



HAL
open science

ANALOGIE ENTRE LA HARPE URUKÉENNE ET LE SYSTÈME AUDITIF

Philippe Roi, Tristan Girard

► **To cite this version:**

Philippe Roi, Tristan Girard. ANALOGIE ENTRE LA HARPE URUKÉENNE ET LE SYSTÈME AUDITIF. La Théorie Sensorielle. I - Les Analogies Sensorielles, pp.83-100, 2013. hal-03204714

HAL Id: hal-03204714

<https://hal.science/hal-03204714v1>

Submitted on 21 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ANALOGIE ENTRE LA HARPE URUKÉENNE ET LE SYSTÈME AUDITIF

Par Philippe Roi et Tristan Girard

Avec la contribution de Richard Dumbrill⁽¹⁾, Michel Leibovici⁽²⁾
et la participation de Paul Avan⁽³⁾

⁽¹⁾Professeur en Archéomusicologie, Directeur d'ICONEA, Institute of Musical Research, School of Advanced Study, Universities of Oxford and London. ⁽²⁾Docteur en Biologie Cellulaire et Moléculaire de l'Université Paris VI, Chercheur au CNRS, Institut Cochin, INSERM U1016.

⁽³⁾Directeur du Laboratoire de Biophysique Neurosensorielle de Clermont-Ferrand.

Pour citer cet article : Roi, Philippe et Girard, Tristan, « La harpe urukéenne et le système auditif », *La Théorie Sensorielle. I - Les Analogies Sensorielles*, First Edition Design Publishing (2013) pp. 83-100 et sa bibliographie pp. 264-272.
Copyright 2013 par Philippe Roi et Tristan Girard

Résumé : *Au 4^e millénaire avant notre ère, dans le sud de la Mésopotamie, les Urukéens ont inventé sept outils remarquables : l'araire, le moule à briques normalisé, l'écriture, la comptabilité, la harpe, le métier à tisser vertical et l'image de cônes. Or, toutes ces inventions sont calquées sur des mécanismes biologiques qui permettent aux organes sensoriels de transmettre leurs informations au cerveau. Dans cet article, les auteurs démontrent que la conception de la harpe urukéenne reproduit les principes fondamentaux du système auditif et en particulier de l'organe de Corti dont les cellules ciliées se chargent de convertir les impulsions mécaniques en impulsions bioélectriques.*

Abstract: *In the fourth millennium BCE, in the south of Mesopotamia, the Urukeans invented seven remarkable tools: the ard, the normalised brick mould, writing, accounting, the harp, the vertical weaving loom and cone images. These inventions have been found to mirror biological mechanisms which allow sensory organs to transmit information to the brain. In this paper, the authors show that the conception of the Urukean harp reflects the auditory system, and more specifically the physiology of the organ of Corti, which hosts hair cells dedicated to the conversion of mechanical pulses into bioelectrical ones.*

Afin d'obtenir toujours plus de produits qu'elles considéraient comme essentiels pour se distinguer du commun, les élites du sud de la Mésopotamie auraient multiplié les échanges avec celles du Nord, décuplant aussi les conflits comme semblent l'attester de récentes découvertes faites en Syrie sur les sites de Tell Brak, Majnouna et Hamoukar où plusieurs fosses communes ont été mises au jour. L'ensemble de ces fosses contenait des centaines, voire des milliers de squelettes de jeunes adultes, sur lesquels des marques laissent présumer une mort violente¹. Rappelons que Brak était à l'époque un carrefour commercial stratégique. Un sondage profond du site principal a permis de découvrir des éléments prouvant que les locaux importaient des matières premières du Levant Nord et d'Anatolie, qu'ils transformaient ensuite en biens manufacturés² (Fig. 1). Or, nous savons que si les terres de basse Mésopotamie, riches en limon, favorisaient les cultures et l'élevage, elles ne produisaient pas de pierres semi-précieuses, de métaux, de bois, de silex, ni de basalte ou d'obsidienne, et ne permettaient pas d'obtenir de denrées alimentaires comme l'huile d'olive, le vin ou le miel. En d'autres termes, le sol ne fournissait aucun produit susceptible d'épancher la frénésie ostentatoire des élites dont le pouvoir était en partie conditionné par ces signes extérieurs qui les différenciaient de leurs congénères et des cités voisines. Leurs seuls biens échangeables avec les villages du nord de la Mésopotamie consistaient donc en céréales et en ovins probablement dotés d'une toison d'une longueur et d'une finesse exceptionnelles.

¹ McMahan, A. (2007) Soltysiak, A. (2007).

² Oates, J. (2007).

Contrairement aux éleveurs du Nord, les Urukéens pouvaient, en effet, se permettre de nourrir leurs animaux avec des céréales étant donné les quantités considérables d'orge et de blé qu'ils produisaient grâce à l'araire. Or, nous savons aujourd'hui que lorsque l'on nourrit des agneaux avec des céréales et du foin à forte teneur en sel, on obtient une laine des plus fines dont l'épaisseur peut ne pas dépasser 11,8 microns³. Dès lors, on peut imaginer qu'entre le Nord et le Sud, les échanges consistaient en produits exotiques contre des céréales et des ovins dotés d'une toison hors du commun (*Fig. 2*). Ces échanges ne devaient pas se faire sans de longues conversations dans des dialectes différents qui devaient se terminer au mieux par un festin et, dans le pire des cas, en conflits sanglants. L'histoire regorge d'exemples de différends commerciaux qui ont abouti en guerres. Il est donc possible qu'à la suite de massacres comme celui de Tell Brak, les protagonistes aient cherché un moyen de détendre l'atmosphère pour apaiser les tensions lors des négociations. Le plus subtil des arts, et aussi l'un des plus anciens, fut peut-être la solution trouvée par les Urukéens. En effet, c'est à cette époque qu'apparaît pour la première fois la harpe à trois ou quatre cordes, comme en témoigne une empreinte de sceau, datant de la moitié du 4^e millénaire, retrouvée à Choga Mish à l'est d'Uruk en Elam (Iran moderne). Ce sceau représente un personnage assis tenant entre ses mains une harpe arquée à quatre cordes verticales tandis que deux autres individus manipulent respectivement un tambour en forme de bol et des claquoirs⁴ (*Fig. 3*). Ainsi, les Urukéens auraient découvert dès le 4^e millénaire, grâce à la harpe, que la musique avait la capacité de faire partager collectivement à des individus des sensations et des émotions que, dans d'autres circonstances, ils ne pouvaient éprouver que de façon individuelle. Cela signifie que la fonction première de la harpe et, par extension, de la musique, aurait été l'échange, car elle permettait d'emblée de trouver un terrain commun de compréhension, autrement dit de s'accorder. Dès lors, grâce à ce médiateur remarquable, la musique se serait insérée dans la démarche de communication entre les différentes populations, modifiant leur état d'esprit et participant au développement de leur empathie. En outre, les Urukéens auraient été les premiers à comprendre que, si la musique agissait de façon significative sur l'affectif de ses auditeurs, elle avait aussi une incidence sur leur comportement au cours des négociations. Or, nous savons aujourd'hui que si la musique ne modifie pas l'image d'un produit, elle agit de façon non-consciente sur l'humeur du consommateur qu'elle place dans des conditions plus favorables à l'achat. Dès lors, les aptitudes de la harpe à calmer les humeurs belliqueuses en engendrant des réactions émotionnelles l'auraient placée dans une position souveraine du lever au coucher du soleil. On la retrouve en effet dans les ateliers de poterie, les filatures, sur les barges qui transportent les marchandises, lors des banquets (*Fig. 6*), voire pendant les rapports sexuels (*Fig. 4-B*). Les Urukéens semblent si fiers de leur invention qu'ils la font graver sur des sceaux-cylindres afin que, même muette, la harpe résonne à l'oreille intérieure de ceux qui verront son empreinte sur les cachets des jarres. Ils la dessinent aussi sur des tablettes d'argile comme le suggèrent les mentions des termes sumériens *ban.tur* (*ban* signifiant « arc » et *tur*, « petit » donc « petit arc » = harpe) et le signe *balag* dont la phonétique est l'onomatopée « dub-dub », autrement dit un mot dont la sonorité rappelle ce qu'il désigne. Le pictogramme par lequel on le représente entre 3300 et 3000 avant notre ère évoque clairement une harpe à trois ou quatre cordes, mais cinq siècles plus tard, l'instrument deviendra un tambour⁵ (*Fig. 4*).

Toutes les harpes de la période d'Uruk/Djemdet Nasr avaient en commun d'être monoxyles ou tout au moins monostructurelles, en d'autres termes, leurs corps ne laissaient

³ Lupton, C.J. et al. (2007).

⁴ Delougaz, P.P.; Kantor, H.J. (1972).

⁵ Dumbrill, R. (1998). *Période au cours de laquelle les cités-États sont en guerre.*

pas paraître de distinction morphologique entre la caisse de résonance et le manche qui deviendra console. Il semble que ces instruments étaient fabriqués à partir de cucurbitacées ou de bignoniacées – en général des courges ou Calebasses – dont les formes naturelles étaient appropriées. Il est même possible que ces légumineuses ou ces fruits aient fait l'objet d'une domestication à l'aide de techniques simples pour prendre une forme s'accommodant à la fabrication de l'instrument souhaité⁶. La partie évidée de la Calebasse/gourde devait être ensuite recouverte d'une peau d'ovine, de bovine ou de porcine tendue en son dos, afin de former une caisse de résonance. Les cordes étaient faites à partir de boyaux torsadés ou de fibres végétales. Leur extrémité inférieure comportait un nœud d'arrêt. Elles étaient enfilées à travers une ou plusieurs baguettes percées, sous la table d'harmonie, afin que les nœuds ne s'échappent pas sous la tension. De même, les extrémités supérieures des cordes devaient être nouées à des bandes de tissu qui étaient enroulées autour de la console afin de maintenir leur tension pour assurer leur accordage (*Fig. 5-à gauche*). Au cours de cette période et surtout vers la fin du 4^e millénaire, on observe un changement progressif de la caisse de résonance qui se développe en volume tandis que le manche/console se réduit. Il est probable que les caisses de résonance aient toujours été faites à partir de Calebasses ou de cucurbitacées, mais que les consoles aient été fabriquées en bois pour être plus résistantes aux pressions des chevilles dont les Urukéens se seraient servis plus tard pour assurer la tension des cordes (*Fig. 5-à droite*). Les harpes du 4^e millénaire étaient toutes probablement de petites tailles. Elles ne devaient avoir en général que trois cordes tendues sur un plan d'inclinaison d'environ 110 degrés, ce qui suggère une disposition anhémitonique s'étalant sur une quinte musicale contenant peut-être une tierce. Ces harpes sont toujours représentées en milieu rural à en juger par la présence d'ovins et autres ruminants à leurs côtés, ce qui signifie qu'elles n'étaient pas destinées à des rituels religieux, mais avaient au 4^e millénaire, une utilité pratique, comme le confirment les empreintes de sceaux-cylindres. Cependant, dès le troisième millénaire, elles sont toujours représentées en présence d'Inanna, divinité protectrice de la cité d'Uruk, quand elles ne symbolisent pas la déesse elle-même. Il existe des textes où il est fait mention des animaux d'Inanna et de ses attributs parmi lesquels figurent le roseau, la palme, son astre Vénus et la harpe.

La harpe étant décrite et replacée dans son contexte d'origine, il est intéressant de constater que sa conception repose sur les principes fondamentaux de l'audition. Chez l'homme, la perception du son est tout à fait remarquable. Ce que nous appelons des sons n'est en fait que des mouvements de l'air, de simples variations périodiques de pression qui se propagent comme un front d'onde à la vitesse de trois cents mètres par seconde. Lorsqu'elles parviennent à l'oreille humaine, elles sont canalisées par le conduit auditif jusqu'à une fine membrane appelée tympan qui sépare l'oreille externe de l'oreille moyenne. Les vibrations du tympan, sous l'effet des variations de pression acoustique, sont transmises à une chaîne de quatre osselets (marteau, enclume, os lenticulaire et étrier) contenus dans la partie pétreuse de l'os temporal. Ces osselets, maintenus entre eux par des articulations et des ligaments, permettent aux vibrations de passer, sans perte d'énergie, du milieu aérien au milieu aqueux de l'oreille interne. Cette dernière, située dans l'os temporal, est une structure complexe constituée d'un labyrinthe osseux et de plusieurs cavités remplies de liquide. Ce réseau continu, composé de canaux, d'ampoules et d'un limaçon enroulé comme une coquille d'escargot, abrite en fait deux organes sensoriels bien distincts. D'une part, le système vestibulaire spécialisé dans la détection et l'adaptation des mouvements du corps dans l'espace et, d'autre part, la cochlée ou limaçon osseux qui constitue l'organe récepteur de l'audition (*Fig. 7*).

⁶ Dumbrill, R. (2012).

