

Avant-propos

Sapiens face au « mur de la verticalité »

Cet ouvrage collectif *L'avenir de Sapiens et la verticalité* présente parmi d'autres recherches, les travaux exposés lors du premier *symposium* de l'association FREHOPS¹, Fédération des recherches sur l'évolution humaine, l'ostéopathie et la posture au service de la santé, qui s'est tenu le 20 octobre 2023 à Paris, à l'Institut de paléontologie humaine, une fondation Albert 1^{er} Prince de Monaco.

FREHOPS fut créée en 2018 afin de fédérer les connaissances de différentes disciplines concernées par la verticalité axiale de notre espèce, dite « *Homo sapiens* anatomiquement moderne », et par extension, par la verticalité de notre système nerveux central et celle des tissus de soutien connexes osseux, des fascias et du système cardio-vasculaire. Ces connaissances portent sur les modalités de son acquisition dans la lignée des primates, ainsi que sur les troubles actuels du développement en lien avec la verticalité interne qui débute au centre de la base interne du crâne. Cette fédération se distingue par son insistance sur le fait que cette verticalité n'est pas d'origine locomotrice. Elle se met en place au cours de l'embryogenèse humaine le long de l'axe rostro-caudal de la corde dorsale. Ce redressement résulte d'une très longue évolution qui s'est traduite par une incontestable trajectoire géométrique interne, cranosacrée, accompagnée, au minimum, de complexités croissantes de l'encéphale, en particulier du néocervelet et de ses connexions avec le néocortex cérébral. Cette trajectoire, documentée par de nombreux fossiles de primates et leurs descendants actuels, révèle une stabilité des modalités de son évolution passée, qui ne peut s'expliquer sans une reproductibilité de leurs propres principes dont les effets

Avant-propos rédigé par Anne DAMBRICOURT MALASSÉ, Bernard AUTET, Sandra JOFFROY et Djillali HADJOUIS.

1. Voir : www.frehops.org.

sont, au minimum, la complexification de l'embryogenèse neurale. Or ces modalités, génétiques ou épigénétiques, sont toujours incomprises, alors qu'elles constituent notre héritage phylogénétique, celui de processus susceptibles de se reproduire.

Cette reproductibilité nous interpelle donc, ici et maintenant, et nous incite à savoir nous placer sur cette courbe irréversible et à réfléchir à cette destinée héritée, qui invite à la fédération des connaissances et des questions face à la limite géométrique imposée par la verticalité interne qui nous caractérise en tant que *Sapiens*. En effet, si celle-ci marque la limite physique, et donc la fin d'une trajectoire phylogénétique des tissus de soutien, la verticalité n'est pas la fin du processus. Elle en est, en somme, un épiphénomène dynamique, la résultante de processus irréversibles dont les mécanismes transmis par les gamètes au moment de la fécondation, échappent encore aux scientifiques. Au plus, peut-on en inférer des propriétés catalytiques d'autoamplification, ou de sensibilité aux conditions initiales (SCI), pour rendre compte de celles des effets précédents, géométriques, architectoniques, hétérochroniques, neurologiques et de leurs conséquences épigénétiques. Au vu de la dernière dizaine de milliers d'années d'évolution encéphalique, dentaire et occluso-posturale, ces processus n'ont pas cessé et nous en sommes le résultat. Les cellules de la crête neurale et les modalités de la régulation de leur développement par les gènes HOX apportent ici de nouvelles clés de lecture.

Cette courbe montre que le redressement de l'embryon a débuté par une petite inflexion vers 40 millions d'années (Ma), depuis une souche de primate « prosimienne », quadrupède et arboricole, puis celle-ci s'est amplifiée, mais par paliers successifs séparés par des millions d'années, jusqu'au premier seuil de verticalité. Ce seuil a vu disparaître la quadrupédie, tandis que la bipédie occasionnelle déjà bien présente s'est imposée d'elle-même comme le mode de déplacement d'un système nerveux central verticalisé avec les tensions internes de ses enveloppes membranaires, et non plus semi-redressé. Depuis ce seuil, documenté à partir de 4 millions d'années par les premiers hominidés *sensu stricto*², la courbe du temps phylogénétique a suivi une accélération jusqu'à notre anatomie dite « moderne ».

Cette accélération constatée, et toujours inexpliquée, nous positionne ici et maintenant, à la limite physique de la verticalité interne, et consécutivement, face à une authentique question pour le devenir de notre espèce : puisque, sans connaître les mécanismes internes de complexification, au minimum celle du système nerveux central embryonnaire, et dans la mesure où le processus semble suivre une courbe

2. L'introduction de l'embryogenèse et de sa chronologie rostro-caudale distingue catégoriquement les grands singes, autrefois qualifiés de pongidés, des hominidés qui regroupent les espèces à la chorde dorsale redressée (Australopithèque, Paranthrope, Kenyanthrope, *Homo* et *Sapiens*).

exponentielle, il nous paraît nécessaire de replacer les troubles du développement liés à cette évolution de l'embryogenèse, dans cette perspective d'une limite physique à la verticalisation.

La question du devenir de *Sapiens* est donc celle de la verticalité et de tous ses corollaires psychomoteurs, neurophysiologiques, anatomiques, fonctionnels, posturaux et énergétiques. Il est, de fait, nécessaire de replacer le processus de verticalisation de notre espèce actuelle, sur la courbe phylogénétique pour en anticiper les prochains effets et s'interroger sur la pertinence de la conquête de tous les espaces dont *Sapiens* est devenu l'espèce la plus « spécialisée », grâce à son intelligence et son inventivité technologiques, de s'interroger, en conséquence, sur le rôle et la place de l'intelligence artificielle (IA) dans les effets culturels du processus d'humanisation et de son devenir.

