction élastique de la matière sollicitée. C'est typiquement le cas pour la matière vivante, où des viscosités sont à l'œuvre à toutes les échelles. On peut d'ailleurs mesurer des cartes de

viscosité comme de rigidité des tissus vivants, et en tirer des informations cliniques utiles. On peut s'y intéresser pour les tissus musculaires, en regard de la maladie de Duchenne par exemple, ou pour la rigidité des tumeurs. L'injection d'acide hyaluronique dans les articulations répond à cette nécessité d'augmenter localement la visco-élasticité.

On pourrait parler aussi de la super-élasticité, typique de certains matériaux artificiels utilisés dans le corps humain pour leur capacité à avoir une mémoire de forme. On s'en sert, par exemple, pour fabriquer des stents ou du fil opératoire, qui seront évoqués dans cet ouvrage. Cette élasticité particulière vient d'un changement de phase du matériau au cours de la sollicitation. Ce phénomène est alors mis à profit pour stocker des déformations particulières et les restituer, activant ainsi un effet mémoire. Les matériaux inertes les plus classiques dans ce domaine sont les alliages de nickel-titane, que l'on retrouve dans certaines prothèses.

Enfin, citons l'hyper-élasticité, concept qui a permis de comprendre et de modéliser le comportement élastique non-linéaire de nombreux milieux, et en particulier biologiques. La peau en est un exemple. Dans ce cas, on utilise la donnée d'un potentiel thermodynamique, comme l'énergie libre dont dérive une loi de comportement, pour les caractériser.

Ce bref rappel sur l'élasticité permet de montrer que l'élasticité des tissus vivants s'intègre dans une grande histoire de la mécanique des solides et des fluides commencée au milieu du XVII^e siècle. Elle s'est suffisamment élargie pour prendre en compte de nombreux phénomènes complexes, y compris les phénomènes maintenant décrits par la biologie. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'ouvrage de Pascal Sommer, dont les compétences en sciences biologiques, humaines et sociales illustrent parfaitement la très grande diversité, mais aussi la très grande complexité, qu'il faut ajouter à la physique pour s'y frotter.

Aujourd'hui, les développements de l'élasticité du vivant trouvent un champ d'application particulièrement fertile dans la mécanobiologie. Il s'agit de constater, puis d'essayer de comprendre l'effet de la mécanique sur la biologie. À titre d'exemple, on peut ainsi orienter le développement d'une cellule souche ou tumorale en jouant sur l'élasticité du support sur lequel elle est posée. Ce type de phénomène, qui n'est pas encore complètement compris, illustre bien cette relation étonnante. Dans un autre domaine, on peut également constater combien les cellules qui sont à la base du remodelage osseux et cicatriciel sont fortement influencées par la gravité terrestre. Une conséquence fâcheuse se constate dans la perte osseuse que subissent nombre d'astronautes soumis à la microgravité lors de vols spatiaux. Ce phénomène, très étudié, équivalent à de l'ostéoporose, n'est pas non plus totalement compris.

On pourrait multiplier les exemples à l'envi, le champ d'action de l'élasticité du vivant étant immense. Et nous sommes loin encore d'avoir acquis la compréhension et la connaissance de ces nombreux phénomènes. La lecture de l'ouvrage de Pascal Sommer sur ce « système élastique », qui n'a jamais été exposé à ce niveau de synthèse, pourra facilement donner au lectorat la mesure de l'immensité des phénomènes biologiques associés au comportement élastique et leur importance dans notre vie. Je suis convaincu que les années prochaines seront cruciales pour la connaissance dans ce domaine, et que nous obtiendrons des résultats nouveaux et utiles pour l'humanité. Bonne lecture !

Yves RÉMOND
Professeur émérite au laboratoire Icube
Université de Strasbourg

Introduction



Figure I.1. *Les désastres de l'humain élastique*

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE I.1.— *L'intention de ce premier tableau est d'illustrer la faiblesse d'un corps délaissé de ses forces élastiques. Il est inspiré par la gravure de Francisco de Goya dans son ouvrage intitulé Les Désastres, illustrant les conséquences de l'invasion des troupes napoléoniennes en Espagne. Le tableau Gracias á la almorta représente les effets de la famine et de l'utilisation d'un succédané de pain à base de farine de pois de senteur. Ce végétal comporte une neurotoxine*

pouvant entraîner une paralysie des membres inférieurs, et une autre toxine qui empêche la bonne formation des fibres de collagène et des fibres élastiques, avec des conséquences pathologiques graves sur le squelette. Le terme « lathyrisme » dérive du nom générique des pois, dont certaines espèces de Lathyrus. La gravure de Goya représente une famille dont je n'ai repris que trois membres, avec une femme incapable de se lever pour boire et manger.