La cochlée (du latin *cochlea* qui signifie « escargot ») est une petite structure spiralée de 1,2 mm de diamètre pour 35 mm de long qui prend naissance dans la partie antérieure du vestibule et décrit deux tours trois quarts autour d'un pilier osseux appelé columelle. À son extrémité basale se trouvent la fenêtre ovale et la fenêtre ronde, qui séparent l'oreille moyenne de l'oreille interne. La cochlée est divisée sur sa longueur en trois compartiments : de part et d'autre se trouvent deux compartiments, la rampe vestibulaire et la rampe tympanique, remplis d'un même liquide, la périlymphe ; au milieu se situe le canal cochléaire limité à sa partie inférieure par la membrane basilaire et à sa partie supérieure par la membrane de Reissner. Le canal cochléaire abrite une structure complexe appelée organe de Corti qui repose sur la membrane basilaire et s'étend sur toute la longueur de la cochlée. C'est cet organe qui assure la transformation de l'énergie vibratoire en signal électrique interprétable par le cerveau (*Fig. 8*). Il est constitué de 15 000 cellules ciliées externes qui se répartissent sur trois ou quatre rangées et de 3500 cellules ciliées internes qui s'alignent selon une seule rangée (*Fig. 9*). Les corps cellulaires de celles-ci baignent dans la périlymphe tandis que leurs touffes ciliaires se dressent dans le canal cochléaire rempli d'endolymphe. L'étanchéité ionique du canal cochléaire est assurée à sa base par la lame réticulaire, qui résulte de l'association très étroite entre les apex des cellules sensorielles et des cellules de soutien de l'organe de Corti, et au sommet, par la membrane de Reissner qui forme le « toit » du canal cochléaire. Lorsque l'étrier se déplace sous la poussée des vibrations du tympan, il met en mouvement le liquide incompressible contenu dans la rampe vestibulaire et le fait remonter jusqu'au sommet de la cochlée où il contourne l'hélicotreme avant de redescendre par la rampe tympanique, mettant finalement en mouvement la fenêtre ronde qui se situe à l'autre extrémité du système. Les mouvements du liquide font onduler la membrane basilaire dont chaque portion vibre à une fréquence donnée (*Fig. 8-D*). Ces vibrations entraînent un déplacement des cellules ciliées externes, qui sont enchâssées entre la membrane basilaire (par leur pôle basal via les cellules de Deiters) et la membrane tectoriale (via leur touffe ciliaire) (*Fig. 10*). Il s'ensuit un mouvement relatif de cisaillement des touffes ciliaires des cellules ciliées externes vis-à-vis de la membrane tectoriale qui provoque la déflexion des stéréocils. Cette dernière conduit à la dépolarisation cellulaire par ouverture mécanique de canaux ioniques. La dépolarisation engendre une contraction rapide des cellules ciliées externes ou électromotilité qui, à son tour, augmente l'amplitude des vibrations de la membrane basilaire. Ce phénomène d'amplification non linéaire a pour conséquence d'augmenter les stimuli faiblement intenses qui pourraient ne pas être perçus sans affecter les stimuli de forte intensité dont l'amplification endommagerait les cellules ciliées. Sous l'effet de cette amplification, les stéréocils des cellules ciliées internes, véritables récepteurs sensoriels de l'organe de l'audition, sont entraînés par la membrane tectoriale et défléchis à leur tour. La dépolarisation de la cellule ciliée interne engendre alors la libération d'un neurotransmetteur à son pôle basal, le glutamate, qui donne naissance à un train de potentiels d'action acheminés via le nerf auditif jusqu'au cerveau.

À ce stade, une première comparaison peut être faite entre le manche de la harpe (ou console) et la membrane basilaire (MB). La console, à laquelle sont fixées les chevilles autour desquelles sont attachées l'une des extrémités des cordes, peut en effet être comparée à la membrane basilaire à laquelle sont fixées les cellules de Deiters supportant elles-mêmes l'une des extrémités des cellules ciliées externes (CCEs). La console est un élément primordial, car c'est sur celle-ci que reposent directement ou indirectement tous les éléments qui constituent une harpe. L'importance fonctionnelle de la membrane basilaire est elle aussi primordiale, car c'est elle qui supporte directement ou indirectement les différents éléments qui constituent l'organe de Corti. Les doigts du harpiste font vibrer les cordes avec plus ou moins d'intensité, complétant ainsi la fonction de la console qu'il maintient avec une

paume contre sa poitrine. De façon identique, les vibrations sonores transmises par la périlymphe provoquent des mouvements vers le haut et vers le bas de la membrane basilaire en une position précise qui font vibrer avec plus ou moins d'intensité les cellules ciliées externes. À l'instar de la console, la membrane basilaire est immobile en tout autre endroit le long de l'organe de Corti (*Fig. 11-à gauche*).

Une deuxième comparaison peut être faite entre les chevilles insérées dans l'épaisseur de la console et les cellules de Deiters (CDs) dont la base est fermement fixée sur la membrane basilaire. Les chevilles ont pour fonction de maintenir solidement les cordes tendues entre la console et la table d'harmonie. De façon analogue, les cellules de Deiters servent à maintenir fermement les cellules ciliées externes (CCEs) tendues entre la membrane basilaire (MB) et la membrane tectoriale (MT). De la même façon que la rotation des chevilles dans un sens ou dans l'autre permet au musicien de tendre ou de détendre les cordes pour les accorder afin de les faire vibrer à la fréquence désirée, il a été récemment démontré que la déformation des cellules de Deiters pouvait moduler la vibration des CCEs auxquelles elles sont associées en modifiant leur tension membranaire⁷. Cette modification locale doit contribuer à affiner la réponse au stimulus acoustique (*Fig. 11-à droite*).

Une troisième comparaison peut être faite entre les cordes de la harpe et les cellules ciliées externes de la cochlée. Les cordes sont fixées par une extrémité aux chevilles et par l'autre à la table d'harmonie. Cette attache à ces deux structures confère aux cordes un degré de tension suffisant pour vibrer lorsqu'elles sont pincées. Le pincement d'une corde entraîne un mouvement radial de celle-ci en même temps qu'un léger pivotement de la corde sur elle-même du fait qu'elle est torsadée. Il s'ensuit une propagation ondulatoire dans le sens longitudinal depuis leur point d'ancrage jusqu'au sein de la table d'harmonie. D'une façon identique, les cellules ciliées externes (CCEs) sont fixées par leur extrémité basale aux cellules de Deiters, et par leur touffe ciliaire à la membrane tectoriale. Ainsi maintenues, les CCEs présentent des mouvements très rapides de contraction/décontraction de leur corps cellulaire – appelés électromotilité cellulaire – couplés à des oscillations périodiques de leur touffe ciliaire. Associés à l'électromotilité, des pivotements de la base des CCEs ont été décrits conduisant à un déplacement radial de la cellule. Il convient d'ajouter que la harpe ne connaît que le mode de mise en vibration des cordes par pincement. Leur disposition ne permet pas en effet de raccourcir l'espace de vibration par appui sur le manche, comme c'est le cas avec un violon. Chaque corde résonne donc à vide et ne produit qu'un seul son. De même, chaque rangée transversale de cellules ciliées externes, de par sa position le long de l'organe de Corti et ses caractéristiques structurales, ne répond qu'à une seule fréquence de stimulation (*Fig. 12*). Enfin, à l'instar des doigts du harpiste qui peuvent bloquer ou étouffer les vibrations de certaines cordes et laisser les autres vibrer librement – voire par sympathie – de nombreuses fibres efférentes se projettent depuis le système nerveux central sur les CCEs par l'intermédiaire de synapses cholinergiques afin de moduler l'intensité de la réponse de ces dernières⁸.

Une quatrième comparaison peut être faite entre la table d'harmonie et la membrane tectoriale. La table d'harmonie est une membrane de peau d'animal fibreuse et gélatineuse tendue au-dessus de la caisse de résonance. L'une des extrémités des cordes est insérée sous la table d'harmonie qu'elle traverse, comme l'atteste la présence de petits trous visibles lorsqu'on les retire. La surface des cordes étant très restreinte, leurs vibrations ne produisent que des sons très faibles. En revanche, si les vibrations des cordes sont transmises à une surface plus grande possédant des propriétés conductrices, les sons qu'elles produisent durent moins longtemps, mais sont d'une plus grande intensité. Outre l'amplification du

⁷ Yu, N.; Zhao, H.-B. (2009).

⁸ Frolenkov, G.I. (2006) Maison, S.F. et al. (2007) Richard, C. (2010).

signal provenant des cordes, la table d'harmonie assure sa transmission vers la caisse de résonance. De même, la membrane tectoriale est une membrane fibreuse et gélatineuse qui recouvre l'organe de Corti. Les extrémités des cils les plus longs des cellules ciliées externes sont insérées dans cette membrane à la surface de laquelle elles laissent des empreintes en creux parfaitement visibles au microscope électronique. Lorsque les CCEs vibrent, leurs touffes ciliaires s'inclinent et amplifient alors le mouvement relatif entre la membrane basilaire et la membrane tectoriale. Le signal amplifié est alors transmis aux cellules ciliées internes. Ainsi, la membrane tectoriale, tout comme la table d'harmonie, joue un rôle primordial dans la transmission de la stimulation sonore (*Fig. 13*).

Une cinquième comparaison peut être faite aussi entre les taquets d'ancrage et les liens d'attachement de la membrane tectoriale. Les taquets d'ancrage sont de fines lames de bois fixées horizontalement sous la table d'harmonie. Ils participent à la transmission des vibrations et empêchent que les nœuds aux extrémités inférieures des cordes ne s'échappent sous la tension. D'une façon identique, des liens d'attachement, insérés sous l'épaisseur de la membrane tectoriale, ont été observés. Leur présence a pour but d'arrimer l'apex de la plus haute rangée de stéréocils des touffes ciliaires des cellules ciliées externes dans la membrane tectoriale. Cet ancrage promeut l'efficacité de la vibration des CCEs et, dans une moindre mesure, les protège de trop fortes tensions⁹ (*Fig. 14*).

Enfin, une sixième comparaison peut également être faite entre la caisse de résonance (et son ouïe) et la cellule ciliée interne (et ses fibres afférentes). En organologie, on appelle caisse de résonance la partie d'une harpe qui a pour rôle de recevoir et de rendre audible les vibrations produites par les cordes et la table d'harmonie. Lorsque les ondes sonores pénètrent à l'intérieur de la caisse, elles se heurtent à ses parois. Une partie des ondes est absorbée tandis que l'autre rebondit. Les ondes qui se réverbèrent se rencontrent et s'additionnent et il en résulte un son plus perceptible, qui s'échappe notamment par une ou des ouvertures, situées à la base ou sur les côtés de la caisse, appelées les ouïes. Aux vibrations en deux dimensions, générées par les cordes et transmises par la table d'harmonie, la caisse de résonance apporte au son amplifié une troisième dimension acoustique : sa forme. En effet, la configuration de la caisse façonne naturellement le son, qui peut même être modulé grâce à des pièces de bois rectangulaires, appelées barrages, fixées sur sa base intérieure et sous la table d'harmonie pour guider les ondes et l'enrichir de nouvelles euphonies (*Fig. 15*). Ainsi, selon la complexité et la qualité des barrages, le son et les instruments peuvent respectivement prendre des formes élaborées et différer en puissance et en sonorité. La cellule ciliée interne (CCI) est, quant à elle, la véritable cellule sensorielle de l'organe de Corti dans la mesure où elle perçoit la stimulation extérieure et la transmet au cerveau. La CCI est stimulée mécaniquement par les vibrations transmises par la membrane tectoriale qui défléchissent sa touffe ciliaire apicale. Cette déflexion entraîne une entrée de calcium qui génère à son tour, à la base de la cellule, une libération de neurotransmetteur qui est corrélée à la stimulation. Il s'ensuit dans les fibres nerveuses afférentes des potentiels d'action qui sont conduits par le nerf auditif aux centres nerveux supérieurs. Il a été démontré que les constituants pré et postsynaptiques présentent une distribution morpho-fonctionnelle qui permet à la CCI de façonner sa réponse électrique¹⁰. Ainsi, à l'instar de la caisse de résonance et des ouïes, la CCI et les fibres nerveuses afférentes convertissent un signal d'entrée simple – oscillation de la touffe ciliaire – en un signal de sortie élaboré.

⁹ Richardson, G.P. et al. (2008) Verpy, E.; Leibovici, M. et al. (2011).

¹⁰ Safieddine, S.; El-Amraoui, A.; Petit, C. (2012).

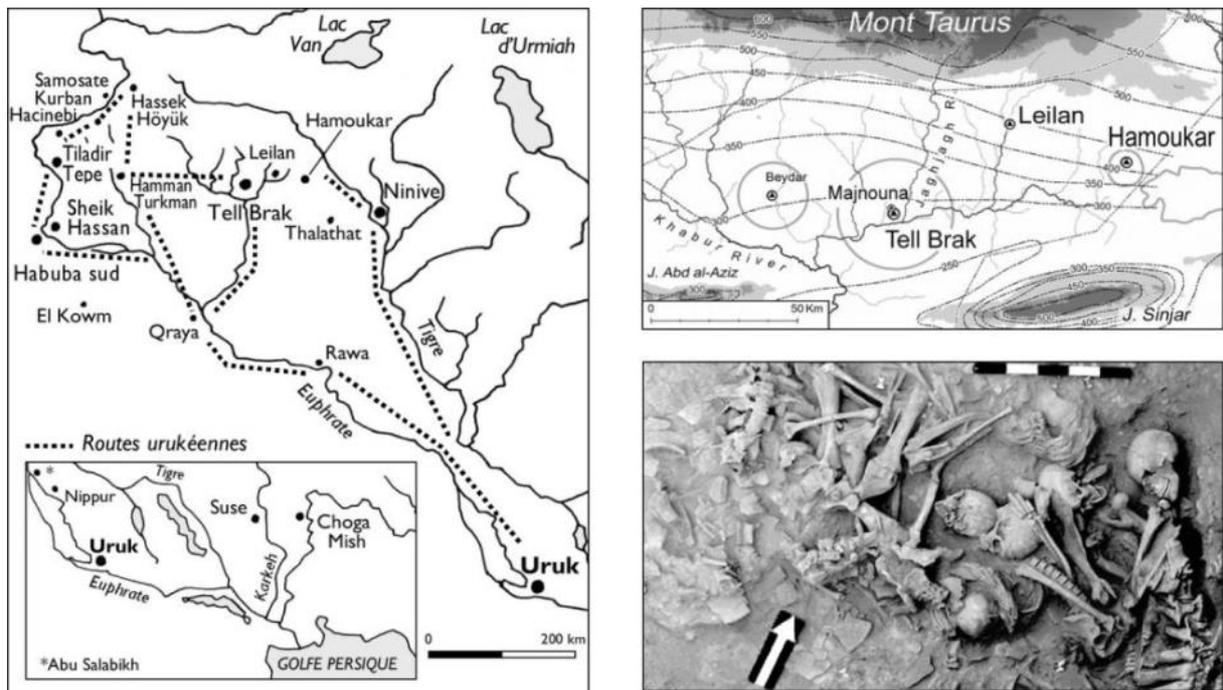


Fig. 1. (à gauche) Carte de la Mésopotamie du 4^e millénaire indiquant les principales routes empruntées par les Urukéens lors des échanges avec les populations du Nord. En encadré : position de Choga Mish. **(en haut à droite)** Carte de la zone de Tell Brak et Hamoukar au nord de la Jazira. **(en bas à droite)** Dépôt d'ossements (humain et animal) entassés dans une fosse mise au jour sur l'aire de Majnouna, datant de la première moitié du 4^e millénaire.