L'accélération de ce processus s'observe depuis le premier seuil de la verticalité interne, soit depuis 4 millions d'années. Plusieurs lignées se sont reproduites, mais toutes se sont éteintes à l'exception des *Sapiens* : l'Australopithèque, le Kenyanthrope, le Paranthrope, ainsi que toutes les espèces fossiles du genre *Homo*, avec un cas qui peut nous éclairer sur ces facteurs d'extinctions, l'Homme de Néanderthal, en essayant de comprendre le processus qui en fit une espèce moins verticalisée que les plus anciennes espèces du genre *Homo* dont elle dérive. L'extinction est aussi l'une des conséquences des processus de l'évolution. L'Anthropocène avec le réchauffement climatique et l'extinction massive des espèces végétales et animales en est l'interpellation quotidienne, un phénomène planétaire d'une rapidité à l'échelle des temps géologiques, auquel l'humanité n'a encore jamais été confrontée.

L'ouvrage se présente en deux parties. La première partie aborde les « perspectives paléontologiques » et la seconde partie aborde les « perspectives actuelles : du fœtus à la vie dans l'espace ».

La paléontologie montre, avec l'exemple du Néandertalien, combien la verticalité se pose, en effet, comme la problématique évolutionniste probablement en termes d'équilibres énergétiques (chapitre 1 : Anne Dambricourt Malassé, Djillali Hadjouis, Sandra Joffroy, Bernard Autet), avec des conséquences pour leur système cardiovasculaire (chapitre 2 : Sandra Joffroy, Anne Dambricourt Malassé, Djillali Hadjouis). La problématique s'enrichit d'un essai de reconstruction virtuelle d'une des plus anciennes bases crâniennes d'*Homo erectus* de Chine du Nord – un Sinanthrope de 780 ka – par Tan-Nhu Nguyen (chapitre 3 : Tan-Nhu Nguyen, Anne Dambricourt Malassé, Marie-Christine Ho Ba Tho, Fabienne Lallouet, Tien-Tuan Dao). Enfin, l'os et sa caractérisation (analyse de ses propriétés mécaniques, physiques, chimiques et physico-chimiques) sont remis à l'honneur avec Marie-Christine Ho Ba Tho (chapitre 4).

La seconde partie commence par la face cachée de la vie et « oubliée » de la paléoanthropologie et qui comble la grande absence : ce qui humanise l'hominisation organique. L'humanisation débute avec le développement intra-utérin par les relations entre le fœtus, son environnement et sa mère ; la posture postnatale en dépend, comme le montre Catherine Dolto avec les observations cliniques de l'haptonomie : « nous utilisons le mot de « giron » en haptonomie, pour faire la différence avec l'utérus en tant que muscle creux, vide ou refusant l'enfant, et l'ensemble que forme inséparablement le contenu du bassin [...] l'enfant, installé dans une maison de muscles, fascias et ligaments dont il perçoit les plus minimes modifications » (chapitre 5). À ces connaissances si fondamentales, mais encore ignorées de la paléoanthropologie classique, s'ajoute la fin du « dilemme obstétrical », avec July Bouhallier qui développe et appelle à la prise de conscience d'un nouveau paradigme pour en finir avec les images sociales préconçues, et erronées, sur le corps des femmes enceintes et parturientes qui leur sont préjudiciables (chapitre 6).

Comment un enfant peut-il garder ou apprendre la verticalité lorsque le capital neurologique essentiel au contrôle posturo-moteur est défectueux ? La question est posée par deux cas cliniques rares dans la pratique de la rééducation neuromotrice, présentés par Véronique Leroy-Malherbe, Élise Pineau et Virginie Pineau, avec leur conclusion changeant le regard sur ce handicap : « Il n'est pas illicite de comparer nos deux enfants à des sujets hors du commun, eux chez qui la marche est devenue comme un art, eux qui font appel à cette même ambition d'exigence corporelle face à leur déficit massif » (chapitre 7).

L'évolution posturale est également particulièrement bien illustrée par l'occlusion dentaire. Ces liens sont à l'origine du concept d'orthoposturodentie de Michel Clauzade dont les études cliniques portent sur une base statistique de 853 patients. Les relations entre l'intercuspidation et le contrôle postural sont un constat trop souvent ignoré des écoles d'orthopédie dento-maxillo-faciale alors que les statistiques vont dans le sens de la mise en place d'un nouvel équilibre postural en classe squelettique II (mandibule en retrait), le nerf trijumeau s'imposant comme le fil conducteur de l'unité entre l'équilibre occlusal, le système nerveux et la posture (chapitre 8 : Michel Clauzade et Numa Clauzade).

Enfin, la pratique quotidienne en thérapie manuelle et en rééducation appliquées à la posturologie des astronautes contribue à la recherche en médecine spatiale confrontée à un phénomène nommé « déconditionnement » sous l'effet de l'impesanteur, avec des conséquences physiques, physiologiques et psychiques, qui s'apparente à un

vieillessement accéléré. En retour, la médecine spatiale apporte quelques pistes pour constater qu'en effet, la verticalité interne est l'axe de l'humanisation individuelle et qu'elle reste un phénomène indissociable de la force de gravitation terrestre, soulevant la question de la viabilité des êtres humains envoyés en missions spatiales sur de longues distances et longues durées comme sur la planète Mars (chapitre 9 : Denis Ducommun et Loïc Treffel).

Des disciplines appelées à converger

Le choix du titre de cet ouvrage collectif est le fruit de la rencontre, voici plus de 20 ans, entre deux disciplines qui ont encore peu d'occasions d'échanger leurs connaissances : la paléontologie humaine et l'ostéopathie. « L'avenir de la verticalité » exprime, dans cette seule formulation, une nouvelle prise de conscience depuis que Jean-Baptiste de Lamarck (1802) procéda, au tout début du XIX^e siècle, à une rupture sans précédent dans l'histoire de l'humanité en comprenant l'anatomie de notre espèce comme la conséquence d'une suite de transformations d'espèces animales disparues formant l'ordre des primates. Depuis, des fossiles de squelettes et des dents, ainsi que les connaissances en biologie et en biomécanique, ont confirmé Lamarck, mettant l'accent sur son interprétation fonctionnelle des transformations, essentiellement la nécessité de survivre à des changements de l'environnement impactant la locomotion. La problématique s'est imposée d'elle-même comme étant celle de l'appareil locomoteur (ou appendiculaire) : la quadrupédie et l'arboricolisme auraient disparu à cause de l'usage de la bipédie imposée par l'extension des milieux ouverts comme la savane, devenant ainsi exclusive. Se préoccuper de l'avenir de notre espèce consisterait alors à se soucier de la bipédie comme ayant un avenir en soi, alors que le paradigme évolutionniste contemporain ne l'a jamais conçue comme résultant d'un déterminisme phylogénétique.

