



CAPTEUR
DE LA POSITION
DE L'ÉPAULE

BOÎTIER
DE CONTRÔLE
EXTERNE

Les progrès de l'électronique

Des électrodes pourraient-elles stimuler des nerfs rendus inopérants par une lésion de la moelle épinière et restaurer ainsi la fonction de certains muscles paralysés ? En fait, de tels dispositifs existent déjà, et deux nouveaux systèmes améliorant l'autonomie des personnes équipées ont récemment reçu l'agrément de l'administration américaine de la santé. L'un d'eux permet à certaines personnes qui ont conservé la mobilité de l'épaule d'utiliser leur main. Des mouvements précis de l'autre épaule activent un détecteur qui envoie des signaux vers une unité de commande externe. Cette dernière relaie les signaux jusqu'à une boucle de transmission implantée, reliée à des fils électriques dont l'extrémité atteint les muscles du bras et de la main.

L'autre dispositif, utilisé depuis longtemps en Europe, permet aux personnes atteintes de commander le sphincter de leur vessie. Un dispositif de transmission des signaux active une sorte de pacemaker qui envoie des signaux électriques aux nerfs innervant la vessie : la vessie et le sphincter se contractent, puis se relâchent, de sorte que la vessie peut se vider. Le système stimule également les nerfs de l'intestin et favorise l'évacuation des selles.

D'autres dispositifs électriques sont disponibles ou en cours d'étude : ils permettent notamment la station debout (pour faciliter, par exemple, le déplacement d'un fauteuil roulant au lit ou aux toilettes), l'exercice du cœur et des poumons, ils facilitent la respiration, déclenchent la toux, améliorent la circulation sanguine. Depuis une dizaine d'années, des pompes implantées sous la peau de l'abdomen et communiquant avec le liquide céphalo-rachidien délivrent à la moelle des produits qui réduisent les spasmes musculaires parfois extrêmement gênants.

et la 4-aminopyridine risque de renforcer cette prédisposition).

Un traitement par un facteur neurotrophique, le NT-3 par exemple, capable de stimuler la remyélinisation des axones chez les animaux, est déjà en cours d'essais cliniques de phase III chez des personnes ayant une lésion de la moelle épinière. Il est injecté en quantité suffisante pour agir sur les nerfs des intestins, ce qui en améliore la fonction, mais les concentrations sont insuffisantes pour être efficaces dans le système nerveux central. Ainsi, cet essai n'est pas destiné à tester l'intérêt potentiel du NT-3 au cours de la remyélinisation, mais, si l'innocuité du produit est confirmée, d'autres essais suivront ; on administrera alors des doses suffisamment fortes pour déclencher la myélinisation ou la régénération des axones.

Les espoirs thérapeutiques

Durant les années 1990, nos connaissances sur les lésions de la moelle épinière et la croissance neuronale ont notablement progressé. On devrait bientôt pouvoir améliorer la mobilité

des personnes ayant subi un traumatisme médullaire en leur administrant plusieurs traitements selon un ordre bien défini. Certains limiteront les lésions secondaires, d'autres favoriseront la régénération des axones et la remyélinisation, d'autres encore remplaceront les cellules détruites.

Quand ces espoirs se concrétiseront-ils ? La prévision est difficile, car les médicaments efficaces chez l'animal ne le sont pas toujours chez l'homme, et certains qui semblent prometteurs dans des essais cliniques menés sur quelques malades ne tiennent pas toujours leurs promesses quand on traite beaucoup de malades. Néanmoins, quelques essais cliniques sont en cours chez l'homme, et d'autres devraient bientôt commencer. On saura sans doute limiter l'étendue d'une lésion avant de savoir la réparer, et les premiers traitements destinés à minimiser les lésions consécutives à un traumatisme aigu devraient être assez rapidement disponibles. Parmi les stratégies de réparation, la stimulation de la remyélinisation devrait être la plus accessible, car elle ne requiert qu'une restauration de la gaine

d'axones intacts par ailleurs. La remyélinisation restaurerait diverses fonctions essentielles, tel le contrôle des sphincters.

Bien sûr, la réimplantation chirurgicale de tendons et les dispositifs électriques élaborés restaurent déjà certaines fonctions essentielles, mais beaucoup de personnes ne retrouveront leur autonomie qu'après reconstruction des tissus lésés grâce à la régénération des axones détruits et au rétablissement des connexions nerveuses interrompues.

Jusqu'à présent, le degré de régénération axonale et de formation de nouvelles synapses obtenu lors des interventions réalisées sur des animaux ayant des lésions médullaires n'a jamais atteint celui qui serait nécessaire à la restauration des mouvements de préhension, de la station debout ou de la marche chez des hommes adultes ayant une lésion médullaire ancienne. En raison de la complexité de la réparation de la moelle épinière, on ne peut prévoir, malgré tous les progrès accomplis, à quel moment les stratégies de régénération de la moelle épinière seront disponibles.

Aujourd'hui, les soins prodigués aux personnes ayant subi une atteinte de la moelle épinière ont surtout pour objectif d'utiliser au mieux la fonction médullaire résiduelle, mais les tentatives de réparation des lésions de la moelle et de restauration des fonctions perdues ne relèvent plus de la science-fiction.

John MCDONALD est professeur de neurologie à la faculté de médecine de Washington. Il a écrit cet article en collaboration avec plusieurs chercheurs de la Fondation Christopher Reeve de lutte contre la paralysie.

J.W. FAWCETT, *Spinal Cord Repair : From Experimental Models to Human Application*, in *Spinal Cord*, vol. 36, n° 12, pp. 811-817, décembre 1988.

M.E. SCHWAB et D. BARTHOLDI, *Degeneration and Regeneration of Axons in the Lesioned Spinal Cord*, in *Physiological Reviews*, vol. 76, n° 2, pp. 319-370, avril 1996.

M. TESSIER-LAVIGNE et C.S. GOODMAN, *The Molecular Biology of Axon Guidance*, in *Science*, vol. 274, pp. 1123-1133, novembre 1996.

Gerd KEMPERMANN et Fred H. GAGE, *La multiplication des neurones chez l'adulte*, in *Pour la Science*, juillet 1999.

Le chant des Touvas

THEODORE LEVIN • MICHAEL EDGERTON

En modifiant la morphologie de la gorge et de la bouche, on peut chanter deux mélodies simultanément. Ce chant diphonique est la spécialité des chanteurs du Sud de la Sibérie.