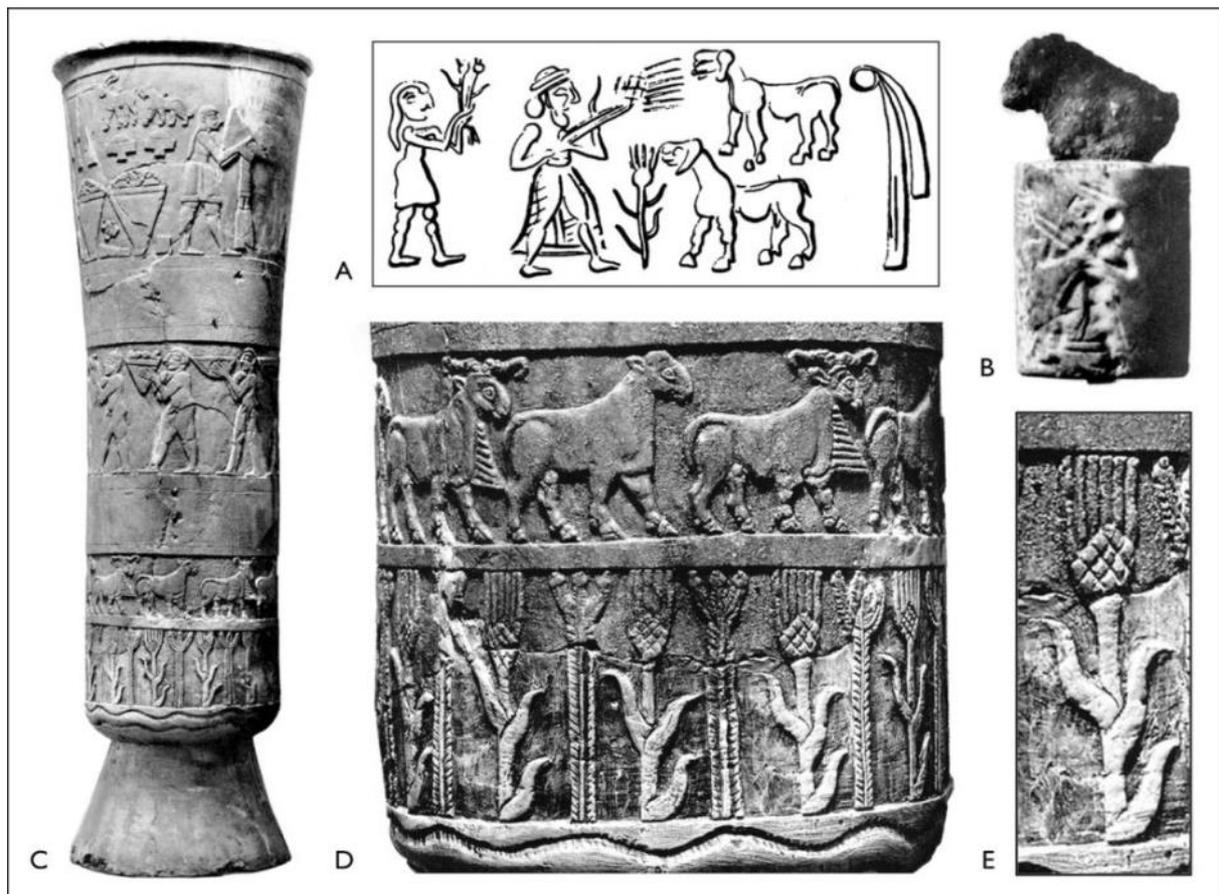


Fig. 2. A) Reproduction d'une empreinte d'un sceau-cylindre de la période d'Uruk III. On remarque un dignitaire donnant un épi de céréales à un mouton ; **B)** sceau-cylindre surmonté d'une sculpture en forme d'ovin correspondant à cette empreinte ; **C)** vase d'Uruk ou d'Inanna ; **D)** gros plan des registres inférieurs du vase. En bas, des céréales et des palmiers dattiers, en alternance, symbolisent l'agriculture. En haut, des ovins représentent l'élevage ; **E)** détail du vase représentant un épi de céréales de forme similaire à celui que tend le dignitaire sur le dessin de l'empreinte A.

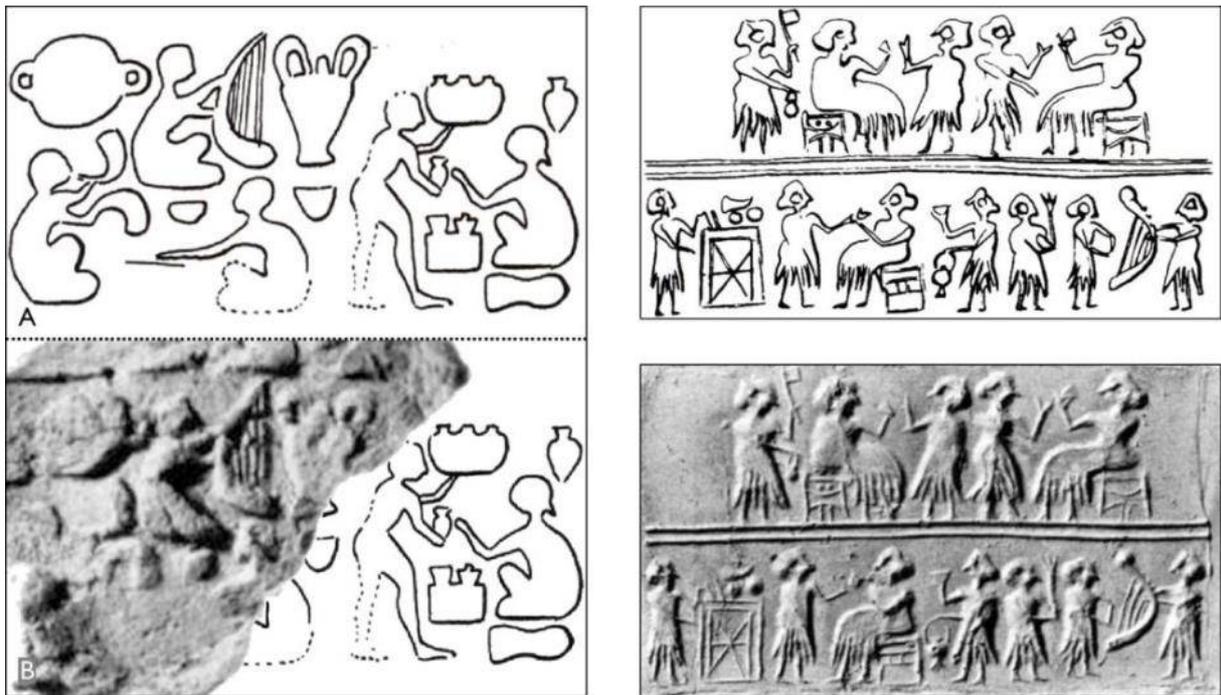


Fig. 3. (à gauche) A) Représentation de l’empreinte partielle du sceau-cylindre de Choga Mish datant du milieu du 4^e millénaire. On remarque pour la première fois un harpiste entouré de musiciens manipulant des claquoirs et un tambour ; B) fragment de l’empreinte du même sceau-cylindre dans l’argile crue. (à droite) Empreinte d’un sceau-cylindre représentant une scène de banquet avec un harpiste.

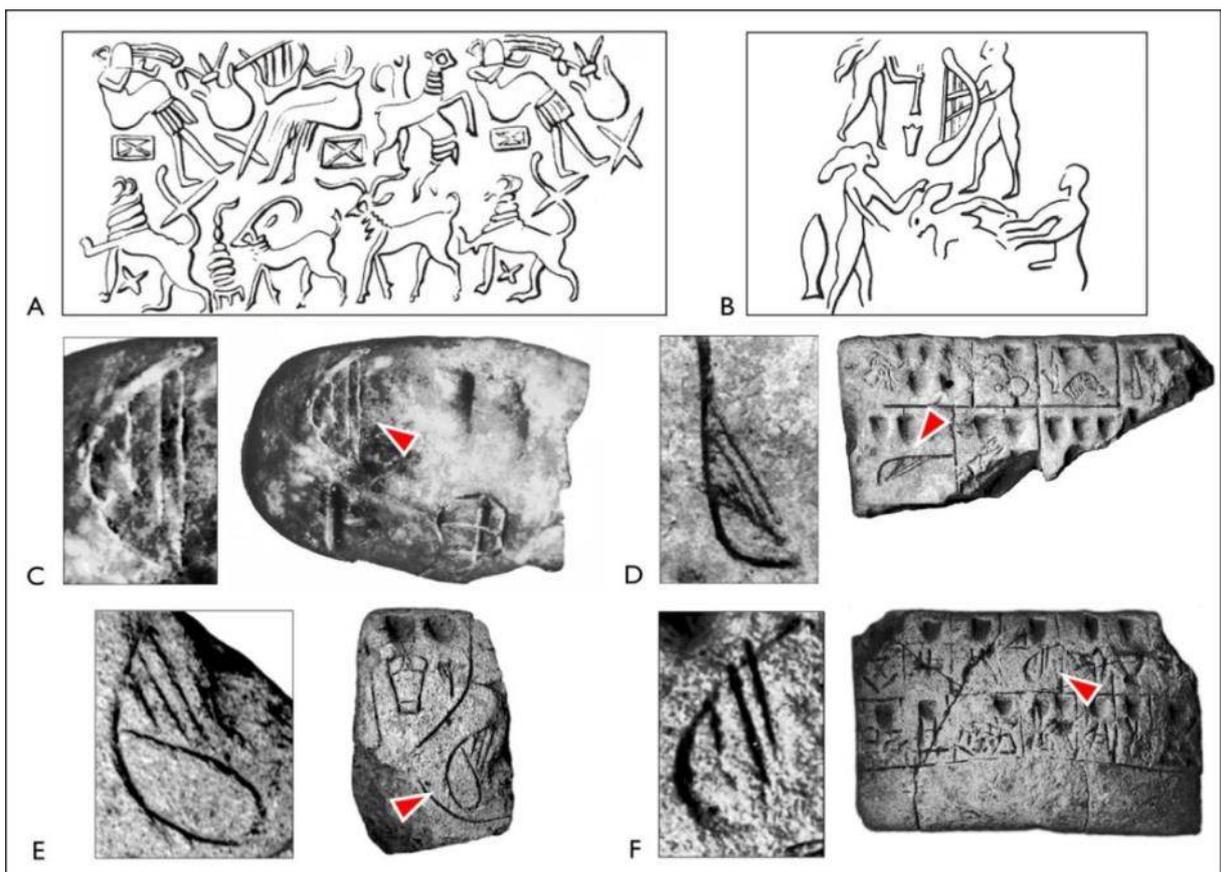


Fig. 4. A) Empreinte d’un sceau-cylindre du 4^e millénaire sur laquelle on discerne, en haut à gauche, un personnage en train d’étirer de la laine en compagnie d’un harpiste. Il ne s’agit pas, contrairement aux idées reçues, d’un homme buvant au chalumeau, comme nous le verrons au cours de l’analogie suivante ; B) empreinte d’un sceau-cylindre du début du 3^e millénaire sur laquelle on distingue un acte sexuel accompagné par un musicien jouant de la harpe ; C) tablette de la période d’Uruk avec le pictogramme de la harpe ◄ et celui du mouton ⊕, référence cdl n° : P003174. Tablettes similaires D) cdl n° : P001443 ; E) cdl n° : P000887 ; F) cdl n° : P001401.

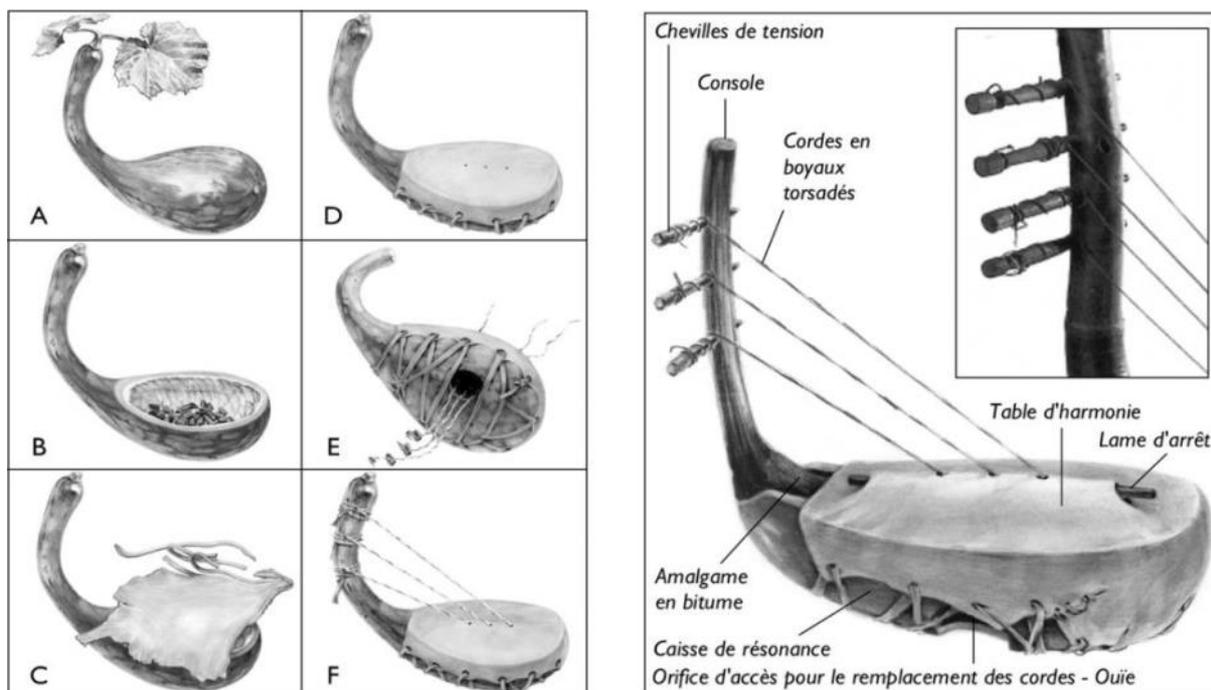


Fig. 5. (à gauche) Représentation schématique des principales étapes de fabrication d'une harpe à partir d'une courge ou calebasse : A) galbage de la calebasse lors de la pousse ; B) tronquage et égrainage de l'intérieur ; C) découpe de la table d'harmonie et de ses liens de tension dans la même peau ; D) tension de la table d'harmonie ; E) passage des cordes de boyaux torsadés (dont une extrémité est arrêtée par des lames de bois) à travers un trou percé dans le fond de la calebasse ; F) tension et nouage des cordes à la partie manche, ou console, au moyen d'une pièce de tissu grossier. **(à droite)** Essai de représentation d'une harpe du 4^e millénaire possédant une console en bois et des chevilles de tension pour l'accordage.