Il en va autrement dès lors que l'étude prend en compte les trajectoires dynamiques du développement depuis la phase embryonnaire dans son milieu amniotique : la bipédie humaine apparaît alors comme l'un des nombreux effets après la naissance d'une évolution intéressant l'ensemble de l'organisme édifié autour de l'axe rostro-caudal de l'embryon et se manifestant de façon reproductible selon des mécanismes de complexifications croissantes. Ce déterminisme phylogénétique semble se distinguer par des propriétés de mémorisation et pourrait se reproduire depuis notre stade évolutif selon des *stimuli* dont nous ignorons encore les paramètres. L'anticipation prend alors un sens et peut trouver une certaine pertinence en faisant se rencontrer des disciplines en quête de réponses à des questions émergentes ou porteuses de nouvelles thérapies à partager entre des disciplines peu habituées à se rencontrer. FREHOPS se distingue ainsi des associations dédiées à l'étude de l'évolution des

hominidés, par la reconnaissance de la problématique évolutionniste qui fédère des cliniciens et des paléoanthropologues. Cette problématique est l'acquisition de la verticalité interne, aboutissement d'une phylogenèse marquée par une orientation géométrique, celle du redressement de l'axe craniocaudal de l'embryon, plus précisément de la corde dorsale, en lien étroit avec la complexification du système nerveux et des tensions qui animent ses dynamiques.



Figure AP.1. *Sapiens et l'avenir de la verticalité en « L'avenir de Sapiens et k »*

Mondialement connu avec la découverte de « Lucy », la petite Australopithecine bipède qui surprit par son arboricolisme, Yves Coppens (1931-2022) nous avait accompagnés dans la création de FREHOPS, unique par sa vocation fédératrice et ses perspectives tournées vers l'avenir. Il fut, à ce titre, son président d'honneur. Ce

premier *symposium* et cet ouvrage collectif *L'avenir de Sapiens et la verticalité* se veulent un hommage à sa mémoire et à son exceptionnelle ouverture d'esprit héritière de Lamarck et Teilhard de Chardin (1949) qui nous fédérait :

« Ce phénomène n'est bien sûr observable que dans la longue durée, mais il traduit une logique d'une stabilité étonnante, un temps irréversible qui mémorise ! Le sens de l'histoire de la matière inerte, vivante, pensante, dans sa course à la complexité, est un constat troublant. »
(Coppens 1996)

L'affiche du *symposium* fait écho à ce changement de regard, elle est inspirée du film « L'odyssée de l'espace » de Stanley Kubrick (1968) qui s'achève sur un fœtus humain les yeux anormalement ouverts sur la planète Terre, plus océanique que terrestre, pour ne jamais oublier, comme nous n'avons cessé de le rappeler depuis 40 ans au Muséum national d'histoire naturelle, que l'évolution du règne animal, et la nôtre en particulier, n'a jamais quitté le milieu aquatique, que le liquide amniotique en est sa conservation et que notre devenir est conditionné par la protection de notre première matrice, le « placenta planétaire ».

Bibliographie

- Coppens, Y. (1996). Grands noms, grands moments de l'histoire de nos sciences. Annuaire du Collège de France 1995-1996. Résumés des cours et travaux, 96^e année, Collège de France, Paris.
- Lamarck, J.B. (1802). *Recherches sur l'organisation des corps vivants*. Maillart Librairie, Paris. Disponible à l'adresse : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k4226016j/f12.item>.
- Teilhard de Chardin, P. (1949). *La place de l'Homme dans la Nature*. Le groupe zoologique humain. Albin Michel, Paris.

Introduction

La verticalité, fil directeur de nos origines et de notre devenir

Verticalité ou bipédie : une problématique fondée sur une expérience de pensée pionnière, mais inexacte

Depuis Aristote (384-322 av. J.-C.), la verticalité du système nerveux est le critère anatomique qui distingue l'être humain des autres animaux. Le règne animal était classé en archétypes jusqu'à ce qu'en 1802, Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) rompe avec plus de deux millénaires de fixisme. L'acquisition de la verticalité s'imposait comme la problématique évolutionniste des origines de l'*Homo sapiens*, dont dépendent la parole et l'usage des deux mains pour la confection d'objets manufacturés qui aurait permis le développement de la pensée abstraite avec la création de symboles qui ont permis l'invention des mathématiques, inexistantes chez les autres espèces comme le chimpanzé (Radford *et al.* 2009).

Lamarck (1802) eut l'audace d'interpréter la classification fixiste des primates actuels comme la conséquence d'une filiation naturelle reliant les primates dans le passé, divisés alors en trois groupes successifs : 1) les prosimiens quadrupèdes arboricoles, comme les lémuriens actuels de Madagascar ; 2) les simiens quadrupèdes et arboricoles, semi-érigés, avec des espèces de grande taille, comme le chimpanzé et l'orang-outan ; 3) *Homo sapiens*, érigé, biman et bipède avec un cerveau et un cercelet plus volumineux que chez n'importe quel autre primate. Lamarck était toutefois un spécialiste des invertébrés, il méconnaissait l'organisation interne du squelette axial, segmentée depuis la base postérieure du neurocrâne jusqu'à la dernière vertèbre coccygienne. Il tenta d'expliquer par une expérience de pensée comment des

morphologies d'animaux à vertèbres, délimitées en groupes anatomiques bien distincts, avaient pu se transformer. Il porta sa réflexion sur le squelette locomoteur, ou appendiculaire, sans se préoccuper de la base interne du crâne qui s'articule avec la colonne vertébrale. Cette méconnaissance justifia les oppositions d'anatomistes au fait des différences entre les trois groupes de primates : Armand de Quatrefages (1810-1892) qui avait défini la race de Cro-Magnon, et Paul Broca (1824-1880) qui avait localisé la zone du langage articulé dans le cortex préfrontal gauche. La locomotion ne pouvait pas rendre compte de l'organisation spatiale interne de la base crânienne sur laquelle s'arrime la dure-mère et qui enveloppe le cerveau, le cervelet et le tronc cérébral jusqu'au coccyx (Dambricourt Malassé 2022a, 2022b).