Dans la République autonome de Touva, entre la Russie et la Mongolie, les prairies et les forêts de la taïga impressionnent par leur silence. En tendant l'oreille, on perçoit les bruits naturels : une subtile symphonie de bourdonnements, de bêlements, de murmures, de piaulements, de sifflements... Cernée de montagnes, isolée et essentiellement rurale, la République de Touva est ainsi un de ces lieux où les bruits de l'homme n'étouffent pas ceux de la nature.

L'ambiance sonore de la République de Touva inspire aux bergers semi-nomades une forme de musique qui se fond dans ces sons naturels : ils «communiquent» avec leur environnement par des chants à deux mélodies, produites simultanément par un seul chanteur. Le premier est un son fondamental

grave, soutenu, semblable au son du bourdon d'une cornemuse. Le second est une série d'harmoniques à une ou plusieurs octaves d'intervalle, qui rappellent le sifflement d'un oiseau, les rythmes syncopés d'un torrent de montagne ou le petit galop d'un cheval.

Localement, ce chant est nommé *khöömei* ou *khoomii*, qui dérive du mot mongol signifiant gorge. En France, on le nomme chant de gorge, ou chant diphonique, et certains chanteurs occidentaux contemporains qui sont parvenus à maîtriser cette technique le nomment également chant harmonique. Ces chants sont à la fois un mode d'expression et un phénomène acoustique intéressants ; nous les avons étudiés du point de vue de l'ethnomusicologie et de la composition musicologique.

L'imitation des sons

Les légendes de Touva racontent que le chant de gorge est très ancien : les premiers chanteurs ont cherché à reproduire les sons naturels dont les timbres ou les colorations tonales sont riches en harmoniques, tel le gargouillement de l'eau ou le sifflement des vents. L'origine du chant de gorge reste donc mystérieuse, mais la musique pastorale touva semble être liée à une ancienne tradition animiste, selon laquelle les objets et les phénomènes naturels ont une âme ou sont habités par des esprits.

L'animisme touva stipule que la spiritualité des montagnes et des rivières se manifeste à la fois par leur forme et par leur situation physique, et aussi par les sons qu'elles émettent



Karen Sherbock

1. L'*IGIL*, dont joue Andrei Chuldum-ool (à droite), est une vièle à deux cordes, fabriquée avec la peau, le crin et les boyaux d'un cheval. Selon les Touvas, elle reproduit les sons équiens et permet au

musicien d'assimiler les pouvoirs spirituels du cheval. L'imitation des sons est le fondement culturel de la musique touva qui s'inspire de l'environnement (*ci-dessus*).



naturellement ou en réponse aux sollicitations humaines. Par exemple, l'écho d'une falaise a un sens spirituel. L'âme des animaux, également, s'exprime par leurs sons. L'homme maîtriserait ces pouvoirs spirituels en reproduisant tous ces bruits.

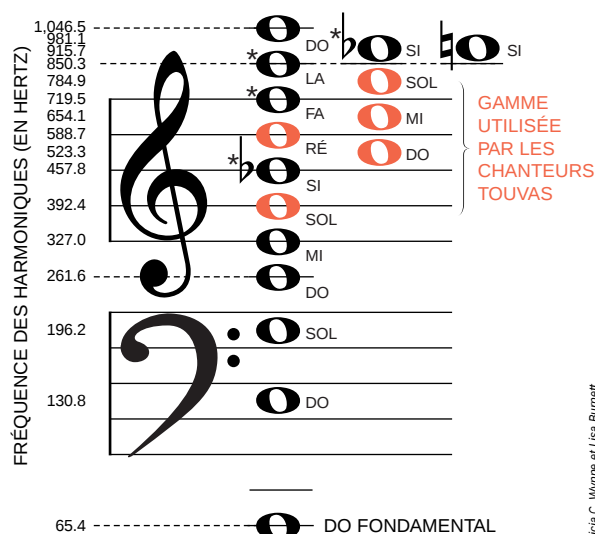
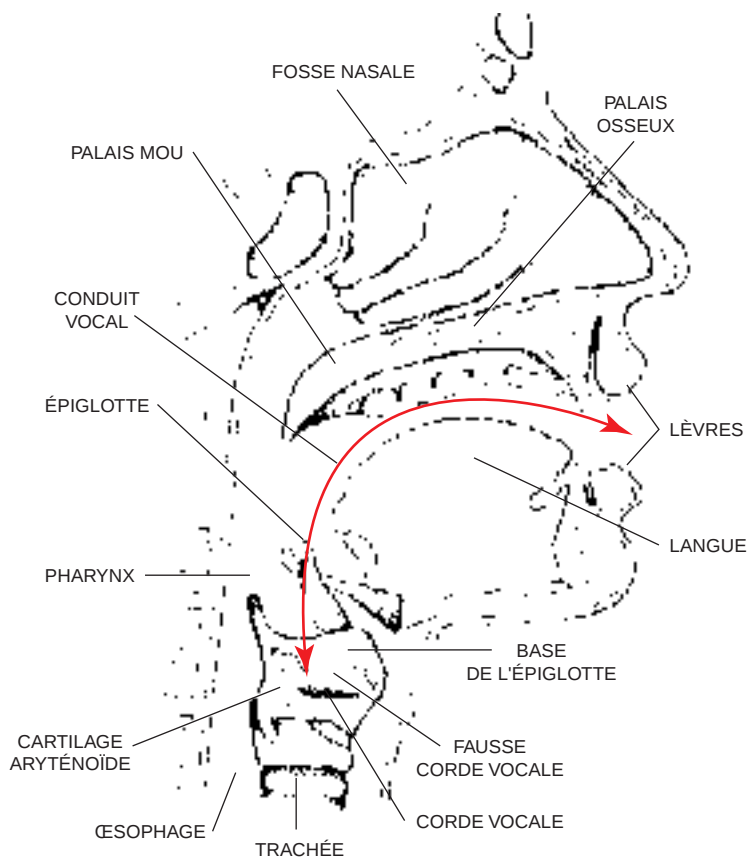
Chez les bergers, imiter les sons ambiants est aussi naturel que parler. Le chant de gorge n'est pas officiellement enseigné, mais appris à la manière d'une langue : de nombreux pâtres pratiquent le chant de gorge, sans être toujours capables de former des airs mélodieux. Aujourd'hui, la croyance que le chant de gorge rend les femmes stériles disparaît, et les femmes jeunes

pratiquent de plus en plus cette technique. La popularité du chant de gorge chez les bergers touvas est née de la coïncidence de l'animisme lié aux subtilités du son et du timbre, et de la bonne propagation des harmoniques à travers les vastes étendues de la steppe.