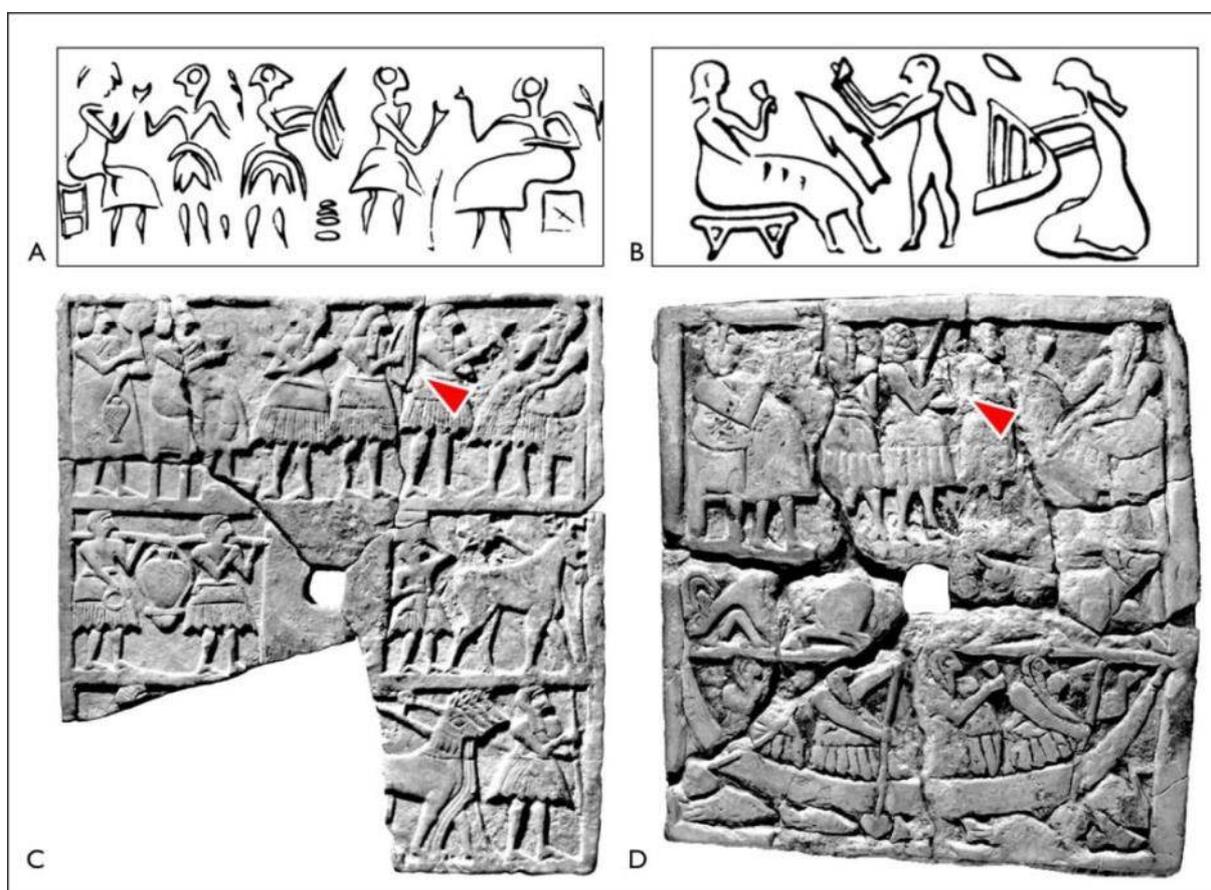


Fig. 6. A et B) Reproduction de deux empreintes de sceaux-cylindres évoquant des convives dégustant des mets au son d'une harpe ; C) plaque de calcaire célébrant un banquet ; D) plaque de calcaire commémorant un festin lors d'échanges.

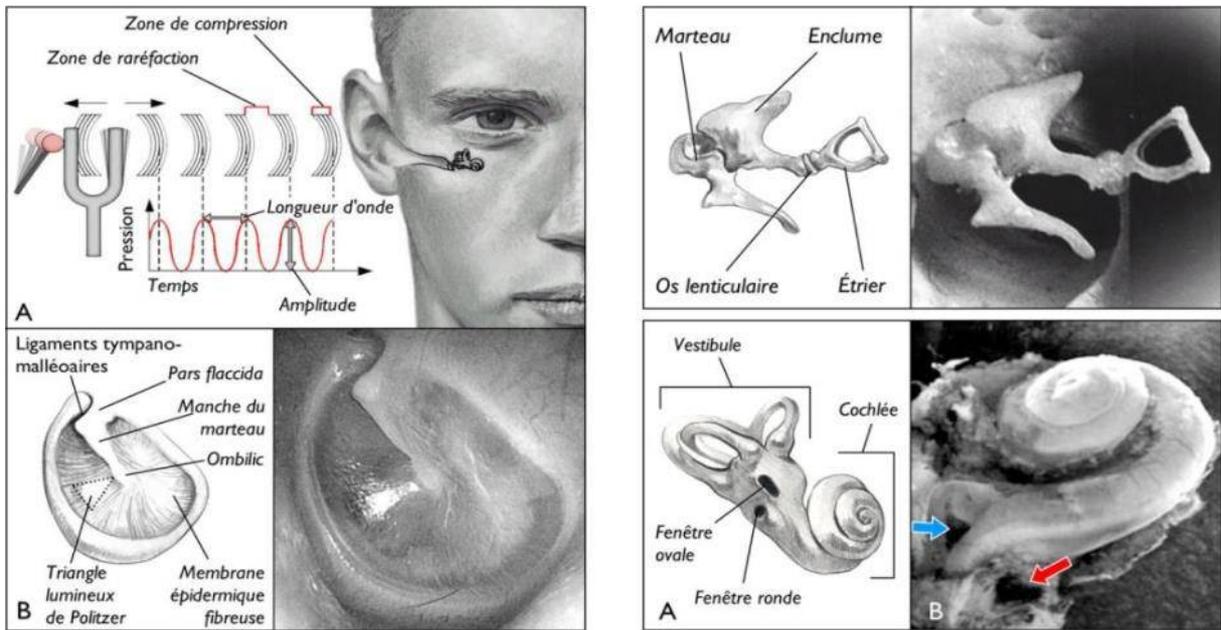


Fig. 7. (à gauche) A) La distance entre les deux points d'une onde (deux crêtes ou deux creux) est appelée longueur d'onde, l'intensité (énergie) de l'onde (liée à la hauteur des crêtes) est appelée amplitude. B) Le rôle du tympan est de transmettre les vibrations de l'air aux osselets de l'oreille moyenne. (en haut à droite) La fonction des osselets est de transmettre l'énergie des vibrations de l'oreille externe à l'oreille interne. (en bas à droite) A) L'oreille interne est composée de deux parties : la cochlée qui est la partie auditive et le vestibule, qui contient les organes de l'équilibre. B) Cochlée dont la capsule otique a été enlevée. Flèche bleue : fenêtre ovale ; flèche rouge : fenêtre ronde.

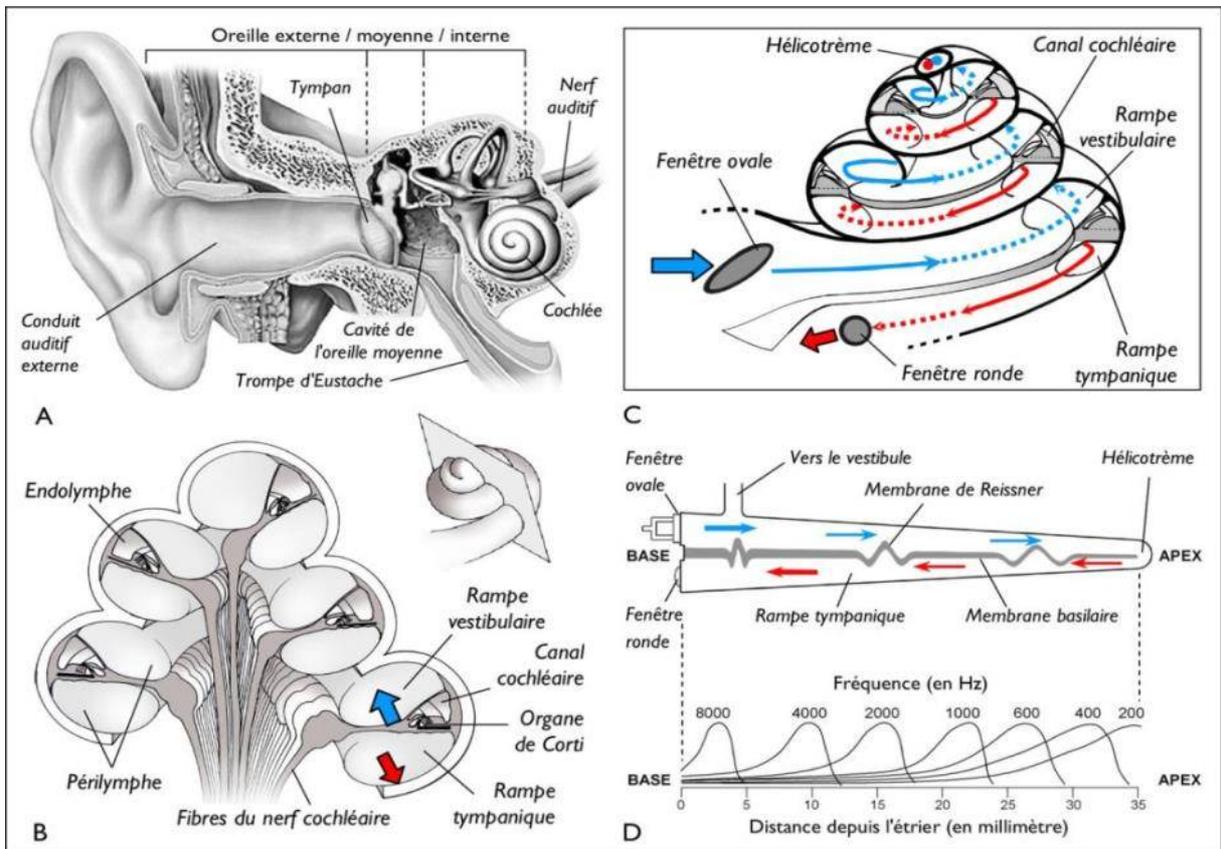


Fig. 8. A) Coupe longitudinale de l'appareil auditif humain ; B) coupe schématique de la cochlée ; C) les vibrations engendrées par la fenètre ovale suivent la rampe vestibulaire du canal spiral de la cochlée jusqu'à son apex en faisant onduler la membrane basilaire (trajet en bleu). Puis elles redescendent (trajet en rouge) et ressortent par la fenètre ronde ; D) schéma de la cochlée déroulée. Les différentes fréquences des ondes de pression dans la rampe tympanique font onduler certaines parties de la membrane basilaire stimulant l'organe de Corti qui repose sur elle.

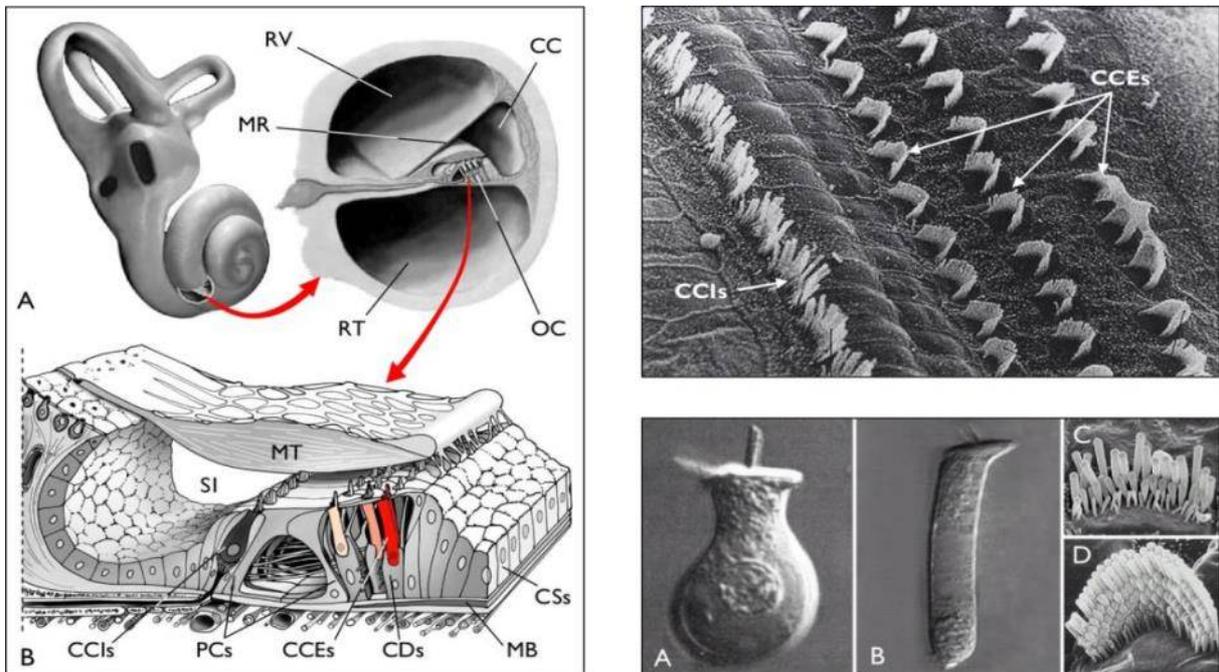


Fig. 9. (à gauche) A) Section du tour basal d'une cochlée humaine. RV : rampe vestibulaire ; RT : rampe tympanique ; MR : membrane de Reissner ; CC : canal cochléaire ; OC : organe de Corti ; B) organe de Corti dans son ensemble ; SI : sillon interne ; MT : membrane tectoriale ; CCI : cellules ciliées internes ; PC : Piliers de Corti ; CCE : cellules ciliées externes ; CD : cellules de Deiters ; MB : membrane basilaire ; CS : cellules de soutien. (en haut à droite) Organisation des touffes ciliaires des CCI sur un rang et des CCEs sur trois rangs. (en bas à droite) A) Cellule ciliée interne ; B) cellule ciliée externe ; C) touffe ciliaire d'une CCI ; D) touffe ciliaire d'une CCE.