L'expérience de pensée de Lamarck était séduisante et accessible à l'imagination. Elle plut à Charles Darwin qui l'intégra en 1872, convaincu de l'hérédité des caractères acquis, et en reconnaissant que la filiation simienne des Hommes était la thèse de Lamarck, professeur de chaire au Muséum national d'histoire naturelle à Paris, ancien Jardin royal des plantes médicinales. Ainsi, malgré les oppositions des anatomistes et médecins qui avaient une bonne connaissance de l'Homme et des primates en général, la locomotion finit par s'imposer comme la cause mécanique à l'origine de l'anatomie verticalisée des *Homo sapiens* et de leurs ancêtres fossiles. Le concept de la sélection naturelle et sexuelle ajoute une dynamique à plus grande échelle, celle des sociétés et de leurs environnements, pour rendre compte de la viabilité à long terme des transformations. L'auto-organisation des systèmes complexes en interaction était implicite.

Cette méconnaissance de l'anatomie interne des squelettes eut pour effet d'éloigner la question des origines de l'anatomie humaine de celle de la verticalité interne, pour se concentrer sur celle de la bipédie exclusive. Il en résulte une scission du squelette toujours d'actualité, avec d'une part, le crâne cérébral et facial, dévolu aux fonctions cognitives, langagières et manducatrices, et d'autre part, le squelette postcrânien, protecteur du cœur et des poumons, et locomoteur (y compris la mère avec son fœtus), qui ne permet pas d'intégrer la base du crâne et ses synchondroses dans une compréhension cohérente de l'évolution morphologique, depuis l'occlusion, ou intercuspidation dentaire jusqu'à la locomotion, en passant par le système nerveux central et le sacrum.

La base postérieure du crâne s'articule, face externe, avec la mandibule par les condyles de sa branche, mais aussi et surtout, face interne, avec la colonne vertébrale unie dès l'embryogenèse par la chorde dorsale et les membranes qui entourent le tube neural. Par ailleurs, contrairement au vieux postulat de Louis Bolk (1926) qui s'intéressait à la position du trou occipital chez les primates, la verticalité de la base

postérieure n'est pas la conformation embryonnaire d'origine. Comme nous l'avons montré, c'est une acquisition due à des forces mécaniques embryonnaires qui brisent la linéarité craniocaudale de l'embryon (Dambricourt Malassé 1988, synthèse dans Dambricourt Malassé 2022a, 2022b). Elle débute au centre de la base crânienne, à l'apex de la corde, à la limite avec la plaque préchordale. La partie du squelette axial qui s'est verticalisée correspond donc à l'axe chordal de l'embryon, du post-sphénoïde jusqu'au coccyx. La scission du squelette en crâne et post-crâne va donc à l'encontre de l'organisation naturelle de sa morphogenèse, alors qu'il est plus cohérent de distinguer le squelette axial, qui protège le système nerveux central, ainsi que le cœur et les poumons bien avant la naissance, et le squelette appendiculaire qui lui permettra de se déplacer après la naissance.

Les espèces fossiles du genre *Homo* étaient bipèdes, pourquoi donc s'intéresser à leur posture ? Les gibbons, des petits primates actuels arboricoles, sont exclusivement bipèdes au sol. Pour autant, leur tronc cérébral est peu redressé, leur cervelet est en position haute et leur bipédie n'est pas celle d'un *Homo sapiens*. Leur posture, leur occlusion, leur développement psychomoteur n'ont rien d'humain ou d'hominien. La verticalité est à peine inscrite dans l'axe chordal.

REMARQUE. Les forces de traction du squelette appendiculaire inférieur redressent la colonne vertébrale lors de la marche, mais elles ne redressent pas la base postérieure interne du crâne. La compréhension des origines de notre anatomie organisée autour de la verticalité interne doit donc être recentrée sur l'orientation du squelette axial depuis la base postérieure avant la naissance, avant d'être portée par le squelette appendiculaire. Ce recentrage est indispensable pour considérer la position du cervelet et du tronc cérébral, les connexions cortico-cérébelleuses et l'équilibre entre la face et la base, avant les fonctions postnatales, car celles-ci sont consécutives aux transformations mises en place avant la naissance. Nous n'avons de cesse depuis 40 ans d'insister sur la période intra-utérine, avec toutes les implications qui en découlent pour les mères et les nourrissons, de l'échelle individuelle à l'échelle sociale, replacées dans leur contexte environnemental, culturel et comportemental (Dambricourt Malassé 2022a, 2022b).

Rappel de la phylogénèse et de l'origine embryonnaire du redressement axial

La phylogénèse, ou classification des primates actuels et fossiles, n'a pas changé depuis Lamarck. Elle s'est complétée de fossiles qui ont trouvé leur place dans l'une des catégories de primates : prosimien, petits singes, grands singes et *Homo sapiens*, en ajoutant des regroupements éteints que la géochronologie place après les grands

singes et avant *Sapiens*¹ : les Australopithèques, les Paranthropes et *Homo* défini par des anatomies éteintes. Les classifications se sont enrichies dans les limites des groupes (plus d'espèces ou plus de genres). L'introduction de la morphogenèse a conforté le constat de regroupement en plan d'organisation de l'embryogenèse, elle montre que la phylogenèse de *Sapiens*, qui débute avec l'émergence des premiers singes vers 45 millions d'années, est au minimum, la conséquence d'accroissement de complexités dans la régulation de la neurulation² (Dambricourt Malassé 1988, 2022a, 2022b ; Chaline et Marchand 2010). Cette classification est lisible dans *The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution* (Jones *et al.* 2009) construite sur des crânes adultes en vue externe. Il suffit de scinder le crâne en deux, dans le plan de symétrie, pour constater un ordre géométrique connu des primatologues depuis plus de deux siècles et déjà mesuré par Delattre et Fenart (1960) grâce aux téléradiographies de profil : une gradation depuis une base de crâne plate prolongée d'un museau long et étroit, et qui se termine avec une base crânienne et une face courte, verticalisées et larges, *Homo sapiens*. Ces corrélations ont été géométrisées en vue de profil par Gudin (Godard et Ducasse 1973) grâce à un protocole télécéphalométrique afin de comprendre l'origine des troubles de l'occlusion des populations humaines modernes, en relation avec l'orientation du clivus et du rachis cervical (figure I.1).