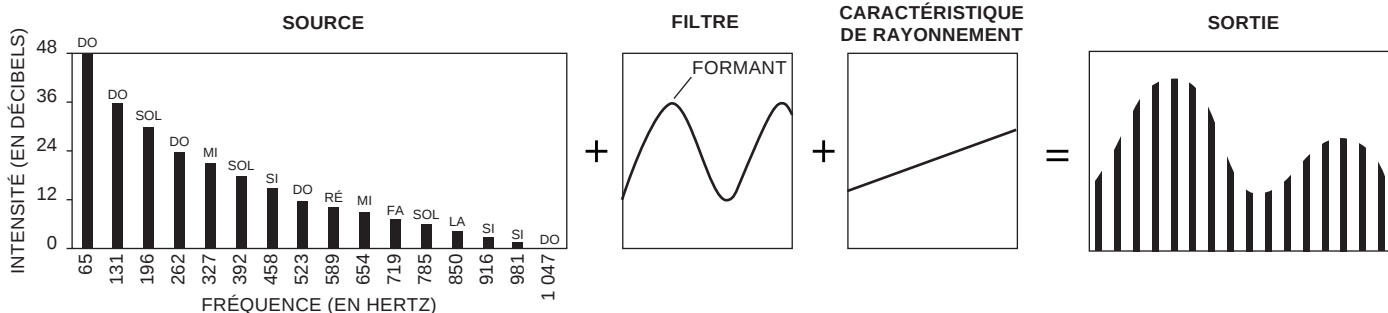
Il y a 20 ans, la plupart des Touvas considéraient la musique trop «pay-sanne» pour en donner des concerts, mais ceux-ci sont aujourd'hui courants ; des groupes de professionnels sont célèbres, et les meilleurs chanteurs sont devenus les symboles de la culture nationale.

Les plus beaux chants de gorge s'écoutent en République de Touva et

dans les territoires voisins de l'Altaï, en particulier ceux de la Mongolie occidentale. Cependant, cette pratique des harmoniques vocalement renforcées existe aussi dans diverses régions d'Asie centrale, telles les montagnes de l'Oural, où les musiciens du peuple turcophone des Bachkirs chantent des mélodies avec des harmoniques renforcées par le souffle selon un style nommé *uzliu*. Par ailleurs, les chanteurs d'épopées de l'Ouzbékistan, du Karakalpakstan et du Kazakhstan (trois régions situées entre la mer Noire et la Chine) ont introduit des harmoniques renforcées dans la poésie orale. En outre, certaines formes de chant du



2. LE SYSTÈME VOCAL HUMAIN est un instrument de musique complexe : le bourdonnement des cordes vocales et, dans certains chants de gorge, des fausses cordes vocales est filtré par le conduit vocal (à gauche), qui s'étend jusqu'aux lèvres. Le bourdonnement engendre un son fondamental, par exemple le *do* grave à une fréquence de 65,4 hertz, et ses harmoniques, dont les fréquences sont des multiples entiers de celles du fondamental (ci-dessus). On a représenté ici les notes correspondantes les plus proches dans la gamme tempérée, où tous les intervalles entre les sons sont égaux. Les astérisques indiquent les harmoniques qui ne s'alignent pas parfaitement sur les notes de la gamme tempérée.



3. LA THÉORIE DE LA SOURCE ET DU FILTRE sépare la production de la voix et sa mise en forme. Les cordes vocales produisent un mélange d'harmoniques dont l'intensité est inversement proportionnelle à la fréquence : les harmoniques les plus graves sont les

plus intenses. Le conduit vocal transmet davantage les harmoniques dont les fréquences coïncident avec celles des formants. Enfin, la «caractéristique de rayonnement» de l'air extérieur constitue un deuxième filtre.

bouddhisme tibétain contiennent une harmonique renforcée, soutenue par un son fondamental. Plus rare dans d'autres régions du monde, l'utilisation des harmoniques vocales n'en est toutefois pas absente : on l'a étudiée dans le chant traditionnel des femmes Xhosa, en Afrique du Sud, et, dans les années 1920, dans certaines improvisations du chanteur texan Arthur Miles.

Depuis dix ans, l'étude des techniques et des propriétés acoustiques des harmoniques renforcées a suivi le succès grandissant des musiques touva et mongole à travers le monde. On explique le chant en le considérant formé par une source et un filtre : la source (les cordes vocales, qui sont deux membranes horizontales dans le larynx) produit des ondes sonores, que le filtre (le conduit vocal, qui s'étend des cordes vocales aux lèvres) façonne en voyelles, en consonnes et en notes musicales (voir la figure 3).

Passionné d'harmoniques

Le son est la variation de pression périodique qui se propage dans les gaz, dans les liquides ou dans les solides. Quand on parle ou quand on chante, l'onde est créée par les vibrations des cordes vocales, qui perturbent l'air qui sort des poumons ou qui y entre. La périodicité de la vibration des cordes vocales détermine la fréquence (ou hauteur) fondamentale du son produit. Toutefois, cette vibration n'est pas sinusoïdale ; elle est composée de plusieurs ondes sinusoïdales simples, de sorte que le son est un mélange de plusieurs sons purs plus hauts que le son fondamental. Chacun de ces sons est une harmonique ; sa fréquence est un multiple entier de celle du son fondamental. Par exemple, le son d'opéra le plus grave est le *do* grave, dont la fréquence est égale à 65,4 hertz (ou vibrations par seconde) ; ses harmoniques ont des fréquences de 130,8 hertz, de 196,2 hertz, etc. (voir la figure 2). Normalement, l'intensité des harmoniques diminue, avec leur hauteur, de 12 décibels par octave : autrement dit, chaque fois que la fréquence double, l'intensité est divisée par environ 16, puisque l'échelle des décibels est logarithmique.