Cet ouvrage sur l'élasticité du vivant a pour ambition de présenter une vision globale de l'élasticité du corps humain. On pourrait d'ailleurs étendre une grande partie de ses réflexions à tous les mammifères. Cette vision de l'élasticité du vivant est omniprésente dans l'art ou la culture, car elle est sous-jacente à la perfection du corps ou à ses imperfections, innées ou acquises avec le temps. La représentation de la jeunesse à la belle peau lissée sur un corps tonique, ou de la vieillesse avec ses peaux ravinées apposées sur des silhouettes affaiblies l'illustre constamment au cours de toute l'histoire de la peinture. Mais les conséquences d'un défaut d'élasticité trouvent une illustration encore plus marquante dans une gravure des *Désastres* de Francisco de Goya, qui renvoie à la période des invasions napoléoniennes. La figure intitulée *Gracias á la almorta* décrit ainsi des personnages affalés, éventuellement en détresse respiratoire, incapables de se tenir debout et quémandant de l'aide pour porter une simple cruche d'eau à la bouche. Je me suis librement inspiré de cette gravure dans la figure I.1 pour en faire un symbole de cet ouvrage, comme je me suis inspiré d'autres peintres célèbres pour en illustrer plusieurs parties. L'iconographie abonde de ces malheureux dont l'élasticité est dégradée par des maladies, infectieuses ou non, capables d'affecter plusieurs de nos organes. Alors, prenons un peu de temps et examinons l'aspect élastique de notre véhicule humain, qui peut être mis à mal de façon violente par une toxine ou un virus, mais qui est aussi mis à mal de façon beaucoup plus sournoise par d'autres pandémies des temps modernes, liées à une alimentation et des comportements délétères qui nous concernent tous.

La science n'a jamais autant infusé dans nos vies ou diffusé d'informations qui peuvent aider à comprendre et gérer au mieux notre fantastique capital d'élasticité. Ses avancées ont sans aucun doute permis d'atténuer le bilan des pertes d'autonomie associées à la perte ou aux défauts d'élasticité. Le sujet est d'actualité, car certains de ces défauts se retrouvent dans les conséquences de la pandémie de coronavirus depuis 2019, à court ou long terme. Cet ouvrage porte l'ambition de partager un savoir sur à peu près toutes les capacités élastiques du corps, que nous utilisons inconsciemment quand tout va bien et qui deviennent tyranniques quand elles sont affectées, car tout simplement indispensables à la vie. Les causes des dérèglements de ces capacités apparaissent nombreuses. La plus évidente est liée au vieillissement, cause universelle. La perte d'élasticité peut aussi être amplifiée en temps de menaces et de crises sanitaires, comme lors d'épidémies ou de pandémies virales, bactériennes et parasitaires

que l'humanité a connues, connaît et connaîtra encore. On peut mourir d'un défaut d'élasticité, notamment lorsqu'une attaque virale induit une réponse inflammatoire exagérée du corps et altère la mécanique des systèmes respiratoire et cardiovasculaire. Les contraintes s'imposent aussi très fortement sur notre mécanique corporelle, du fait des effets néfastes d'une industrialisation non contrôlée. Elles seront probablement encore amplifiées par les changements climatiques à venir.

Le concept d'élasticité du corps reste très flou, même s'il s'impose à tous dans la réalité de tous les jours, et le prendre en compte permet d'enrichir des comportements ludiques ou préventifs, ou encore d'accompagner des recommandations et des prescriptions dans de multiples domaines. C'est l'ambition de cet ouvrage de le présenter sous une forme qui se veut accessible et systémique, dans une approche fonctionnelle, voire performative. Je sais, par expérience, à travers les multiples questions qui me sont posées, que la notion d'élasticité n'est adressée qu'occasionnellement et dans des situations critiques. La première partie décrit ainsi de façon globalisante l'élasticité de la peau, des tissus et des organes, ainsi que la charpente du corps (os, tendons, ligaments, fascias). Puis nous cheminerons ensemble sur le vieillissement et la cicatrisation de la peau, ainsi que sur la calcification et le renforcement des structures qui confèrent leur capacité mécanique au corps. Nous examinerons la situation difficile des enfants et adultes qui ne sont pas dotés d'un capital élastique adéquat. Nous présenterons le rôle essentiel de l'élasticité dans l'acheminement des gaz, des liquides et de l'énergie. Nous verrons comment ce cheminement est affecté lors d'insuffisances respiratoire et cardiovasculaire, mais aussi par l'excès de nourriture et de boissons inadéquats (alcools, sucre ou viande). Nous verrons comment les cinq sens peuvent dépendre de l'élasticité, et nous y ajouterons le sixième sens de la proprioception. Nous verrons enfin comment la sexualité et la fertilité sont intimement concernées par le capital élastique.