Un protocole similaire, ajoutant le plan transversal, a permis de modéliser une « contraction basi-craniofaciale » enregistrée dans les angles de la mandibule (Dambricourt Malassé 1987, 1988, 1993, 2022a, 2022b). Elle s'est amplifiée depuis les singes jusqu'au seuil de la verticalité, visible vers 4 Ma, et à partir duquel le système nerveux central ne pouvait plus se déplacer qu'en appui sur les deux membres postérieurs devenus inférieurs (figure I.2).

Ce seuil ne fut pas le dernier, les fossiles montrent une nouvelle contraction et verticalisation avec *Sapiens* vers 230 000 ans. La courbe montre ainsi une accélération qui atteint le « mur de la verticalité interne », courbe qui corrobore la fulgurante accélération de la création d'outils manufacturés, création en boucles intégratives qui se sont autocomplexifiées jusqu'aux représentations naturalistes et symboliques du corps, voire celles du soi. En effet, alors que plus de 10 millions d'années séparaient

1. Le nom *Sapiens* est attribué au plan d'organisation morphogénétique de l'anatomie humaine dite « moderne » ou *Homo sapiens Linnaeus* 1758. Le genre *Homo* a été défini par Linné à partir de l'anatomie humaine actuelle. Généralisé par le généticien Ernst Mayr aux espèces éteintes, sans tenir compte de ce premier niveau d'organisation du vivant, alors qu'elles forment un plan d'organisation différent, il en résulte une nomenclature contradictoire, notre anatomie n'étant pas, dans ce cas, une espèce du plan d'organisation éteint *Homo*. *Sapiens* est donc élevé automatiquement dans la nomenclature linnéenne au niveau du genre (Dambricourt Malassé 2017).

2. Étapes de la neurulation. Voir : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Neurulation>.

deux amplifications du redressement de la base jusqu'au seuil de sa verticalité, moins de 4 millions d'années séparent le premier seuil de redressement, de celui de *Sapiens*, le nôtre.



Figure I.1. Le pantographe de Gudin (Godard et Ducasse 1973)

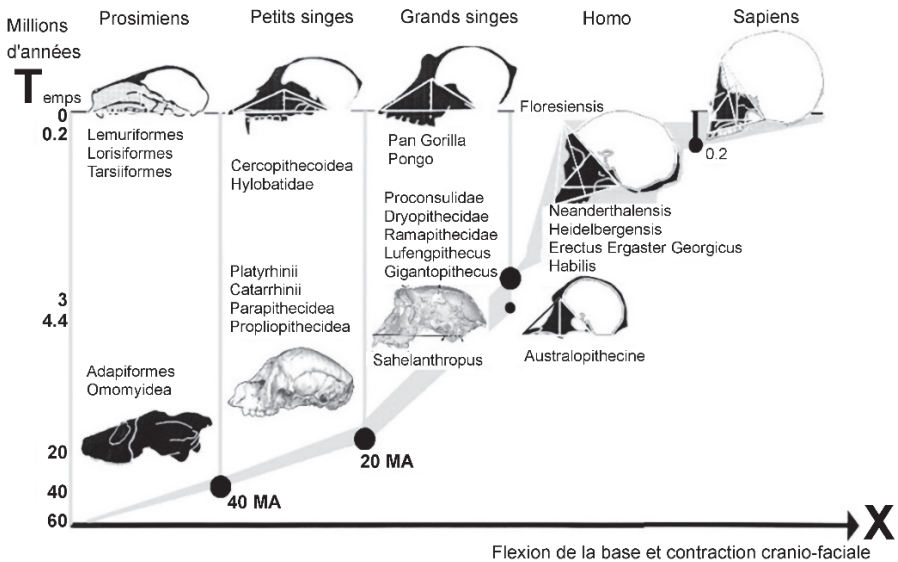


Figure I.2. Phylogenèse des primates actuels et fossiles montrant en vue sagittale médiane, la contraction de la base et de l'étage moyen de la face adulte visualisée par le pantographe de Gudin ((Chaline et al. 2010), repris de (Dambricourt Malassé 1993), actualisé avec les nouveaux fossiles).

Ce qui ressort de cette courbe est une instabilité croissante de l'équilibre du système nerveux central avec une complexification du néocortex cérébral unanimement reconnue par les paléanthropologues et les paléontologues.

Elle montre de même que le processus d'hominisation, qui se manifeste par le redressement du squelette axial segmenté, a entraîné l'instabilité croissante du cerveau, venu se placer au-dessus de la colonne vertébrale et du bassin, et a consécutivement nécessité la complexification du contrôle de son propre équilibre, ou plus précisément de la loge cérébelleuse, impliquant plus de connexions synaptiques avec le néocortex cérébral. Weaver (2005) a montré une accélération de la cérébellisation sur la néo-corticalisation depuis 10 000 ans, si bien que la question se pose de savoir si l'hominisation ne serait pas prioritairement une cérébellisation sur la cérébralisation (Dambricourt Malassé 2024).