Le filtre est le conduit vocal que parcourt le son. L'air présent dans le conduit vocal n'est pas un milieu passif qui transmettrait le son sans le

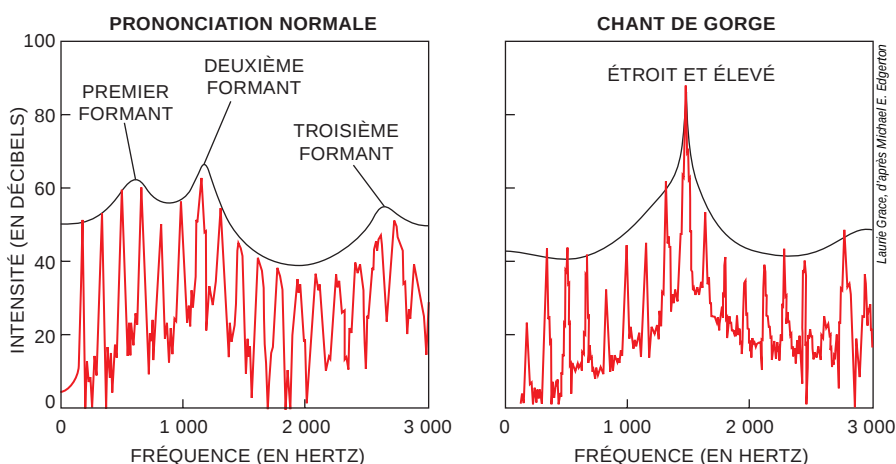
modifier ; il résonne à certaines fréquences, nommées formants, tout comme une bouteille résonne quand on souffle sur le goulot. Selon les fréquences, ces résonances naturelles amplifient ou étouffent le son des cordes vocales, transformant un bourdonnement en sons expressifs.

L'onde est également modifiée lorsqu'elle se propage à l'extérieur de la bouche : dans cet espace plus vaste, elle perd de l'énergie parce que la quantité d'air mise en mouvement est supérieure. Ce filtrage externe, nommé caractéristique de rayonnement, atténue plus les basses fréquences que les hautes fréquences.

L'ensemble de la source, du filtre et de la caractéristique de rayonnement

(voir la figure 3) produit un son dont l'intensité des harmoniques décroît en puissance à raison de six décibels par octave, sauf pour les harmoniques qui ont une fréquence proche de celles des formants (voir *La voix humaine*, par Robert Sataloff, *Pour la Science*, février 1993).

Dans la parole et le chant classiques, la majeure partie de l'intensité est concentrée dans le son fondamental, tandis que les harmoniques déterminent le timbre, c'est-à-dire la qualité sonore, qui distingue, par exemple, le son d'un violon du son d'une flûte. Dans le chant de gorge, une harmonique acquiert une intensité telle qu'elle est perçue comme un son distinct, proche d'un sifflement



4. CES SPECTRES SONORES montrent la différence entre une énonciation normale du son [o] de «fort» (à gauche) et le chant de gorge (à droite). Dans les deux cas, l'intensité est concentrée sur les fréquences des harmoniques produites par les cordes vocales (en rouge). Lorsque les harmoniques ont une fréquence égale à celle d'un formant du conduit vocal (en noir), elles sont amplifiées.

Le chant diphonique : un mode d'emploi de Trân Quang Hai

Après quelques années d'essais infructueux, je suis soudainement arrivé à maîtriser la technique du chant diphonique dans un embouteillage sur le boulevard périphérique parisien. Grâce à d'autres expériences, dans mon laboratoire cette fois-ci, j'ai ensuite mis au point deux méthodes de chant diphonique accessibles à tous.

Dans la première méthode, la langue est en position de repos, (la base de la langue peut être légèrement remontée, mais elle ne touche jamais le voile du palais). Répétez les deux voyelles *u* et *i* alternativement (comme pour dire *oui*) et bougez seulement la bouche et les lèvres : vous percevez alors faiblement des harmoniques.

La seconde méthode implique la division de la bouche en deux cavités. Chantez avec une voix de gorge la lettre *l*. Puis maintenez la pointe de la langue au centre du palais. Prononcez alors la voyelle *u*, la pointe de la langue est toujours collée fermement à la limite du palais dur et du palais mou. Ensuite, tout en chantant, contractez les muscles du cou et de l'abdomen, comme lorsque vous soulevez un objet très lourd. Donnez un timbre nasal à votre chant et, enfin, prononcez alternativement les voyelles *i* et *u* (ou *o* et *a*) liées : vous obtenez ainsi le bourdon et les harmoniques. Modifiez la position des lèvres ou de la langue pour moduler la mélodie des harmoniques. Une forte concentration musculaire augmente la clarté des harmoniques.

désincarné. Où résonne-t-elle? Dans le conduit vocal du chanteur? Dans l'espace physique environnant? Dans l'esprit de l'auditeur?

Rétroaction biologique

Le mécanisme du renforcement des harmoniques n'est pas totalement compris, mais il semble nécessiter au moins trois composantes corrélées : l'ajustement d'une harmonique au centre d'un formant prononcé ; l'allongement de la phase de fermeture du cycle ouverture-fermeture des cordes vocales ; la réduction de

l'intervalle des harmoniques affectées par le formant. Ces trois phénomènes intensifient le couplage entre la source et le filtre. N'importe qui peut les maîtriser et apprendre le chant de gorge (*voir l'encadré de la page 53*) : les populations turco-mongoles n'ont pas une physiologie qui leur donnerait l'apanage de ce chant.

Afin d'ajuster une des harmoniques avec un formant, le chanteur règle la fréquence fondamentale du bourdonnement produit par ses cordes vocales. Ce procédé est l'équivalent sonore du décalage d'une échelle afin d'amener l'un des barreaux au niveau

d'un repère fixe. Par l'analyse acoustique, on a étudié la précision de l'ajustement nécessaire : l'intensité d'une première harmonique précisément superposée au milieu du pic d'un formant est bien supérieure à celle d'une seconde harmonique légèrement décalée. Les chanteurs ajustent cette superposition en élevant ou en baissant le son fondamental jusqu'à ce qu'ils entendent résonner l'harmonique recherchée à une amplitude maximale.

Les chanteurs de gorge cherchent également à maîtriser la vibration des cordes vocales. Chaque cycle des

Chant diphonique, triphonique et... tétrapophonique

Depuis 30 ans, les musicologues occidentaux découvrent les effets des renforcements d'harmoniques à travers les prières des lamas tibétains, les chants diphoniques des Bachkirs, des Mongols et des Touvas, ainsi qu'avec la quintina sarde, où une cinquième voix «mystérieuse» surgit de la fusion des voix d'un quatuor de chanteurs.