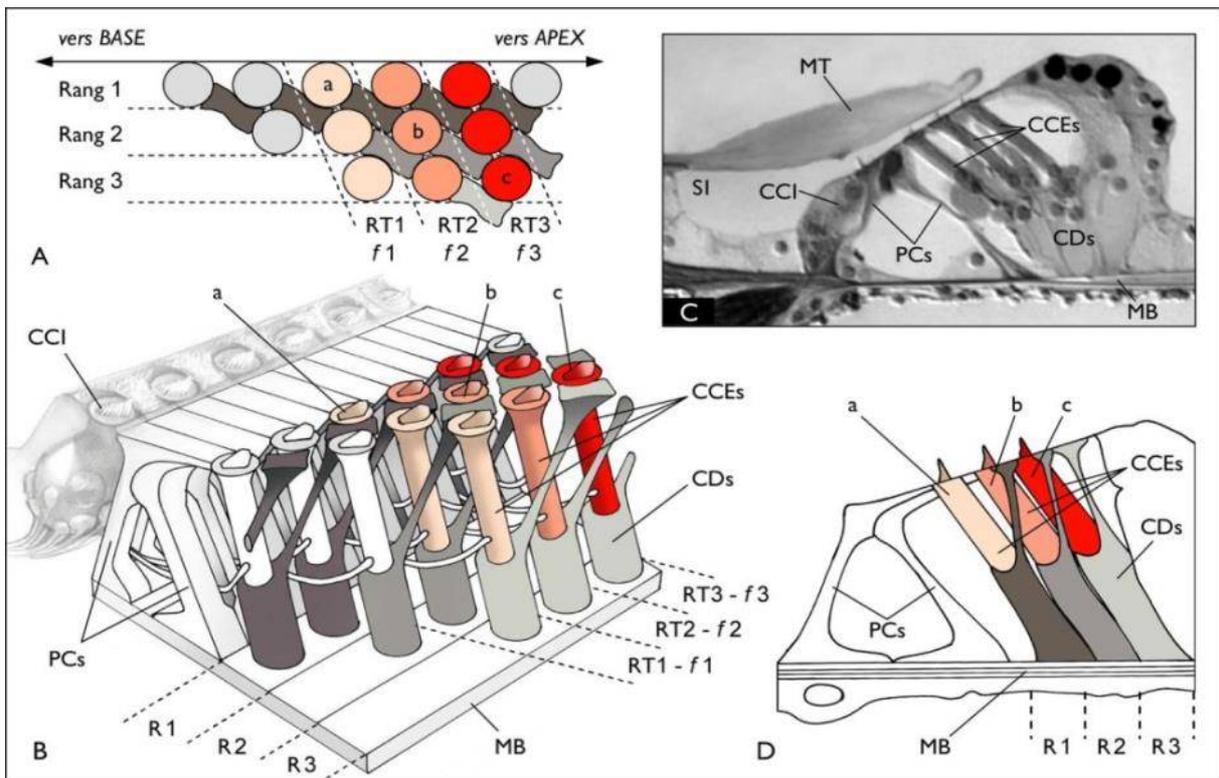


Fig. 10. A et B) Vue en 2D et 3D d'une portion de l'organe de Corti figurant treize cellules ciliées externes (CCEs). Seules neuf d'entre elles ont été représentées (en rouge pâle, moyen et foncé) suivant leur rangée transversale (RT) respective. Leur position relative sur cette portion détermine la réponse de chacune aux longueurs d'onde f_1 , f_2 et f_3 . Par contre, des CCEs placées sur une même rangée transversale répondront à une même fréquence. La projection (A) en haut à gauche illustre cette répartition spatiale vue de dessus ; C) section transversale de l'organe de Corti d'un cobaye. Une CCI et trois CCEs sont réparties de part et d'autre du tunnel de Corti. La membrane tectoriale coiffe les stéréocils des CCEs qui reposent sur les cellules de Deiters ; D) coupe en biais de l'organe de Corti.

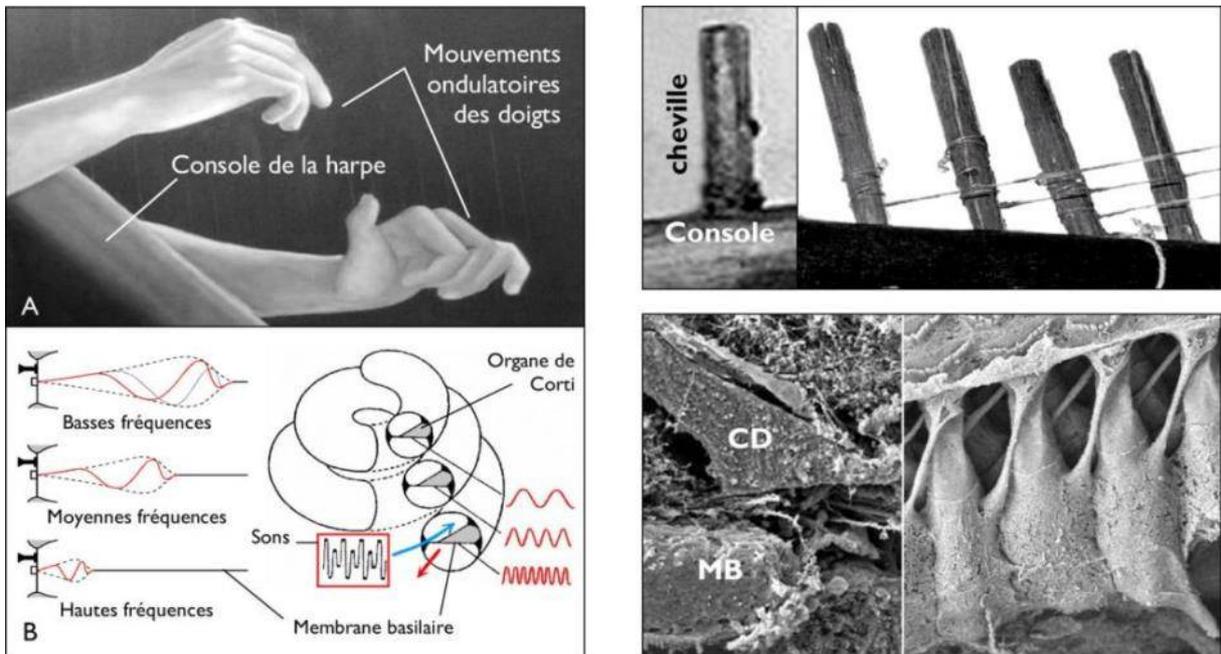


Fig. 11. (à gauche) A) Les doigts du harpiste complètent le rôle de la console. B) Modèles d'ondulations de la membrane basilaire (MB) en réponse à un signal sinusoïdal. (en haut à droite) Les chevilles, enchâssées dans la console, permettent de tendre les cordes et de régler leur fréquence. (en bas à droite) Les cellules de Deiters, fermement fixées à la MB permettent de moduler l'électromotilité des cellules ciliées externes en modifiant leur tension membranaire.

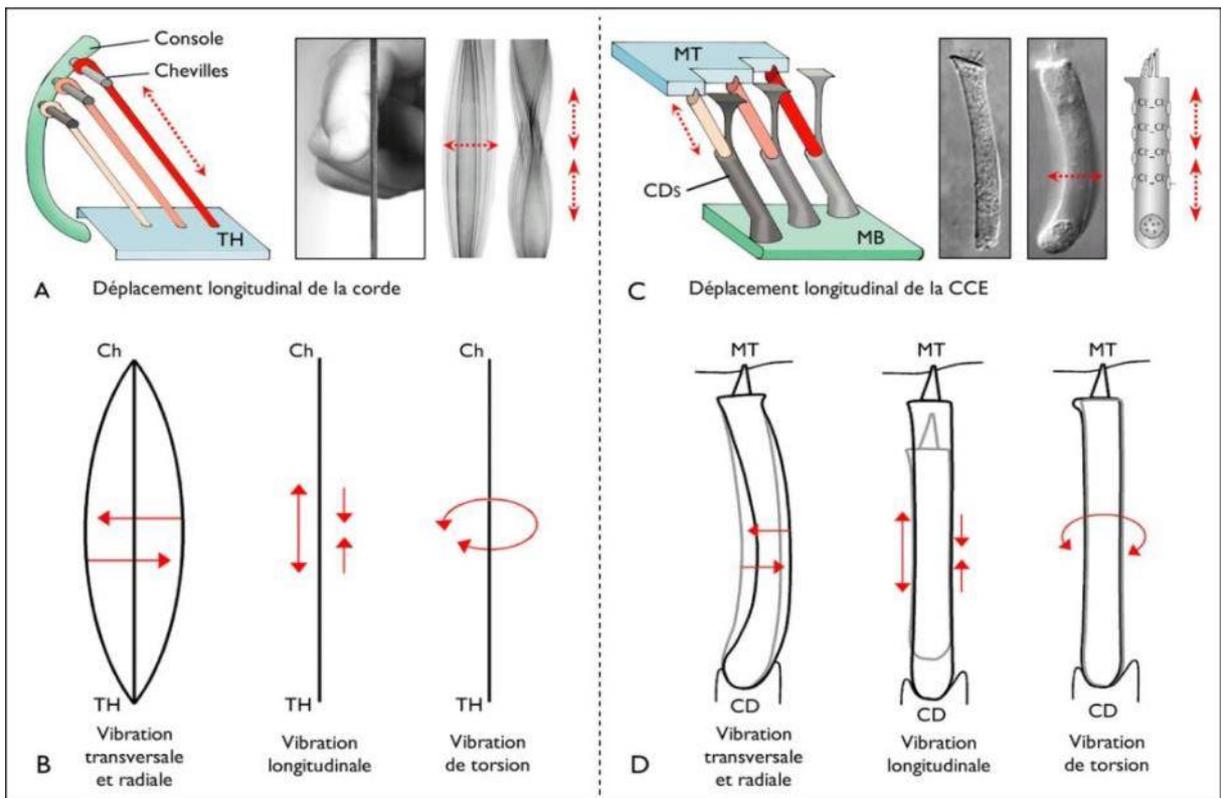


Fig. 12. A) Cordes tendues entre la console (via les chevilles) et la table d'harmonie ; B) modes vibratoires d'une corde de harpe. La corde excitée vibre principalement selon trois modes : transversal, longitudinal et de torsion. Ces trois modes coexistent et déterminent le spectre de la corde isolée ; C) CCEs tendues entre la membrane basilaire (via les cellules de Deiters) et la membrane tectoriaire ; D) modes vibratoires d'une CCE. En plus des vibrations transversales et longitudinales auxquelles est soumise une CCE, des vibrations de torsion ont été observées. La configuration de l'organe de Corti est telle que les CCEs sont inclinées dans les limites des membranes basilaire et tectoriaire, qui s'étendent chacune le long de la cochlée à travers l'organe de Corti. Comme les CCEs sont éprouvées *in vivo* par les vibrations transversale et radiale de ces membranes, la charge appliquée aux cellules engendre des mouvements de flexion et de torsion.

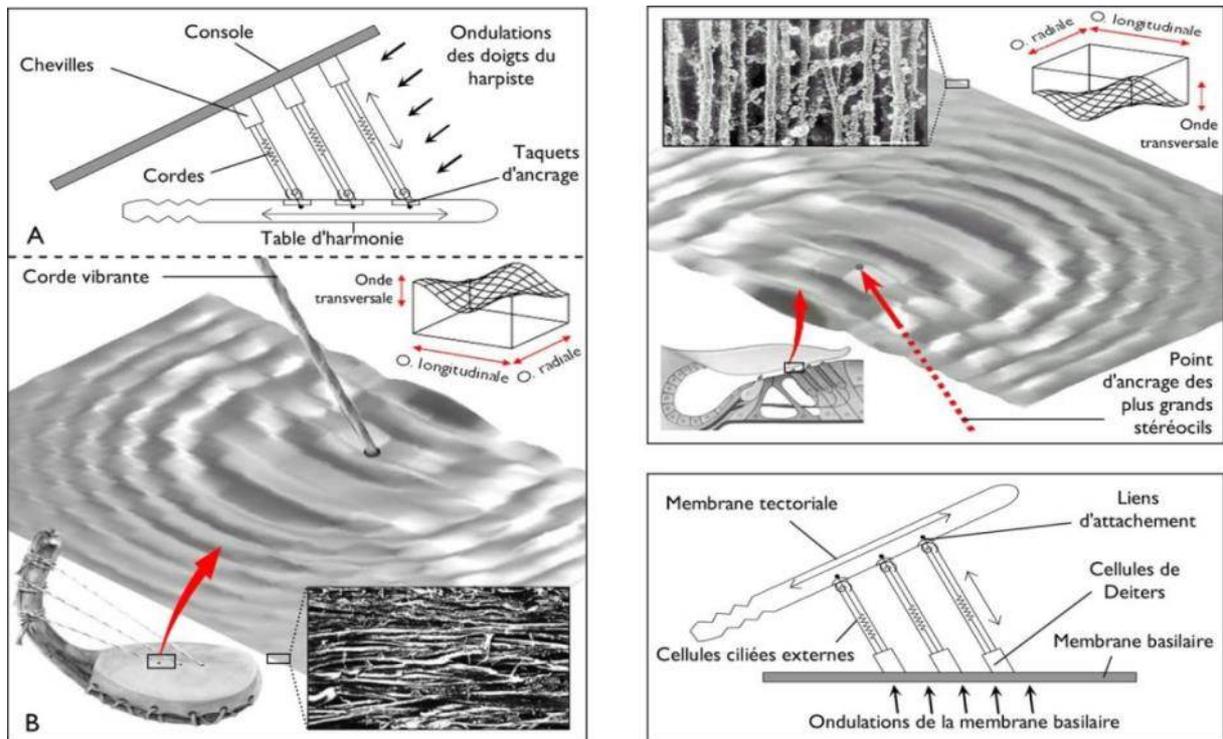


Fig. 13. (à gauche) A) Modèle dynamique de la partie active d'une harpe urukéenne ; B) ondes multimodales engendrées par les vibrations d'une corde au sein de la TH et distribution des fibrilles de collagène dans la peau dont est constituée la TH. (en haut à droite) Ondes multimodales engendrées par les vibrations d'une CCE au sein de la MT et distribution des fibrilles de collagène dans la MT. (en bas à droite) Modèle dynamique de la partie active de l'organe de Corti.