Un cas d'école démonstratif : Toumaï

Les désaccords très animés sur l'interprétation du célèbre fossile *Sahelanthropus tchadensis*, surnommé Toumaï, vieux de 7 millions d'années (Ma), avec d'une part, le crâne complet, et d'autre part, des fragments de fémur et d'ulna, illustrent les conséquences de l'absence de prise en considération de l'embryogenèse et de ses dynamiques. Le crâne, particulièrement déformé lors de sa découverte, a été reconstitué virtuellement, mais sans considérer la base interne, alors qu'elle est exceptionnellement conservée et permettait pour la première fois sa comparaison avec un grand singe actuel. Ce fossile a néanmoins été présenté comme le plus vieil hominidé, c'est-à-dire un grand primate exclusivement bipède au sol, ancêtre de la lignée humaine, et non pas comme un grand singe quadrupède, occasionnellement bipède, ancêtre des gorilles, comme l'ont aussitôt proposé des paléoprimatologues (Wolpoff *et al.* 2002 ; Wood 2002). Cette attribution du crâne au plus ancien hominidé connu était en grande partie fondée sur la position du trou occipital qui aurait été plus avancée (Zollikofer *et al.* 2005). Or, la morphologie en forme de U du maxillaire, associée à la grande taille de la racine de la canine et de sa couronne, qui dépasse celle des autres dents, sont caractéristiques d'un grand singe et d'une mandibule également en U, longue et étroite, et dont les condyles sont en position haute et reculée. Ils s'articulaient avec une base interne semi-redressée et une loge cérébelleuse haute, ce qui est précisément l'inverse d'un hominidé. Une comparaison entre le crâne dans son état original et la reconstitution virtuelle a confirmé les raisons d'un doute, en montrant une position du grand trou occipital erronée. Celle-ci est trop en avant relativement au repère classique donné par le méat auditif externe. En effet, une partie de la pyramide pétreuse a disparu, ce qui positionne le bord antérieur du trou occipital (le basion) à hauteur des méats et non en arrière comme chez tous les singes. La correction a

repositionné le basion (Dambricourt Malassé 2006, 2010, 2011, 2022a, 2022b). Le crâne de Toumaï est celui d'un grand singe dont l'équilibre entre l'occlusion et le squelette axial était en porte-à-faux sur un axe clivus-coccyx semi-érigé ; l'animal se déplaçait en mode quadrupède et non pas en équilibre bipède exclusif.

La position du trou occipital est déterminée par le degré d'inclinaison du clivus et des pyramides pétreuses qui forment le bord antérieur de la loge du cervelet. Ce degré est redressé chez les hominidés, *Australopithecus*, *Paranthropus*, *Homo*. Il convenait donc de commencer par vérifier si la conformation interne de la loge cérébelleuse était simienne (semi-redressée) ou hominienne (redressée). L'organisation simienne aurait été constatée sans doute possible, quel que soit le degré de complexité du néo-cortex car celui-ci n'est pas encore formé lorsque le redressement optimal du clivus est atteint au terme de l'embryogenèse. L'imagerie médicale a fini par le confirmer : les canaux semi-circulaires de Toumaï sont caractéristiques d'un singe arboricole, quadrupède et occasionnellement bipède (Le Maître 2015), ce que corrobore le squelette appendiculaire. Ce grand primate se déplaçait en appui sur les articulations des mains (Meyer *et al.* 2023). Toumaï se tenait debout comme le gorille ou le chimpanzé actuel, et cette posture était fréquente chez d'autres espèces fossiles d'Afrique orientale (*Orrorin*, 6 Ma ; *Ardipithecus*, 4,4 Ma), mais aussi d'Asie du Sud (*Lufengpithecus* de Chine du Sud, 7-6 Ma).

Une telle controverse générée par la reconstitution du crâne fossile le plus complet des grands primates du Miocène illustre le peu de curiosité de la paléontologie évolutionniste pour la charnière du redressement axial, alors que, d'une part, l'acquisition de la verticalité interne est le fil « rouge » du processus d'homínisation, et que, d'autre part, son origine embryonnaire est démontrée, publiée et médiatisée depuis trente ans (Coppens 1996). La doxa lamarckienne de la cause mécanique locomotrice ne permet donc pas de comprendre la place de la verticalité de notre système nerveux central, de notre occlusion et des troubles de leurs équilibres dans la phylogenèse, et consécutivement, de mieux comprendre les mécanismes de l'évolution morphogénétique et psychomotrice qui nous concernent, alors que nous sommes aux limites de la verticalité basi-craniosacrale.

Distinguer le plan d'organisation et la diversité, la macroévolution et la diversification

Les bases crâniennes de primates fossiles sont rares ; en revanche, la mandibule qui s'articule avec la base postérieure et qui se modifie nécessairement avec le redressement est le fossile osseux le plus fréquent. Or, la mandibule des singes montre une stabilité des angles qui dépendent du degré de redressement sur plusieurs dizaines de millions d'années. Les espèces actuelles de gorille, de chimpanzé et d'orang-outan

ont les mêmes valeurs angulaires avant la naissance et la même occlusion dentaire, avec une architecture axiale semi-érigée identique. Tous ont ensuite une aptitude à la bipédie après la naissance, mais le système nerveux central est encore semi-érigé et se déplace en quadrupédie (Dambricourt Malassé 1993, 2022b). Leur morphogénèse est apparue vers 20 millions d'années. Elle se retrouve avec les mandibules fossiles comme celles du Proconsul et de l'Ouranopithèque en Europe, du Dryopithèque et Kenyapithèque en Afrique, du Sivapithèque et de l'Indopithèque en Inde, du Khorapithèque de Birmanie et de Thaïlande, du Lufengpithèque et du Gigantopithèque de Chine. Leurs bases sont rares, mais leurs mandibules « parlent » pour elles. Nous ne comprendrons pas l'origine de notre verticalité et celle des hominidés qui nous ont précédés, si nous ne reconnaissons pas le niveau d'organisation concerné par le redressement. Les fossiles et les espèces actuelles nous montrent que c'est précisément la stabilité de l'organisation axiale qui a été perturbée dès l'embryogenèse, chez certaines espèces de grands singes alors que d'autres l'ont transmise jusqu'aux espèces actuelles.