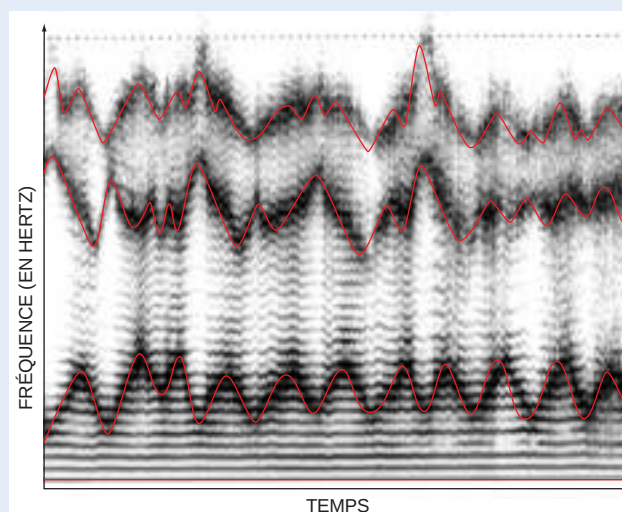
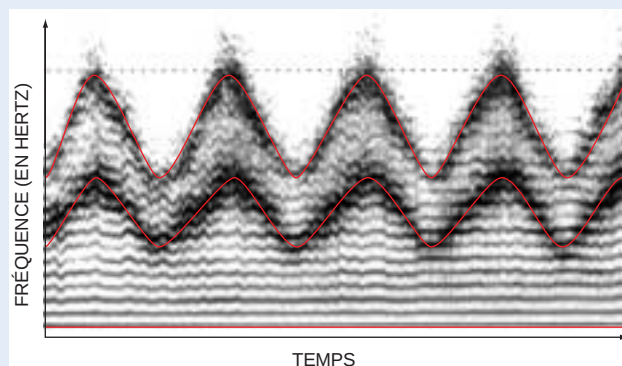
Le chant diphonique, que j'ai découvert en 1969 grâce aux enregistrements de Roberte Hamayon, de l'Université de Nanterre, superpose deux sons : un son fondamental, ou bourdon, qui conserve la même hauteur le temps d'une expiration, et une harmonique naturelle du son fondamental qui est amplifiée jusqu'à devenir audible. Cette harmonique a un timbre proche de celui d'une flûte (voix flûtée) ou de celui d'une guimbarde (voix guimbarde). Un chanteur seul chante ainsi simultanément à deux voix. Peut-on faire mieux en superposant trois ou même quatre voix?

Le chant diphonique nécessite plusieurs cavités, dont le couplage est à l'origine des fréquences aiguës de résonance des formants, qui sélectionnent et amplifient l'harmonique. Par exemple, avec la langue au repos – la bouche forme alors une seule grande cavité –, la deuxième voix ne dépasse guère 1 200 hertz. L'ambitus de la mélodie harmonique, c'est-à-dire que l'écart entre la note la plus grave et la note la plus aiguë, reste faible. L'étude des sonogrammes montre que l'intensité du formant s'étale sur trois ou quatre harmoniques. En revanche, lorsque la langue touche le palais, séparant ainsi la cavité buccale en deux parties, le formant est aigu et intense : l'harmonique supplémentaire est nettement audible.

Grâce aux sonogrammes, j'ai constaté qu'une troisième voix pouvait être produite (*voir la figure*). Cependant, cette troisième voix n'est pas commandée consciemment. Elle dépend de l'exécutant plutôt que d'une technique particulière. Le chant triphonique est possible lorsqu'un son très grave (par exemple, à une fréquence de 70 hertz) est émis : le chanteur peut alors créer deux formants qui sélectionneront chacun une harmonique. Par exemple, je peux chanter en mode triphonique avec un formant dans la zone de fréquence comprise entre 400 et 1 000 hertz, et un autre dans la zone au-dessus de 2 000 hertz. Par ailleurs,

j'étudie également le chant tétrapophonique : les quatre voix ne sont pas toutes audibles, mais elles sont reconnaissables sur le sonogramme.

Trần Quang HAI,
Laboratoire d'ethnomusicologie, CNRS, Paris



Dans ces deux sonogrammes de la voix de Trần Quang Hai, un son fondamental à 70 hertz constitue le bourdon (*les lignes horizontales en rouge*), tandis que des formants amplifient deux ou trois harmoniques (*les lignes sinusoïdales rouges*) selon que le chant est triphonique (*en haut*) ou tétrapophonique (*en bas*). Dans ce dernier cas, certaines harmoniques ne sont pas audibles.

cordes vocales commence lorsqu'elles sont resserrées. L'air comprimé par les poumons presse sur les cordes vocales, qui cèdent en s'écartant. Puis des forces élastiques et aérodynamiques referment les cordes tout en envoyant une bouffée d'air dans le conduit vocal. Des électroglottographes, qui utilisent des capteurs placés sur le cou pour analyser ce cycle, montrent que, lors du chant de gorge, les cordes vocales sont ouvertes pendant une fraction de cycle plus courte que pour une parole normale ; elles sont fermées plus longtemps. L'intensité des harmoniques aiguës est plus forte lorsque les muscles de la gorge sont contractés et rigides, c'est-à-dire qu'ils provoquent une fermeture brusque des cordes vocales. En outre, une fermeture plus longue prolonge la résonance dans le conduit vocal en réduisant le retour des ondes sonores vers les poumons. Ces deux effets réduisent l'affaiblissement de l'intensité aux fréquences élevées : l'harmonique recherchée est plus accentuée.

Enfin, l'isolement d'une harmonique ne serait pas aussi efficace sans les techniques que les chanteurs utilisent pour augmenter l'amplification et la sélectivité du conduit vocal. En affinant les propriétés de résonance normalement utilisées pour la prononciation des voyelles, les chanteurs décalent le pic des formants et augmentent sa sélectivité (voir l'encadré de la page 56). Ils renforcent ainsi les harmoniques alignées sur le pic étroit du formant, en affaiblissant simultanément les harmoniques situées en dehors de ce pic (voir la figure 4) ; une seule harmonique est alors amplifiée. De plus, en déplaçant leur mâchoire vers l'avant, tout en avançant, en amincissant et en arrondissant leurs lèvres, les chanteurs renforcent leurs cordes vocales, minimisent les pertes d'énergie (la bouche est presque fermée) et renvoient alors les résonances vers la vibration des cordes vocales : le pic de résonance du formant est encore augmenté.

Des études en vidéofluoroscopie (radiocinématographie) et en nasendoscopie (une caméra miniature filme les cordes vocales) ont confirmé que les chanteurs modifient leur conduit vocal pour décaler la fréquence d'un formant et l'aligner avec une harmonique. En renforçant successivement différentes harmoniques, ils

produisent une mélodie. Les neuf musiciens de l'étude décalaient la fréquence de résonance du formant de quatre façons au moins. D'autres méthodes existent peut-être.