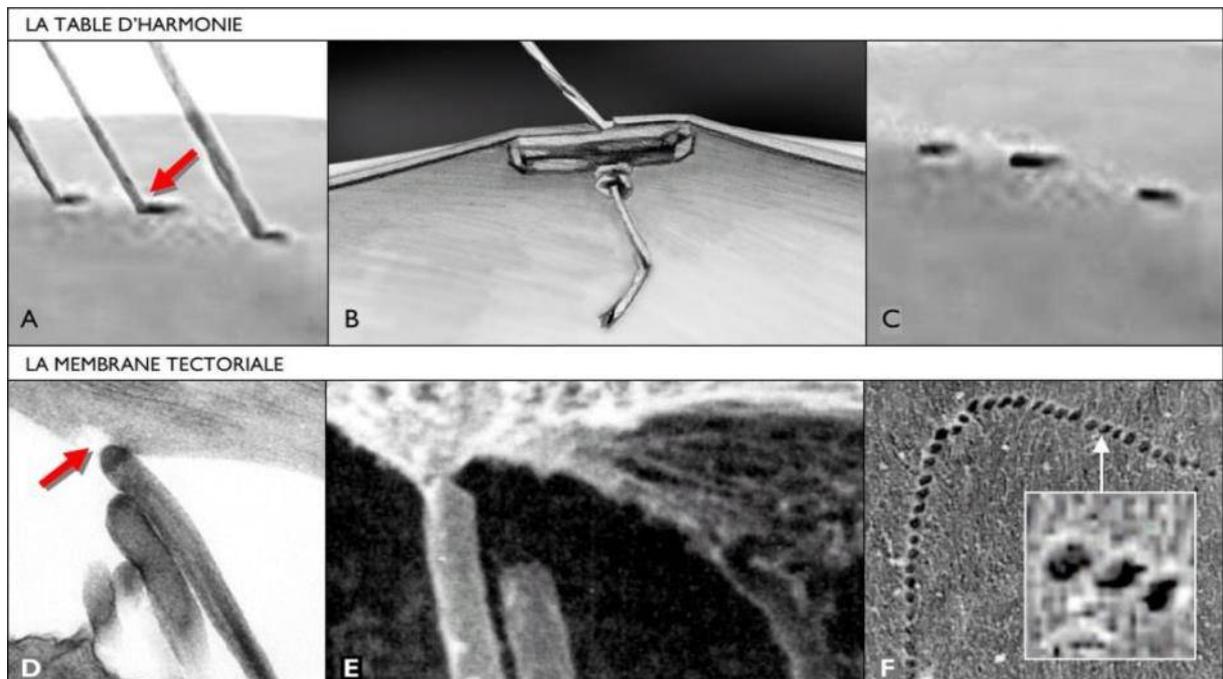


Fig. 14. A) La table d'harmonie est une membrane de peau d'animal fibreuse et gélatineuse tendue au-dessus de la caisse de résonance ; B) des taquets permettent de retenir l'extrémité inférieure des cordes sous la table d'harmonie. Ces fines lames de bois horizontales participent à la transmission des vibrations des cordes et empêchent ces dernières sous tension de s'échapper de la table d'harmonie ; C) l'extrémité inférieure des cordes est insérée sous la table d'harmonie qu'elle traverse, comme l'attestent de petits trous visibles à sa surface ; D) la membrane tectoriale est une membrane fibreuse et gélatineuse suspendue au-dessus de l'organe de Corti ; E) des liens d'attachement retiennent l'extrémité des plus longs stéréocils des CCEs en contact avec la membrane tectoriale (MT). Ces liens d'attachement transmettraient les vibrations des CCEs et empêcheraient ces dernières de se détacher de la membrane tectoriale ; F) l'extrémité des stéréocils les plus longs des CCEs est insérée dans la membrane tectoriale où elle laisse des empreintes en creux parfaitement visibles.

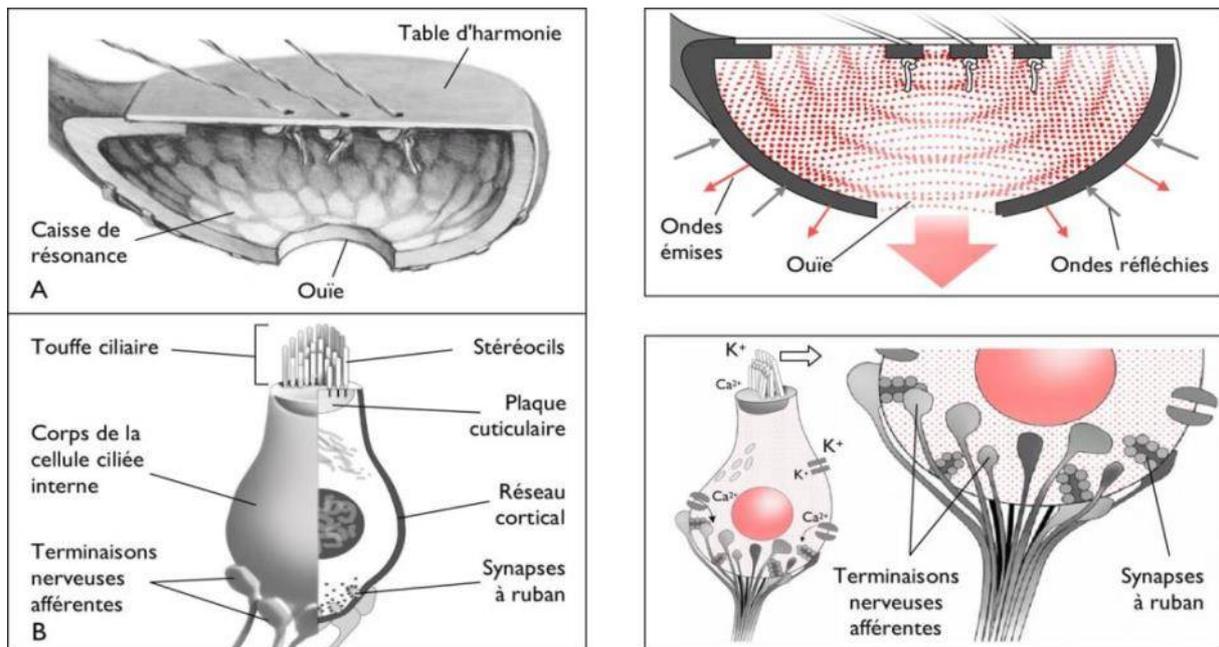


Fig. 15. (à gauche) A) La caisse de résonance a pour fonction de recevoir et de rendre audible les vibrations des cordes transmises par la table d'harmonie ; **B)** les cellules ciliées internes ont un corps piriforme ; elles ont pour fonction de façonner le signal avant de le transmettre au cerveau. **(en haut à droite)** Lorsque les ondes sonores pénètrent à l'intérieur de la caisse de résonance, elles sont réfléchies par les parois, se rencontrent, s'additionnent et prennent des formes diverses avant de s'échapper pour 1/3 à travers les parois de la caisse et pour 2/3 par son (ou ses) ouïe(s). Ces vibrations rebondissent en partie sur le corps du harpiste et les éventuelles parois d'une enceinte fermée ou semi-ouverte dans laquelle il est susceptible de se tenir, et finissent par se répercuter sur les parois extérieures de la caisse. Elles engendrent alors des micromouvements à l'intérieur de celle-ci qui viennent s'ajouter aux nouvelles ondes ; c'est ce qu'on appelle la réverbération sonore. **(en bas à droite)** Les CCI sont innervées par environ 95 % de fibres afférentes. Chaque fibre ne s'articule qu'avec une CCI. Mais chaque CCI possède entre 10 et 30 fibres afférentes qui lui permettent de convertir un signal d'entrée simple en un message auditif élaboré et enrichi à l'adresse du cerveau.

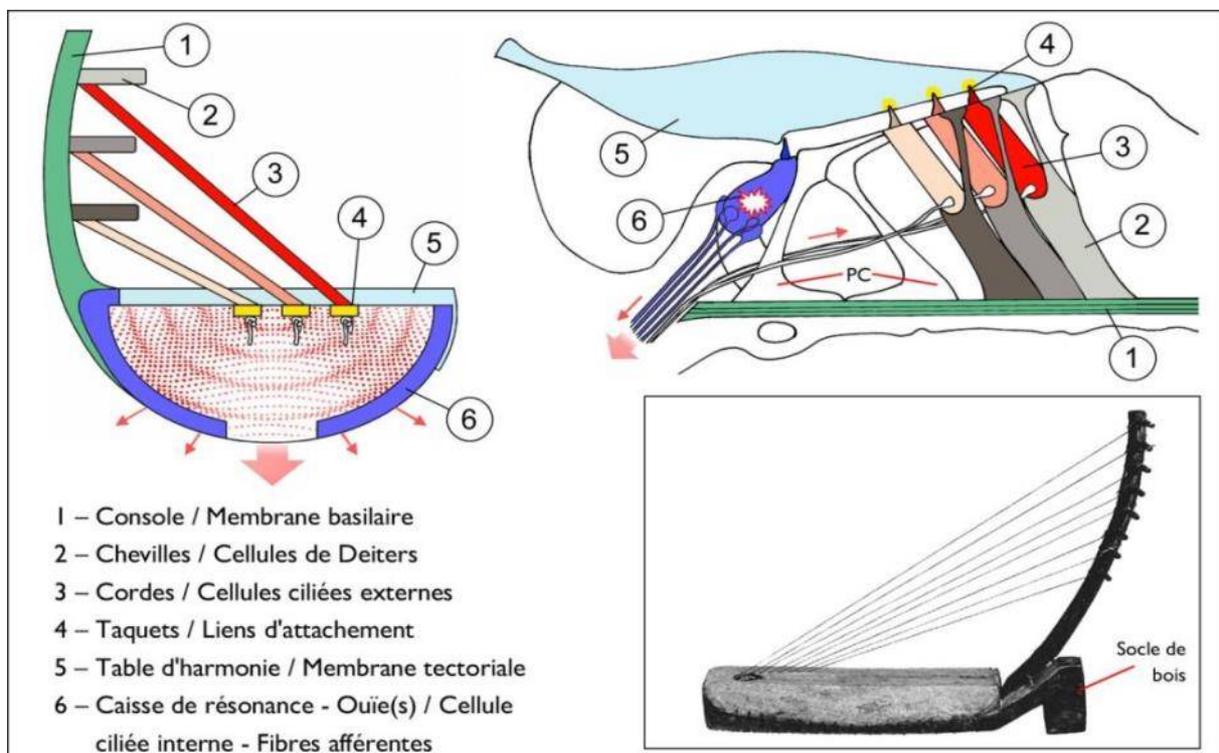


Fig. 16. Schéma synthétisant l'analogie entre une harpe urukéenne du 4^e millénaire et l'organe de Corti. Notons que cette analogie n'intègre pas une comparaison entre les socles de bois et les piliers de Corti, car ces arches n'apparaissent sur les harpes qu'au 3^e millénaire pour stabiliser leur structure (voir photo en bas à droite).



ICONEA

International conference of Near Eastern Archaeomusicology

Institute of Musical Research, School of Advanced Study
University of London
Senate House, Malet Street
London WC1E 7HU

Londres le 25 juin 2012

Cette lettre afin de donner mon approbation en ce qui concerne la qualité du contenu archéomusicologique des travaux de recherche de Messieurs Philippe Roi et Tristan Girard, que j'ai lu et auxquels j'ai suggéré des ajustements organologiques, chronologiques, et autres. Je leur accorde le droit de me citer en référence des nombreux échanges et conversations entretenus sur un sujet passionnant qui est le leur.

Ces deux chercheurs indépendants ont mené leurs travaux avec une méthodologie exemplaire remettant en question le matériel et les sources dont ils se sont instruits n'hésitant jamais à contester certaines interprétations quand elles leur semblaient instables. Nous avons particulièrement apprécié leur usage d'une protase raisonnée sans la laisser jamais sans son apodose judicieuse.

Il m'est particulièrement agréable de les féliciter.

Richard Dumbrill
Directeur fondateur d'ICONEA
Professeur d'archaeomusicologie

Contact at: rdumbrill@iconea.org www.iconea.org

Paris, le 24/09/2012

CNRS UMR 8104/INSERM U1016/Université Paris-Descartes
24, rue du Faubourg Saint-Jacques
75014 Paris
Expression Génétique, Développement et Pathologies
Tél : (33) 01 53 73 27 45
E-mail: michel.leibovici@inserm.fr

Il y a six ans de cela, Messieurs Roi et Girard m'avaient demandé de réaliser deux relectures concernant des analogies sensorielles portant sur « le métier à tisser vertical et une cellule de type I vestibulaire » ainsi que sur « l'horloge à foliot et une cellule de type II vestibulaire ». Ils m'avaient sollicité car appartenant à l'équipe du Professeur Christine Petit à l'Institut Pasteur, mon domaine d'expertise couvrait à la fois la génétique et la physiologie de l'oreille interne qui renferme les organes de l'audition et de l'équilibre. A l'époque, d'abord surpris par cette approche par analogie sensorielle, j'avais rapidement été conquis par l'originalité et la rigueur de la démarche. Aussi, lorsqu'ils m'ont contacté en Août 2012 pour participer, en tant que corédacteur, à l'élaboration d'une analogie entre la harpe urukéenne et l'oreille, j'ai tout de suite accepté. La partie concernant l'archéomusicologie était menée en collaboration avec le professeur Richard Dumbrell de l'Université de Londres et j'ai moi-même demandé au professeur Paul Avan, spécialisé en acoustique et directeur du laboratoire de biophysique neurosensorielle de Clermont-Ferrand de me prêter main forte pour la partie concernant l'audition.

Lors de l'un de nos premiers échanges, j'ai confié à Mr Roi être dubitatif quant à la possibilité d'établir une analogie solide entre la harpe qui est de prime abord un instrument simple et la cochlée dont le fonctionnement est d'une complexité extrême. Messieurs Roi et Girard m'ont alors soumis une série de modèles d'analogie, partant du plus simple vers le plus complexe. J'en ai réfuté un certain nombre car ils présentaient des incohérences évidentes jusqu'au jour où ils m'ont envoyé une analogie assez osée mais vraiment subtile. Nous avons alors travaillé dessus pour la faire évoluer jusqu'à l'analogie présentée ici. Je dois avouer que le travail a été prenant mais surtout passionnant. L'analogie présentée est originale et surtout solide. Enfin, parce qu'elle concerne un organe sensoriel dans son ensemble (la cochlée) elle présente un niveau d'élaboration que je n'avais pas eu l'occasion de lire jusqu'alors.

C'est avec beaucoup de plaisir et de satisfaction que je certifie le travail de Messieurs Philippe Roi et Tristan Girard auquel j'ai eu le bonheur d'être convié.