L'aptitude à la bipédie occasionnelle est constitutive de l'architecture axiale semi-redressée, elle est commune à ces espèces fossiles et actuelles d'hominoïdes et transmise depuis 20 millions d'années. Son développement est stable, alors que les écosystèmes occupés par ces différentes espèces étaient différents, avec des squelettes appendiculaires adaptés. Les orangs-outans, qui passent la majeure partie de leur existence à la cime des arbres, ont conservé cette aptitude en se déplaçant sur les branches. La bipédie est l'équilibre occasionnel d'un fonds architectural commun et stable depuis 20 millions d'années, devenu permanent et exclusif au seuil de la verticalité axiale vers 4 millions d'années. L'usage occasionnel de la bipédie était donc la norme, en Afrique comme en Asie. Aucune « tendance » graduelle au redressement interne ne s'observe au fil des millions de générations.

Ce fonds architectural commun correspond à ce que la biologie nomme le « plan d'organisation » ou le « bauplan », qui se met en place au cours de l'embryogenèse, le long des axes céphalocaudal et dorso-ventral, sous le contrôle des gènes régulateurs homéotiques. Le bauplan adulte, ou *body plan*, est une donnée fondamentale de la biologie évolutive ou *Evo-Devo* :

« The body plan concept is not the archaic, outdated, metaphysical concept that it is described to be by some researchers. Rather, it is based on modern evolutionary principles and provides a conceptual foundation for evo-devo research. Major evo-devo concepts such as constraint, evolvability, homology, canalization, integration and modularity, heterochrony, and other concepts are based on the existence of animal body plans. » (Willmore 2012, p. 230)

Il convenait encore de lui ajouter la dimension ontogénétique qui se déploie depuis la formation de l'embryon avec ses trajectoires dynamiques (Dambricourt Malassé 1988, 1993, 2022 ; Dambricourt Malassé et Deshayes 1992 ; Dambricourt Malassé *et al.* 1999). Denis Duboule (2020) use de l'expression « plan de base d'organisation corporel ». C'est donc en intégrant l'embryogenèse que l'anatomie redressée d'un Australopithèque et celle de la plus vieille espèce qui définit le genre *Homo* seront comprises. Ce « blanc de la carte » de l'embryogenèse craniorachidienne avec ses dynamiques vaut pour les hominidés fossiles et donc pour les Néandertaliens.

Le plan d'organisation est donc à distinguer de la diversité des modes de locomotion du squelette appendiculaire, et les paléontologues qui l'étudient ont raison de rappeler que celui du chimpanzé n'est pas un modèle ancestral. Mais cela ne vaut pas pour la morphogenèse du chondro-splanchnocrâne et son inclinaison axiale. La diversité locomotrice a permis la dispersion d'un plan d'organisation axial dans diverses niches écologiques, et sa reproduction jusqu'à l'Anthropocène actuel en gorilles ou chimpanzés pour les grands singes, par exemple, ou en lémurins pour les primates. L'erreur depuis Lamarck est de confondre la microévolution adaptative du squelette locomoteur appendiculaire, qui porte le squelette axial, avec la macroévolution, celle du plan d'organisation dont les forces mécaniques embryonnaires ont redressé le squelette axial depuis la base crânienne, par une succession d'amplifications jusqu'au seuil actuel de la verticalité, *Sapiens*. Le phénomène, perceptible uniquement sur les très longues durées, est irréversible. En d'autres termes, le processus d'amplification s'est reproduit, mais seulement depuis le dernier plan d'organisation, ce qui est déjà en soi une particularité qui le distingue des microévolutions considérées comme aléatoires et indéterminées. L'irréversibilité, d'une part, et la reproductibilité uniquement à partir du dernier niveau d'organisation, d'autre part, permettent d'induire une spécificité évolutive au génome dont nous sommes héritiers et porteurs.

La recherche de stabilité est la loi thermodynamique universelle et elle nous concerne (Bois 2010). Un nouveau redressement embryonnaire correspond à un nouvel état d'équilibre, et la phylogenèse nous montre qu'elle-même a suivi une stabilité, celle de sa trajectoire dynamique et géométrique vers plus d'instabilité axiale et de complexité neurosensorielle. Ce que nous ne comprenons pas, mais qui n'est pas non plus recherché en dehors de l'approche macroévolutionniste encore très rare (Chaline *et al.* 2015 ; Queiros-Condé *et al.* 2022 ; Brissaud *et al.* 2023 ; Fleury 2024), ce sont les mécanismes moléculaires, ou physico-chimiques, qui ont déstabilisé la mémoire héréditaire du *bauplan* alors qu'ils nous concernent ici et maintenant, parvenus au « mur de la verticalité interne ».

Bibliographie

- Bois, E. (2010). La dynamique posturale non-linéaire. Partie I : bases et fondements. *L'Anthropologie*, 114(3), 370–387.
- Bolk, L. (1909). On the position and displacement of the foramen magnum in the Primates. *Proc. Acad. Sci. Amst.*, 12, 362–377.
- Bolk, L. (1926). *Das Problem der Menschwerdung*. G. Fischer.
- Brissaud, I., Chaline, J., Queiros-Conde, D. (2023). *Entropie créatrice. Thermodynamique fractale et quantique de l'Univers, de la vie et des sociétés*. Ellipses, Paris.
- Chaline, J., Marchand, D. (2010). *L'embryon, le singe et l'homme*. Ellipses, Paris.
- Chaline, J., Durand, A., Dambricourt Malassé, A., David, B., Magniez-Jannin, F., Marchand, D. (2000). Were climatic changes a driving force in hominid evolution?. Dans *Climates: Past and Present*, Hart, M.B. (dir). Geological Society, Londres, 185–198.
- Chaline, J., Queiros-Condé, D., Dubois, J. (2015). *Le monde des fractales*. Ellipses, Paris.
- Coppens, Y. (1996). Grands noms, grands moments de l'histoire de nos sciences. Annuaire du Collège de France 1995-1996. Résumés des cours et travaux, 96^e année, Collège de France, Paris.
- Dambricourt Malassé, A. (1987). Ontogenèses, paléontogenèses et phylogenèse du corps mandibulaire catarhinien. Nouvelle interprétation de la mécanique humanisante (théorie de la foetalisation, Bolk 1926). Thèse de doctorat, Muséum national d'histoire naturelle, Paris.
- Dambricourt Malassé, A. (1988). Hominisation et foetalisation. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Séries II, Paléontologie humaine/Human paleontology, 307, 199–204.
- Dambricourt Malassé, A. (1993). Continuity and discontinuity during hominization. Dans *Modes and tempos in evolution in the Quaternary*, Chaline, J., Werdelin, F. (dir.). Quaternary International, 29, 86–98.
- Dambricourt Malassé, A. (1996). Nouveau regard sur l'origine de l'Homme. *La Recherche*, 286, 46–54.
- Dambricourt Malassé, A. (2006). La question des origines de la lignée humaine : les modèles évolutionnistes confrontés aux fossiles, implications en orthopédie et posturologie. *Les cahiers du Centre d'étude de l'ostéopathie de la posturologie et sciences annexes*, 4, 38–57.