Dans la première, la pointe de la langue est placée derrière les dents du haut, pendant que la langue se bombe pour sélectionner successivement des harmoniques plus élevées. De plus, les chanteurs accordent avec précision le formant en entrouvrant périodiquement les lèvres. En République de Touva, le style de musique produit avec cette méthode est nommé *sygyt* (sifflement).

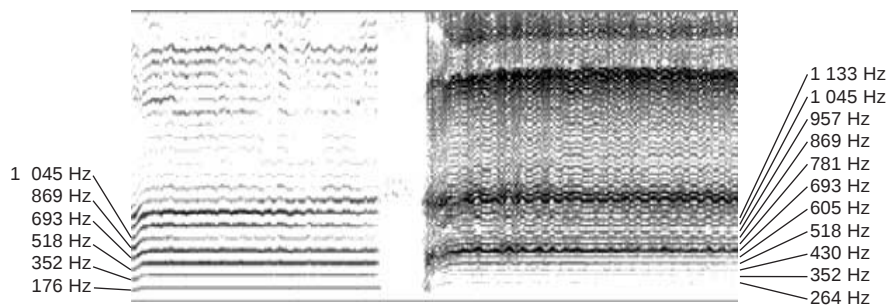
La deuxième méthode est celle du style *khöömei*. Les chanteurs avancent la langue (ce qui, dans la parole normale, change la voyelle «o» en «i») : le formant le plus bas baisse, tandis que le deuxième s'élève. En commandant avec précision la différence entre les deux formants, un musicien touva peut ajuster chacun d'eux à une harmonique différente, qui est alors amplifiée. Autrement dit, cette technique produit deux sons simultanés.

La troisième méthode requiert un mouvement de la gorge plutôt que de la bouche. Pour les harmoniques graves, les chanteurs placent la base de la langue vers le fond de la gorge, tandis que, pour les harmoniques moyennes et aiguës, ils déplacent la base de la langue vers l'avant jusqu'à créer un espace, nommé fossette, entre la base de la langue et l'épiglotte (la languette cartilagineuse qui empêche les aliments d'entrer dans les poumons). Pour les harmoniques aiguës, l'épiglotte avance pour fermer la fossette.

Dans la quatrième méthode, les chanteurs élargissent graduellement la bouche. Ainsi, ils raccourcissent le conduit vocal et élèvent la fréquence du premier formant. L'harmonique la plus aiguë qui puisse être renforcée est principalement limitée par des pertes de rayonnement, qui augmentent à mesure que la bouche s'élargit. Selon la hauteur du son fondamental, un chanteur peut isoler jusqu'à la douzième harmonique. Pour créer le style *kargyraa*, caractérisé



5. **ARTY-SAYIR** (en touva, «la rive opposée du lit d'une rivière asséchée») est une mélodie interprétée par le chanteur Vasili Chazir. Les nombres désignent les harmoniques au-dessus du fondamental : un *do* grave soutenu. La mélodie est environ un demi-ton plus basse.



6. **UN CHANTEUR DISPOSE DE DEUX FOIS PLUS DE TONS** lorsqu'il passe d'un chant normal (à gauche) au chant de gorge de style *kargyraa* (à droite). Les cordes vocales produisent un *fa* fondamental, à environ 176 hertz, tandis que les fausses cordes vocales du chanteur émettent un *fa* grave à l'octave inférieure, c'est-à-dire 88 hertz.

Lisa Burnett, d'après Theodore C. Levin

Bryan Christie, d'après Michael E. Edgerton

Les formants

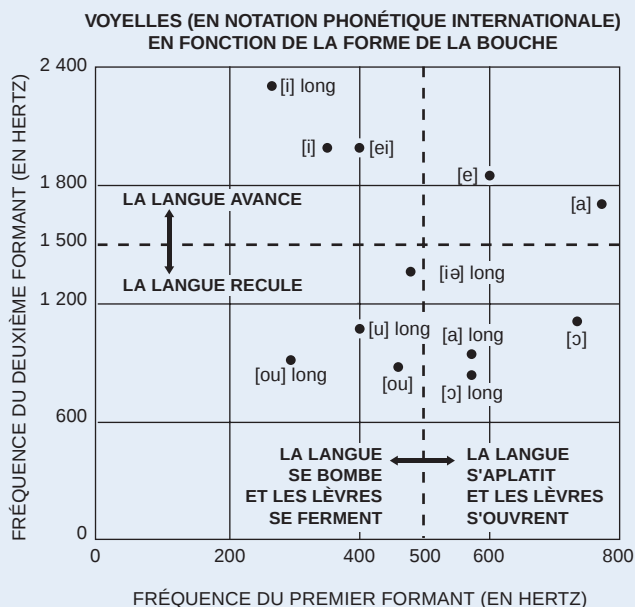
Bien que les cordes vocales produisent de nombreux sons, c'est le conduit vocal qui transforme les sons bruts en langage et en musique. Le conduit modifie le son des cordes vocales en sélectionnant parmi les composantes celles qui correspondent aux fréquences de résonance naturelle de l'air dans le conduit vocal. Lors d'une parole ou d'un chant, les déplacements de la langue ou des lèvres augmentent ou diminuent les fréquences de résonance, nommées fréquences des formants.

On perçoit bien ces mouvements quand on enchaîne les voyelles au cours d'une même expiration. La fréquence du premier formant est inversement

proportionnelle à la hauteur de la langue (il diminue lorsque la langue s'élève, par exemple lorsqu'on passe du son *a* de *tard* au son *i*). La fréquence du second formant est proportionnelle à l'avancement de la langue (elle augmente lorsque la langue avance, par exemple quand on passe du son *o* au son *i*). Le conduit vocal a un nombre théorique infini de formants, mais les combinaisons des deux ou trois premiers suffisent à expliquer la majeure partie des différences entre les sons des voyelles (voir la figure ci-dessus).

Comment les fréquences des formants sont-elles modifiées ? Imaginons que le conduit vocal soit un tube fermé à une extrémité (les cordes vocales) et ouvert à l'autre (les lèvres). À une section de tube constante, les fréquences de résonance sont uniquement déterminées par la longueur du tube. Par exemple, pour un tube de 17,5 centimètres de long (soit environ l'équivalent du conduit vocal d'un homme adulte), le pic du premier formant est à une fréquence de 500 hertz, celui du deuxième à 1 500 hertz, celui du troisième à 2 500 hertz, etc.