Cette première description a pour but de relier les nombreux aspects de l'élasticité de l'Homme dans une vision synthétique. Une fois ces notions introduites, il s'agira de considérer les actions favorisant ou protégeant notre capital élastique, sachant qu'elles relèvent souvent de considérations d'experts, touchant à la fois nos comportements personnels, mais aussi des choix sociétaux. Il fallait alors déclinier une vision qui s'appuie à la fois sur des bases scientifiques incontestables, mais aussi sur des représentations sociales et sociétales fortes. La déclinaison de cette vision synthétique, interdisciplinaire et intemporelle n'était donc pas évidente, et c'est l'analyse quasiment mathématique proposée par Jacques Ellul d'un ancien texte qui m'a offert une segmentation adéquate (Ellul et Rognon 2008). Il s'agit de l'analyse du passage décrivant les quatre cavaliers de *L'Apocalypse de Jean*, que nous ne considérerons que sous l'angle de la construction dialectique. Le premier cavalier est emblématique de l'esprit, quelle que soit sa substance : il monte un cheval blanc, il apparaît en premier, mais

sera réellement actif en dernier. Le second cavalier galope sur un étalon rouge feu et répand la guerre et le stress. Le troisième cavalier est porté par un destrier noir et orchestre la famine. Le quatrième représente la mort et l'immobilité à venir sur son cheval blême. Chacune de ces quatre figures assume une mission qui peut être à la fois destructrice et porteuse de défis. C'est cette délimitation de quatre missions qui m'a séduit et amené, par analogie, à orchestrer la présentation de quatre défis pour l'humain élastique.

Le premier défi consiste à limiter au mieux le stress lié à la perte d'élasticité. Nous décrirons dans cet ouvrage les différentes manifestations de ce stress, qui sont souvent ignorées, même par les thérapeutes. Les progrès de la médecine et de l'ingénierie s'inscrivent dans la lutte contre ces stress. Ce défi est donc l'affaire de spécialistes, mais aussi de patients experts : plus les premiers auront une vue systémique, meilleur sera leur diagnostic ; plus les patients seront instruits, meilleur sera leur dialogue avec les spécialistes. Le second défi est d'ordre alimentaire au sens large, car il concerne tous les intrants qui sont indispensables à l'élasticité du vivant, soit en protégeant et favorisant notre capital élastique, soit en participant à la lutte contre les pollutions. Il est, certes, l'affaire d'experts, mais aussi de bon sens, dans une économie qui a perdu certains de ses garde-fous qu'il faut souvent recadrer. Le troisième défi mobilise nos ressources par le mouvement associé à une sensorialité réfléchie, ce qui semble évident, mais qu'il n'est pas inutile de clarifier. Cette nécessité de l'action et de la perception s'impose pour défier les séquelles provoquées par la sédentarité ou, à l'inverse, l'effet nocif des gestes répétitifs. La préservation d'un bon capital élastique, couplée aux ressources musculaires et sensorimotrices, orchestre effectivement la maintenance de nos mécaniques articulaires et assure la plénitude de l'autonomie. Le quatrième défi s'incarne dans la prise en compte de l'élasticité de l'esprit, individuel et collectif. Il invoque des notions de savoir, de culture et d'éthique, qui seront déclinées dans cet ouvrage sous le strict prisme volontairement réducteur d'une sémantique issue des lois de la mécanique et de l'élasticité. Il introduit la prise en compte de la différence, qu'elle soit innée ou acquise, ce qui ouvre le sujet à des considérations sociales et sociétales qui respectent les valeurs d'humains aux potentiels élastiques différents, par nature ou par mégarde.

La prise en compte de l'élasticité du corps nous conduit donc à gérer ces quatre défis : la gestion du stress, de l'alimentation, du mouvement et de la morale. Ces quatre défis prennent toute leur importance quand les technologies cherchent à dépasser les limites archétypales de l'humanité. Les intentions d'augmentation de l'humain reposent en effet sur le désir de générer un être pourvu d'un corps insensible aux stress, alimenté de manière optimisée, fortifié grâce à des technologies induisant la régénérescence des tissus ou la suppléance des handicaps, et à l'esprit renforcé par l'intelligence artificielle.

La bonne nouvelle est qu'il est possible de prendre soin de ce que nous appellerons notre capital élastique, en assumant correctement les choix et les actes requis. En effet, la bonne gestion de l'élasticité dépend beaucoup de nous, tant au niveau individuel que sociétal. Nous présenterons dans cet ouvrage ce que la médecine et l'ingénierie peuvent faire pour nous, et ce que nous pouvons faire pour nous-mêmes. Par réciprocité, nous explorerons ce que la notion d'humain élastique peut apporter à la société, dans une approche interdisciplinaire allant du plus petit (les gènes, les protéines) au plus grand (l'individu et la société). Chaque partie peut se lire indépendamment, en s'appuyant si nécessaire sur des résumés et précisions techniques consultables en annexe.

Afin de présenter des cas concrets, nous exposerons de façon récurrente la situation de personnes présentant une perte accélérée de leur capital élastique, innée ou acquise, c'est-à-dire d'origine génétique ou non. L'actualité sanitaire relative à des pandémies nous amène aussi à introduire le cas de personnes qui souffrent de la perte d'élasticité, parfois létale et souvent chronique, des poumons ou d'autres organes.

Comme, en fin de compte, cet ouvrage concrétise une vision très personnelle de l'humanité, qui ne peut être sans référence à la culture et à l'esprit des temps, j'ai voulu introduire sept tableaux numériques créés avec des techniques mixtes et inspirés de peintures célèbres, comme autant de manifestations de l'élasticité de l'esprit (*the elastic thinking*).