- Dambricourt Malassé, A. (2011). Les équilibres bipèdes permanents, origine embryonnaire, morphogenèse, équilibre ocluso-postural, conséquences pour l'évolution psychomotrice et comportementale des hominidés. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Compiègne, Compiègne.
- Dambricourt Malassé, A. (2022a). *Embryogenèse et phylogenèse de la posture humaine 2. Un renversement de regard sur le devenir de notre espèce, du XX^e au XXI^e siècle*. ISTE Editions, Londres.
- Dambricourt Malassé, A. (2022b). *Embryogeny and Phylogeny of the Human Posture 2. A New Glance at the Future of our Species*. ISTE Ltd, Londres, Wiley, New York.
- Dambricourt Malassé, A. (dir.) (2022c). Sapiens and cognition: the optimal vertical nervous system. The last threshold of self-organized and self-memorizing in increasing complexity from gametes to embryo. Dans *Self-Organization as a new paradigm in evolutionary biology*. Springer, 307–358.
- Dambricourt Malassé, A. (dir.) (2022d). *Self-Organization as a new paradigm in evolutionary biology*. Springer, Cham.
- Dambricourt Malassé, A., Deshayes, M.J. (1992). Modeling of the craniofacial architecture during ontogenesis and phylogenesis. Dans *The head-neck sensory motor system*, Berthoz, A., Vidal, P.P., Graf, W. (dir). Oxford University Press, New York/Oxford, 37–46.
- Dambricourt Malassé, A., Deshayes, M.J., Magnies-Jannin, F., Chaline, J., Marchand, D. (1999). A solution to human paradox: fundamental ontogenies and heterochronies. *Human Evolution*, 14(4), 277–300 [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF02438932>.
- Darwin, C. (1871). *The descent of man, and selection in relation to sex*. John Murray, Londres.
- Delattre, F., Fenart, R. (1960). *L'hominisation du crâne*. Éditions du CNRS, Paris.
- Duboule, D. (2020). Évolution des génomes et développement. *L'annuaire du Collège de France. Cours et travaux 2017-2018*, 118, 569–573.
- Fleury, V. (2024). Electrical stimulation of chicken embryo development supports the inside story scenario of human development and evolution. *Nature-Scientific Reports*, 14, 7250 [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56686-y>.
- Godard, B., Ducasse, B. (1973). L'examen radiologique en O.D.F. L'analyse de Gudin. *Rev. Orthop. Dento. Faciale*, 7(3), 373–392 [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1051/odf/1973029>.

- Jones, S., Martin, R.D., Pilbeam, D.R., Bunney, S. (2009). *The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lamarck, J.B. (1802). *Recherches sur l'organisation des corps vivants*. Maillard Librairie, Paris [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k4226016j/f12.item>.
- Le Maître, A. (2015). Locomotion et morphologie du labyrinthe osseux chez les hominoïdes actuels. Application à *Sahelanthropus tchadensis* (Hominidae, 7 Ma, Tchad). Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Poitiers.
- Meyer, M.R., Jung, J.P., Spear, J.K., Araiza, I.F., Galway-Witham, J., Williams, S.A. (2023). Knuckle-walking in *Sahelanthropus*? Locomotor inferences from the ulnae of fossil hominins and other hominoids. *Journal of Human Evolution*, 179, 103355.
- Queiros-Condé, D., Chaline, J., Brissaud, I. (2022). Quantum fractal thermodynamics to describe the log-periodicity law in species evolution and human organizations. Dans *Self-organization as a new paradigm in evolutionary biology*, Dambricourt Malassé A. (dir.). Springer, 291–305.
- Radford, L., Demers, S., Isaías, M. (2009). *Processus d'abstraction en mathématiques*. Centre franco-ontarien de ressources pédagogiques, Ottawa.
- Van Overwalle, F., Ma, Q., Haihambo, N. et al. (2023). A Functional Atlas of the Cerebellum Based on NeuroSynth Task Coordinates. *Cerebellum* [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s12311-023-01596-4>.
- Weaver, A.H. (2005). Reciprocal evolution of the cerebellum and neocortex in fossil humans. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102(10), 3576–80 [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1073/pnas.0500692102>.
- Willmore, K.E. (2012). The body plan concept and its centrality in Evo-Devo. *Evolutionary Developmental Biology*, 5, 219–230 [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s12052-012-0424-z>.
- Wolpoff, M., Senut, B., Pickford, M., Hawks, J. (2002). *Sahelanthropus* or *Sahelpithecus*?. *Nature*, 419, 581–582.
- Wood, B.A. (2002). Hominid revelations from Chad. *Nature*, 418, 133–135.
- Zollikofer, C.P.E., Ponce de León, M.S., Lieberman, D.E., Franck, G., Pilbeam, D., Andossa, L., Mackaye, H.T., Vignaud, P., Brunet, M. (2005). Virtual cranial reconstruction of *Sahelanthropus tchadensis*. *Nature*, 434(7034), 755–7599.