Chaque formant correspond à l'établissement d'une onde stationnaire à l'intérieur du tube : à chaque niveau du tube, les molécules de l'air oscillent de haut en bas sur une distance qui dépend de leur position. La pression varie dans l'espace de façon périodique : elle est constante en certains endroits, nommés nœuds de pression, où les molécules parcourent la plus grande distance pour maintenir cette pression constante. Les endroits où la pression subit ses plus



grandes fluctuations et où les molécules sont le plus immobiles, sont nommés antinœuds de pression (on peut négliger les mouvements aléatoires des molécules, car ils ne participent pas à l'établissement de l'onde stationnaire). L'extrémité inférieure du conduit, fermée, empêche les molécules de se déplacer, de sorte qu'elle constitue un antinœud, alors que l'extrémité ouverte sur l'extérieur est un nœud. Les formants se caractérisent par le nombre de nœuds et d'antinœuds de l'onde stationnaire (voir la figure en bas à droite).

Lorsque le tube est écrasé à un endroit, par exemple quand la langue se bombe, la fréquence change proportionnellement à

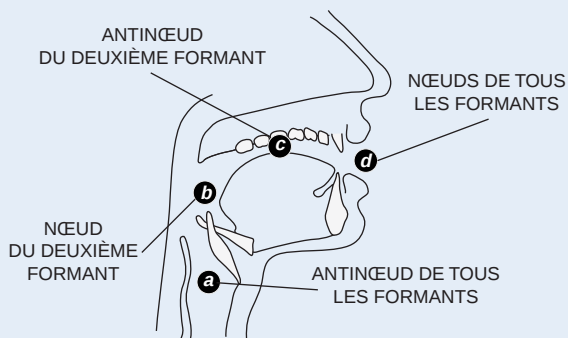
l'intensité de l'écrasement. Lord Rayleigh (1842-1919) a été le premier à expliquer ces mécanismes. Il montra notamment qu'un resserrement au niveau d'un nœud de pression réduit la fréquence du formant, tandis qu'un rétrécissement à l'endroit d'un antinœud de pression l'augmente (un élargissement produit les effets opposés).

Dans le premier cas, celui d'un resserrement à un nœud, les molécules traversent une ouverture réduite : quand la différence de pression qui les propulse reste identique, l'air est plus lent ; l'onde ralentit, donc sa fréquence diminue.

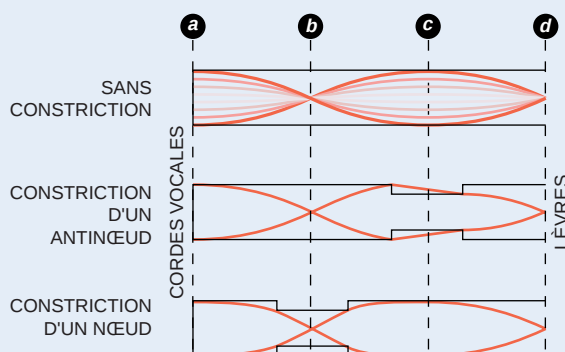
Dans le second cas, les molécules ne se déplacent pas, mais leur densité varie selon que les variations de pression attirent ou repoussent les molécules environnantes vers l'antinœud. L'écrasement réduit le volume du tube près de l'antinœud, l'addition d'un nombre donné de molécules produit donc une augmentation plus importante de la densité et de la pression : le système, devenu plus rigide, réagit plus rapidement ; la fréquence de l'onde augmente. La théorie des perturbations rend compte de la nouvelle forme de l'onde stationnaire (voir la figure en bas à droite).

Les chanteurs de gorge appliquent fréquemment ces principes : lorsqu'ils appuient la base de la langue contre le fond de la gorge, à l'endroit d'un nœud du deuxième formant, ils diminuent la fréquence de ce formant (voir la figure en bas à gauche). Dans le style *sygyt*, ils bombent la langue, rétrécissant ainsi l'antinœud du deuxième formant, dont la fréquence augmente alors.

POSITION DES NŒUDS ET DES ANTINŒUDS
DANS LE CONDUIT VOCAL



MOTIFS DES ONDES STATIONNAIRES
DU DEUXIÈME FORMANT





Theodore C. Levin

7. CES CHAMANS TOUVAS utilisent de nombreux objets sonores pour le traitement des âmes. L'animisme a façonné la musique touva et a contribué à perpétuer la coutume du chant de gorge.

par le renforcement d'harmoniques très élevées, les Touvas combinent cette technique avec une seconde source vocale.