Michel Leibovici
Chargé de recherche au CNRS

Bibliographie

La harpe

- Areni, C.S.; Kim, D., 'The influence of background music on shopping behavior: Classical versus top-forty music in a wine store.' *Advances in Consumer Research*. Vol. 20. Published by the Academic Resource Center (1993) pp. 336-340
- Biggs, R.D., 'The Sumerian Harp.' *The American Harp Journal*. Vol. 1/3. Published by The American Harp Society (1968) pp. 6-12.
- Caubet, A., 'La Musique à Ougarit : nouveaux témoignages matériels.' *Ugarit, Religion and Culture: Proceedings of the International Colloquium on Ugarit, Religion and Culture, Edinburgh, July 1994. Essays presented in honour of Professor John C.L. Gibson*. N. Wyatt ; W. G.E. Watsonand ; J.B. Lloyd (ed.) (1996) pp. 9-31.
- Chadefaux, D.; Le Carrou, J.-L.; Fabre, B.; Daudet, L.; Quartier, L., 'Experimental Study of the Plucking of the Concert Harp.' *Proceedings of 20th International Symposium on Music Acoustics* (Associated Meeting of the International Congress on Acoustics) 25-31 August, Sydney and Katoomba (2010) pp. 1-5.
- Chadefaux, D.; Le Carrou, J.-L.; Buys, K.; Fabre, B.; Daudet, L., 'Étude expérimentale du pincement d'une corde de harpe.' *Actes du 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 12-16 Avril 2010*. Publié en ligne (2010).
- Chadefaux, D.; Le Carrou, J.-L.; Fabre, B.; Daudet, L., 'Experimentally based description of harp plucking.' *Journal of Acoustical Society of America*. Vol. 131/1. Published by the Acoustical Society of America, Melville (2012) pp. 844-855.
- Collon, D., 'La musique dans l'art mésopotamien.' *Dossiers d'Archéologie*. N° 310. Éditions Faton (2006) pp. 6-15.
- Delalleau, A.; Josse, G.; Lagarde, J.M., 'Un modèle hyperélastique à réorientation de fibres pour l'analyse des caractéristiques mécaniques de la peau.' *9^{ème} Colloque Nationale en Calcul des Structures, Giens 2009*. Communication publiée en ligne.
- Delougaz, P.; Kantor, H., 'Choga Mish - Volume I - The First Five Seasons of Excavations, 1961-1971.' *The University of Chicago – Oriental Institute Publications*. A. Alizadeh (ed.) Vol. 101. Published by the Oriental Institute of Chicago (1996) Plate 45-N.
- Delougaz, P.P.; Kantor, H.J., 'New Evidence for the Prehistoric & Protoliterate culture development of Khuzestan.' *The Memorial Volume of the Vth International Congress of Iranian Art & Archaeology*. Tehran - Isfahan - Shiraz. 11th - 18th April 1968. Vol. 1. Special Publication of the Ministry of Culture and Arts, Tehran (1972) pp. 14-33.
- Dubé, L.; Chebat, J.-C.; Morin, S., 'The effects of background music on consumers desire to affiliate in buyer-seller interactions.' *Psychology and Marketing*. Vol. 12/4. Published by Wiley-Blackwell (1995) pp. 305-319.
- Dumbrill, R., 'Appendix.' *A Queen's Orchestra at the Court of Mari: New Perspectives on the Archaic Instrumentarium in the Third Millenium*. M. Marcetteau. ICONEA Proceedings 2008 (2008) pp. 73-75.
- Dumbrill, R., 'Harps.' *The Archaeomusicology of the Ancient Near East*. Trafford Publishing (2005) pp. 179-226.
- Dumbrill, R., *Götterzahlen and Scale Structure* (1997).
- Dumbrill, R., *Music Theorism in Ancient World*. ICONEA Proceeding 2009-2010 (2010) pp. 107-132.
- Erman, A.; Ranke, H., 'Les divertissements.' *La civilisation égyptienne*. Éditions Payot (1985) p. 318.
- Farmer, H.G., 'The Music of Ancient Mesopotamia.' *New Oxford History of Music. Ancient and Oriental Music*. Vol. 1. Published by Oxford University Press (1957) pp. 228-254.
- Frankfort, H., *Kingship and the Gods, a Study of Ancient Near Eastern religion as the Integration of Society and Nature*. Published by the University of Chicago Press (1948).
- Galpin, F.W., 'The Sumerian Harp of Ur.' *Music & Letters*. Vol. 10/2. Published by the Oxford University Press (1929) pp. 108-123.
- Glattauer, A., *À l'origine de la harpe*. Éditions Buchet-Chastel (1999) pp. 13-23.
- Guéguen, N.; Jacob, C.; Lourel, M.; Le Guellec, H., 'Effect of Background Music on Consumer's Behavior: A Field. Experiment in a Open-Air Market.' *European Journal of Scientific Research*. Vol. 16/2. Published by the Scientific Research Platform – SRP (2007) pp. 268-272.
- Hartmann, H., *Die Musik der Sumerischen Kultur*. Frankfurt am Main (1960).
- Helmholtz, H.L.F., *On the sensations of tone, as a physiological basis for the Theory of Music*. Third Edition. Published by Longmans, Green and Co. (1865) reprinted by permission of Dover Publication, Inc. (1954).
- Ivanov, V.V., 'An Ancient Name of the Lyre.' *Archiv Orientální*. Vol. 67. Published by the Oriental Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic (1999) pp. 585-600.
- Joannès, F., 'Musique.' *Dictionnaire de la civilisation mésopotamienne*. Éditions Robert Laffont (2001) pp. 545-546.

- Kilmer, A., 'The Cult Song with Music from Ancient Ugarit: Another Interpretation.' *Revue d'Assyriologie et d'Archéologie Orientale*. Vol. 68. Éditions Presses Universitaires de France (1974) pp. 69-82.
- Kilmer, A., 'The Discovery of an Ancient Mesopotamian Theory of Music.' *Proceedings of the American Philosophical Society*. Vol. 115. The American Philosophical Society (1971) pp. 131-149.
- Kilmer, A., 'Musik. A. I. In Mesopotamien.' *Reallexikon der Assyriologie und Vorderasiatischen Archäologie*. Vol. 8. De Gruyter (1997) pp. 463-482.
- Kilmer, A.; Crocker, R.L.; Brown, R.R., *Sounds from Silence: Recent Discoveries in Ancient Near Eastern Music*. Bit Enky Publications (1976).
- Koitaishi, M., 'Music in the Texts from Ugarit.' *Ugarit-Forschungen*. Vol. 30. Ugarit-Verlag, Münster. Hubert & Co (1996) pp. 363-396.
- Krispijn, T.J.H., 'Beitrage zur altorientalischen Musikforschung 1. Äulgi und die Musik.' *Akkadica*. Vol. 70. Assyriological Center Georges Dossin (1990) pp. 1-27.
- Lawergren, B., 'Acoustics and Evolution of Arched Harps.' *The Galpin Society Journal*. Vol. 34. Published by the Galpin Society (Oxford 1981) pp. 110-129.
- Lawler, A., 'Murder in Mesopotamia.' *Science*. Vol. 317/5842. Published by AAAS (2007) pp. 1164-1165.
- Lupton, C.J.; Huston, J.E.; Craddock, B.F.; Pfeiffer, F.A.; Polk, W.L., 'Comparison of three systems for concurrent production of lamb meat and wool.' *Small Ruminant Research*. Vol. 62/2. Official Journal of the International Goat Association. Published by Elsevier (2007) pp. 133-140.
- Malamat, A., 'Musicians from Hazor and Mari.' *Semitic and Assyriological studies presented to Pelio Fronzaroli*. Harrassowitz Verlag (2003) pp. 355-357.
- Marcetteau, M., 'La musique au Proche-Orient ancien : l'approche des musicologues.' *Dossiers d'Archéologie*. N° 310. Éditions Faton (2006) pp. 4-5.
- Marcetteau, M., *A Queen's Orchestra at the Court of Mari : New Perspectives on the Archaic Instrumentarium in the Third Millenium*. ICONEA proceedings 2008 (2008) pp. 67-73.
- McMahon, A., 'Report on the Excavations at Tell Brak, 2008.' *Newsletter of the British Institute for Study of Iraq*. Vol. 22. Published by the British Institute for Study in Irak (2008) pp. 6-12.
- McMahon, A., 'Tell Brak 2007.' *Final Report*. Published online (2007) pp. 1-7.
- Menze, B.H.; Ur, J.A., 'Mapping patterne of long-term settlement in Northern Mesopotamia at a large scale.' *Proceeding of the National Academy of Sciences – PNAS*. Early Publication. Published by the National Academy of Sciences of the United States of America (2011) pp. 1-10.
- Muldma, M., 'La musique comme langue de communication dans le dialogue des cultures.' *Synergies - Pays Riverains de la Baltique*. N° 6. Revue de Gerfint (2009) pp. 249-262.
- Muldma, M., 'Music as a Meeting Point of Cultures'. *Education in Multicultural Environment, Dialogue of Cultures - Possibility or Inevitability ?* Tome II. Tallinn University (2009) pp. 287-299.
- Nemet-Nejat, K.R., 'Music.' *Daily life in Ancient Mesopotamia*. Published by Greenwood Press (1998) pp. 167-170.
- Oates, J., 'Archaeology in Mesopotamia: Digging Deeper at Tell Brak.' *Albert Reckitt Archaeological Lecture*. Published by the British Academy (2004).
- Oates, J.; Oates, D., 'The Reattribution of Middle Uruk Materials at Brak.' *Leaving No Stones Unturned, Essays on the Ancient Near East and Egypt in Honor of Donald P. Hansen*. Published by Eisenbrauns (2002) pp. 145-154.
- Oates, J.; Oates, D., 'The Role of Exchange Relations in the Origins of Mesopotamian Civilization.' *Explaining social change: studies in honour of Colin Renfrew*. Published by the McDonald Institute for Archaeological Research, University of Cambridge (2004) pp. 177-192.
- Oates, J.; Oates, D., 'An Open Gate: Cities of the Fourth Millennium BC (Tell Brak 1997).' *Cambridge Archaeological Journal*. N° 7. Published by The Cambridge University Press (1997) pp. 287-297.
- Osses Adams, L., 'Sumerian Harp from Ur.' *The American Harp Journal*. Vol. 19/ 2. Published by the American Harp Society (2003) pp. 9-13.
- Rebatet, L., *Les Orchestres de Sumer. Une histoire de la musique*. Éditions Robert Laffont (1973) pp. 17-29.
- Risset, J.-C., 'La musique et les sons ont-ils une forme ?' *La Recherche*. Vol. 305. Éditions Sophia Publications (1998) pp. 98-102.
- Rival, M., 'Les instruments de musique au 4^e millénaire.' *Les grandes inventions*. Éditions Larousse (1994) pp. 40-41.
- Ruwet, N., 'Musicologie et linguistique.' *Étude internationale sur les tendances principales de la recherche dans les sciences de l'homme*. Unesco/SS/41/3.244.1/h/24 (1966).
- Schaeffner, A., 'Travail et jeu.' *Origine des instruments de musique*. Éditions EHESS (1994) pp. 95-108.
- Seidel, H., 'Musik und Religion. Altes und Neues Testament.' *Theologische Realenzyklopädie*. Vol. 23. Éditions de Gruyter (1994) pp. 441-446.

- Selz, G.J., 'The Holy Drum, the Spear, and the Harp: Towards an Understanding of the Problems of Deification in Third Millennium Mesopotamia.' *Sumerian Gods and Their Representations*. Published by STYX Publications (1997) pp. 167-213.
- Shehata, D., 'Les instruments de musique au Proche-Orient Ancien.' *Dossiers d'Archéologie*. N° 310. Éditions Faton (2006) pp. 16-22.
- Sloboda, J.A. 'The Musical Mind, The Cognitive Psychology of Music.' *Oxford Psychology Series*. N° 5. Published by Clarendon Press (1994).
- Soltysiak, A., 'Preliminary Report on Human Remains from Tell Majnuna (spring 2007).' *Excavations at Tell Brak 2006-2007*. Published by the British Institute for Study in Irak (2007) pp. 161-163.
- Soltysiak, A., 'Short Fieldwork Report: Tell Majnuna (Syria), Season 2006.' *Bioarchaeology of the Near East*. Vol. 2. Published online on www.anthropology.uw.edu.pl (2008) pp. 77-94.
- Spycket, A., 'La musique instrumentale mésopotamienne.' *Journal des savants*. Vol. 3. Publication de l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres. Diffusion De Boccard (1972) pp. 158-162.
- Tillmann, B., 'La musique, un langage universel ?' *Pour la Science*. N° 373. Éditions Belin (2008) pp. 124-138.
- Valette, C.; Cuesta, C., *Mécanique de la corde vibrante*. Éditions Hermès (1993).
- Wilson, S., 'The effect of music on perceived atmosphere and purchase intentions in a restaurant.' *Psychology of Music*. Vol. 31/1. Published by Sage Publications (2003) pp. 93-112.

Le système auditif

- Alexander C.; Meyer, A.C. et al., 'Tuning of synapse number, structure and function in the cochlea.' *Nature Neuroscience*. Vol. 12/4. Nature Publishing Group (2009) pp. 444-453.
- Arnold, W.; Anniko, M., 'Supporting and membrane structures of human outer hair cells: evidence for an isometric contraction.' *ORL - Journal for Oto-Rhino-Laryngology and its related specialties*. Vol. 51/6. Published by Karger (1989) pp. 339-353.
- Ashmore, J., 'Cochlear Outer Hair Cell Motility.' *The American Physiological Society*. Vol. 88. Published by Wiley & Sons (2008).
- Ashmore, J. et al., 'The remarkable cochlear amplifier.' *Hearing Research*. Vol. 266. Published by Elsevier (2010) pp. 1-17.
- Bear, M.F.; Connors, B.W.; Paradiso, M.A.; Nieoullon, A., 'Physiologie de la cochlée.' *Neurosciences. À la découverte du cerveau*. 2^e édition. Éditions Pradel (2002) pp. 370-389.
- Bremond, G. A., 'Aspect général du labyrinthe et de son contenu conjonctif.' *L'oreille dans le temporal. Anatomie descriptive, topographique et systématisation*. Éditions Solal (1994) pp. 14-44.
- Breuskin, I.; Bodson, M.; Thelen, N.; Thiry, M.; Nguyen, L.; Belachew, S.; Lefebvre, P.P.; Malgrange, B., 'Strategies to regenerate hair cells: Identification of progenitors and critical genes.' *The Journal of Hearing Research*. Vol. 236/1-2. Published by Elsevier (2007) pp. 1-10.
- Brownell, W.E., 'Outer Hair Cell Electromotility and Otoacoustic Emissions.' *Ear Hear*. Vol. 11/2. Published by Williams & Wilkins (1990) pp. 82-92.
- Brownell, W.E.; Spector, A. A.; Raphael, R. M.; Popel, A. S., 'Micro and nanomechanics of the cochlear outer hair cell.' *Annual Review Biomedical Engineering*. Vol. 3. Published by Annual Reviews (2001) pp. 169-194.
- Buser, P.; Imbert, M., 'General structure of the sounds of musical instruments.' *Audition. The Physiological Psychology of Hearing*. Vol. 3. Massachusetts Institute of Technology (1992) pp. 95-111.
- Cai, H.; Shoelson, B.; Chadwick, R.S., 'Evidence of Tectorial Membrane Radial Motion in a Propagating Mode of a Complex Cochlear Model.' *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences)*. Vol. 1/16. Published by the National Academy of Sciences of the United States of America (2004) pp. 6243-6248.
- Corey, D. P.; Hudspeth, A. J., 'Ionic basis of the receptor potential in a vertebrate hair cell.' *Nature*. Vol. 281/5733. Published by Macmillan Journals Ltd (1979) pp. 675-677.
- Dallos, P., 'The Active Cochlea.' *The Journal of Neuroscience*. Vol. 12/12. Published by The Society for Neuroscience (Washington 1992) pp. 4575-4585.
- DeRosier, D. J.; Tilney, L. G., 'The Structure of the Cuticular Plate, an In Vivo Actin Gel.' *The Journal of Cell Biology*. Volume 109/6. Published by the Rockefeller University Press (1989) pp. 2853-2867.
- Dulguerov, P.; Brownell, W. E., 'Physiologie cochléaire.' *Précis d'audiophonologie et de déglutition. L'oreille et les voies de l'audition*. Vol. 1. Éditions Solal (2005) pp. 57-79.
- Eddine, C.A.; Williams, M.; Ayache, D., 'Radio-anatomie utile de l'oreille.' *Journal of Radiology*. Vol. 87. Éditions Elsevier Masson (2006) pp. 1728-1742.
- Edeline, J.-M., 'Anatomie et physiologie des voies auditives centrales : le système thalamo-cortical - L'oreille et les voies de l'audition'. *Précis d'audiophonologie et de déglutition*. Tome I. Éditions Solal (2005) pp. 97-110.

- Etournay, R.; Lepelletier, L.; Boutet de Monvel, J.; Michel, V.; Cayet, N.; Leibovici, M.; Weil, D.; Foucher, I.; Hardelin, J.-P.; Petit, C., 'Cochlear outer hair cells undergo an apical circumference remodeling constrained by the hair bundle shape.' *Development*. Vol. 137. Published by The Company of Biologists Ltd (2010) pp. 1373-1383.
- Fettiplace, R.; Hackney, C.M., 'The sensory and motor roles of auditory hair cells.' *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 7. Published by Macmillan Journals Ltd (2006) pp. 19-29.
- Forge, A.; Wright, T., 'The molecular architecture of the inner ear.' *British Medical Bulletin*. Vol. 63. Published by The British Council (2002) pp. 5-24.
- Fraisse, P., 'L'anticipation des stimuli rythmiques. Vitesse d'établissement et précision de la synchronisation.' *L'année psychologique*. Vol. 66/1. Éditions Armand Colin (1966) pp. 15-36.
- Fridberger, A.; Boutet de Monvel, J.; Zheng, J.; Hu, N.; Zou, Y.; Ren, T.; Nuttall, A., 'Organ of Corti Potentials and the Motion of the Basilar Membrane.' *The Journal of Neuroscience*. Vol. 2/45. Published by Wiley & Sons (2004) pp. 10057-10063.
- Fuchs, P.A., 'Time and intensity coding at the hair cell's ribbon synapse.' *Journal of Physiology*. Vol. 566/1. Published by The Physiological Society (2005) pp. 7-12.
- Furness, D.N.; Mahendrasingam, S.; Ohashi, M.; Fettiplace, R.; Hackney, C.M., 'The Dimensions and Composition of Stereociliary Rootlets in Mammalian Cochlear Hair Cells: Comparison between High- and Low-Frequency Cells and Evidence for a Connection to the Lateral Membrane.' *The Journal of Neuroscience*. Vol. 28/25. Published by the Society for Neuroscience (2008) pp. 6342-6353.
- Ghaffari, R.; Aranyosi, A.J.; Freeman, D.M., 'Longitudinally propagating traveling waves of the mammalian tectorial membrane.' *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences)*. Vol. 104/42. Published by the National Academy of Sciences of the United States of America (2007) pp. 16510-16515.
- Ghaffari, R.; Aranyosi, A.J.; Richardson, G.P.; Freeman, D.M., 'Tectorial membrane travelling waves underlie abnormal hearing in Tectb mutant mice.' *Nature Communications*. Vol. 1/96. Published by Nature Publishing Group (2010) pp. 1-6.
- Gummer, A.W.; Hemmert, W.; Zenner, H.P., 'Resonant tectorial membrane motion in the inner ear: Its crucial role in frequency tuning.' *PNAS (Proceeding of the National Academy of Sciences) Neurobiology*. Vol. 93. Published by the National Academy of Sciences of the United States of America (1996) pp. 8727-8732.
- Hanaway, J.; Woosley, T.A.; Gado, M.H.; Roberts, M.P., 'Voies de l'audition.' *Atlas du cerveau. Un guide visuel du système nerveux central humain*. Éditions De Boeck Université (2001) pp. 206-207.
- Helmholtz, H.L.F., *On the Sensations of Tone as a Physiological basis for a Theory of Music*. Third Edition. Published by Longmans, Green, and Co. Aberdeen University Press (1895) reprinted by permission of Dover Publication, Inc. (1954).
- Hemmert, W.; Zenner, H.P.; Gummer, A. W., 'Three-Dimensional Motion of the Organ of Corti.' *Biophysical Journal*. Vol. 78. Published by Cell Press (2000) pp. 2285-2297.
- Imbert, M., 'L'oreille et l'audition.' *Traité du cerveau*. Éditions Odile Jacob (2006) pp. 233-248.
- Kamina, P., 'Voies cochléaires.' *Anatomie clinique*. Tome 5. Éditions Maloine (2008) pp. 78-81.
- Lewald, J.; Karnath, H.-O., 'Vestibular Influence on Human Auditory Space Perception.' *Journal of Neurophysiology*. Vol. 84/2. Published by The American Physiological Society (2000) pp. 1107-1111.
- Lim, D., 'Cochlear anatomy related to cochlear micromechanics'. *Journal of Acoustical Society of America*. Vol. 67/5. Published by the Acoustical Society of America, Melville (1980) pp. 1686-1695.
- Lim, K.M.; Steele, C.R., 'A three-dimensional nonlinear active cochlear model analyzed by the WKB-numeric method.' *Hearing Research*. Vol. 170. Published by Elsevier (2002) pp. 190-205.
- Augusto, L.S.C.; Kulay, L.A.; Franco, E.S., 'Audition and exhibition to toluene - a contribution for the theme.' *International Archives of Otorhinolaryngology*. Vol. 16/2. Open Access Journal (2012) pp. 246-258.
- Lukashkin, A.N.; Lukashkina, V.A.; Legan, P.K.; Richardson, G.P.; Russell, I.J., 'Role of the Tectorial Membrane Revealed by Otoacoustic Emissions.' *Journal of Neurophysiology*. Vol. 91/1. Published by The American Physiological Society (2004) pp. 163-171.
- Marieb, E.N., 'Oreille : ouïe et équilibre.' *Anatomie et physiologie humaines*. Adaptation de la 6^e édition américaine par R. Lachaine. Éditions Pearson Education France (2005) pp. 599-608.
- Marieb, E.N.; Hoehn, K., 'The Ear: Hearing and Balance.' *Human Anatomy and Physiology*. Seventh Edition. Published by Pearson Education (2004) pp. 583-592.
- Nam, J.H.; Fettiplace, R., 'Force Transmission in the Organ of Corti Micromachine.' *Biophysical Journal*. Vol. 98. Published by Cell Press (2010) pp. 2813-2821.
- Nilsen, K.E.; Russell, I.J., 'Timing of cochlear feedback: spatial and temporal representation of a tone across the basilar membrane.' *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 2/7. Published by Macmillan Journals Ltd (1999) pp. 642-648.
- Pritchard, T. C.; Alloway, K.D., 'Système auditif.' *Neurosciences médicales. Les bases neuroanatomiques et neurophysiologiques*. Éditions De Boeck Université (2002) pp. 277-298.

- Pritchard, T.C.; Alloway, K.D., 'Auditory System.' *Medical Neuroscience*. First Edition. Fence Creek Publishing (1999) pp. 229-247.
- Purves, D. Augustine, G. J. Fitzpatrick, D. Katz, L. C. Lamantia, A.S. McNamara, J.O., 'Le système auditif.' *Neurosciences*. Traduction de la 3^e édition américaine par Jean-Marie Coquery. Éditions De Boeck (2005) pp. 283-314.
- Purves, D.; Augustine, G.J.; Fitzpatrick, D.; Hall, W.C.; Lamantia, A.-S.; McNamara, J.O., 'The Auditory System.' *Neuroscience*. Third Edition. Published by Sinaur Associates Inc. (2004) pp. 283-314.
- Raphael, Y.; Altschuler, R.A., 'Structure and innervation of the cochlea.' *Brain Research*. Vol. 60. Published by Elsevier (2003) pp. 397-422.
- Ren, T., 'Longitudinal pattern of basilar membrane vibration in the sensitive cochlea.' *Proceeding of the National Academy of Sciences*. Vol. 99/26. Published by the National Academy of Sciences of the United States of America (2002) pp. 17101-17106.
- Richardson, G.P.; Lukashkin, A.N.; Russell, I.J., 'The tectorial membrane: One slice of a complex cochlear sandwich.' *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*. Vol. 16/5. Published by Lippincott Williams & Wilkins (2008) pp. 458-464.
- Rival, M., 'Musique et mathématiques.' *Les grandes inventions*. Éditions Larousse (1994) p. 40.
- Safieddine, S.; El-Amraoui, A.; Petit, C., 'The Auditory Hair Cell Ribbon Synapse: From Assembly to Function.' *Annual Review of Neuroscience*. Vol. 35. Published by Annual Reviews (2012) pp. 509-528.
- Santos-Sacchi, J., 'Functional motor microdomains of the outer hair cell lateral membrane.' *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*. Vol. 445. Published by Springer (2002) pp. 331-336.
- Shoelson, B.; Dimitriadis, E.K.; Cai, H.; Kachar, B.; Chadwick, R.S., 'Evidence and Implications of Inhomogeneity in Tectorial Membrane Elasticity.' *Biophysical Journal*. Vol. 87. Published by Rockefeller University Press (2004) pp. 2768-2777.
- Stepanyan, R.; Belyantseva, I.A.; Griffith, A.J.; Friedman, T.B.; Frolenkov, G.I., 'Auditory mechanotransduction in the absence of functional myosin-Xva.' *The Journal of Physiology*. Vol. 576/3. Published by the Cambridge University Press (2006) pp. 801-808.
- Temchin, A.N.; Recio-Spinoso, A.; Cai, H.; Ruggero, M.A., 'Traveling Waves on the Organ of Corti of the Chinchilla Cochlea: Spatial Trajectories of Inner Hair Cell Depolarization Inferred from Responses of Auditory-Nerve Fibers.' *The Journal of Neuroscience*. Vol. 32/31. Published by The Society for Neuroscience (2012) pp. 10522-10529.
- Tilney, L.G.; Derosier, D.J.; Mulroy, M.J., 'The Organization of Actin Filaments in the Stereocilia of Cochlear Hair Cells.' *The Journal of Cell Biology*. Vol. 86/1. Published by the Rockefeller University Press (1980) pp. 244-259.
- Tsuprun, V.; Santi, P., 'Ultrastructural organization of proteoglycans and fibrillar matrix of the tectorial membrane.' *Hearing Research*. Vol. 110/1-2. Published by Elsevier (1997) pp. 107-118.
- Ulfendahl, M.; Flock, A., 'Outer Hair Cells Provide Active Tuning in the Organ of Corti.' *Physiology. News in Physiological Sciences*. Vol. 13. Published by Waverly Press (1998) pp. 107-111.
- Verpy, E.; Leibovici, M.; Michalski, N.; Goodyear, R.; J. Houdon, C.; Weil, D.; Richardson, G. P.; Petit, C., 'Stereocilin connects outer-hair-cell stereocilia to one another and to the tectorial membrane.' *The Journal of Comparative Neurology*. Vol. 519/2. Published by the Wistar Institute of Anatomy and Biology (2011) pp. 194-210.
- Vranceanu, F.; Perkins, G.A.; Terada, M.; Chidavaenzi, R.L.; Ellisman, M.H.; Lysakowski, A., 'Striated organelle, a cytoskeletal structure positioned to modulate hair-cell transduction.' *PNAS (Proceeding of the National Academy of Sciences)*. Vol. 109/12. Published by the National Academy of Sciences of the United States of America (2012) pp. 4473-4478.
- Yu, N.; Zhao, H-B., 'Modulation of Outer Hair Cell Electromotility by Cochlear Supporting Cells and Gap Junctions.' *Plos One : www.plosone.org*. Vol. 4/11. Published online (2009).
- Zetes, D.E.; Steele, C. R., 'Fluid-structure interaction of the stereocilia bundle in relation to mechanotransduction.' *Journal of Acoustical Society of America*. Vol. 101/6. Published by the Acoustical Society of America (1997) pp. 3593-3601.
- Zheng, J.; Shen, W.; He, D.Z.Z.; Long, K.B.; Madison, L.D.; Dallos, P., 'Prestin is the motor protein of cochlear outer hair cells.' *Nature*. Vol. 405. Nature Publishing Group (2000) pp. 149-155.

Extrait de *La Théorie Sensorielle. I - Les Analogies Sensorielles (2013) Roi, P. & Girard, T.* Published by
First Edition Design Publishing. Library of Congress Cataloging in Publication Data.
Dépôt légal à la Bibliothèque royale de Belgique.

Tous droits réservés ©2013. Philippe Roi et Tristan Girard

Contact : theoriesensorielle@gmail.com