À deux voix

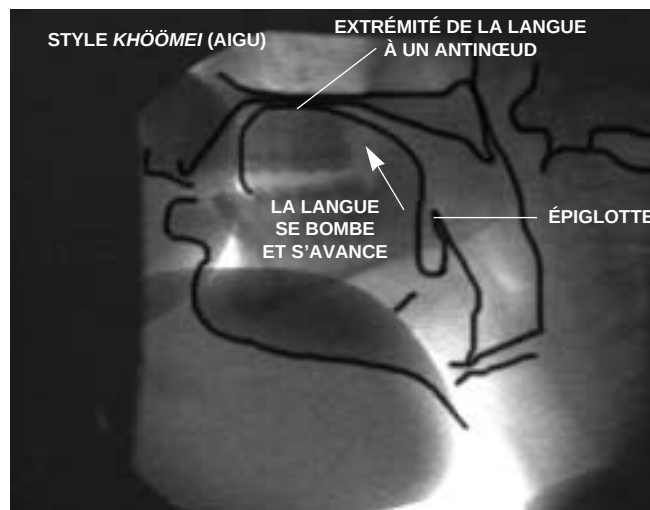
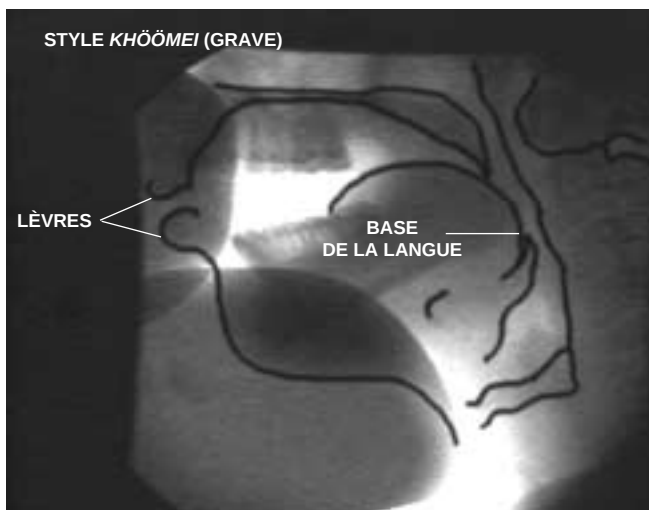
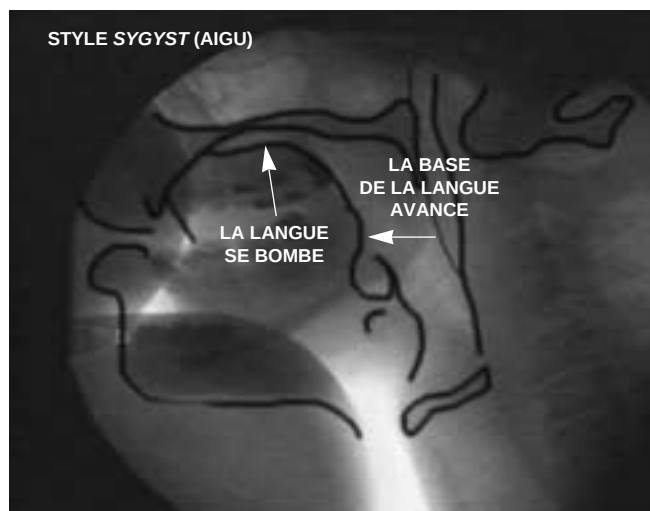
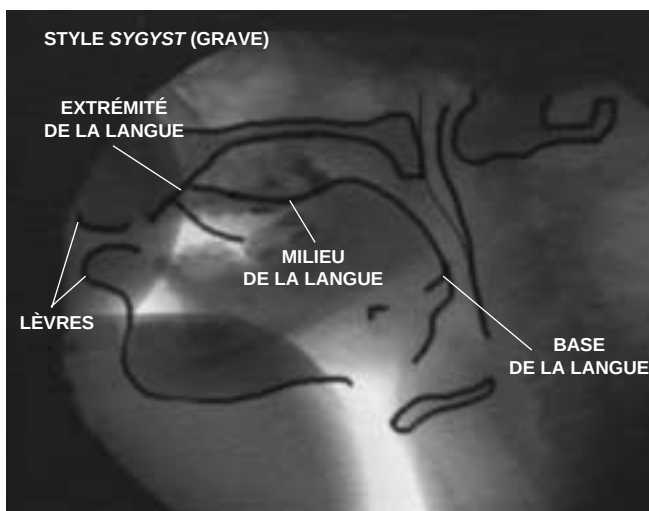
Plusieurs organes du conduit vocal peuvent être cette seconde source vocale qui émet un deuxième son brut. Le style *kargyraa* utilise la paire de tissus flexibles, nommés fausses cordes vocales, situés au-dessus des cordes vocales, capables eux aussi de fermer le passage au flux d'air. Sont également sollicités les cartilages aryténoïdes situés à l'arrière de la gorge et dont les mouvements contrôlent la phonation, les cordes aryépiglottiques, qui relient les cartilages aryténoïdes à l'épiglotte, et la base de l'épiglotte (voir la figure 2).

En raison de sa ressemblance avec le son des chants des moines tibétains, des ethnomusicologues nomment musique modale le style *kargyraa*. Il associe souvent à la fréquence du son fondamental une fréquence deux fois inférieure, car les fausses cordes vocales se ferment une fois toutes les deux fermetures des cordes vocales. Par exemple, un *do* fondamental produit par les cordes vocales à une fréquence de 130,8 hertz est associé au *do* à 65,4 hertz émis par les vibrations des fausses cordes vocales (voir la figure 6). L'analyse des spectres sonores confirme cette description : lorsqu'un chanteur passe en musique modale, le nombre de composantes

sonores double : la seconde source est périodique, à une fréquence deux fois inférieure à celle du son normal. La musique modale modifie également les propriétés de résonance du conduit vocal : comme l'utilisation des fausses cordes vocales raccourcit le conduit vocal de un centimètre, les fréquences des formants sont décalées vers le haut ou vers le bas selon l'endroit où se situe la constriction du formant choisi.

L'intérêt des Touvas pour le chant de gorge est déterminé par le monde sonore qu'il exprime. La musique reflète les préférences culturelles, individuelles et sociales, ainsi que les capacités physiques. Par exemple, entre les sixième et douzième harmoniques des sept notes de la gamme – le segment du spectre du répertoire des chanteurs touvas et mongols – les interprètes évitent scrupuleusement les septième et onzième harmoniques, car la syntaxe musicale locale privilégie les mélodies pentatoniques (à cinq tons).

De plus, les Touvas apprécient les pauses prolongées entre les respirations ; ces arrêts, qui durent parfois jusqu'à 30 secondes, paraissent trop longues à l'auditeur occidental, qui y voit des interruptions de la mélodie. Pour les musiciens touvas, en revanche, les phrases ne forment pas un morceau de musique continu, mais chacune d'entre elles est une image sonore indépendante. Pendant les pauses, le chanteur écoute les sons ambiants pour ensuite formuler une réponse... et il reprend son souffle.



8. LA RADIOGRAPHIE AUX RAYONS X montre le mécanisme du chant de gorge. Dans le style *sygyt* (*en haut*), les chanteurs gardent la pointe de la langue plaquée contre les dents du haut. En bombant la langue et en avançant la base de la langue, ils passent des harmoniques graves

(*en haut, à gauche*) aux harmoniques aiguës (*en haut, à droite*). Dans le style *khöömei* (*en bas*), le ton monte lorsque la langue entière se déplace de la position basse et arrière (*en bas, à gauche*) vers la position haute et avant (*en bas, à droite*).

Les différents styles sont tous inspirés de l'idée esthétique centrale d'imitation des sons. Le chant de gorge n'est que l'un des moyens utilisés par les éleveurs-chasseurs pour interagir avec leur environnement acoustique naturel. Les Touvas emploient également des vocalisations variées pour imiter les cris des animaux sauvages et domestiques. Ils jouent d'instruments tels l'*ediski*, un roseau qui imite la femelle du chevreton porte-musc, le

khirlee, une mince pièce de bois que l'on tourne pour reproduire le bruit du vent, l'*amyrga*, un cor de chasse qui simule le brame du cerf, et le *chadagan*, une cithare que le vent fait résonner lorsque les bergers touvas la placent sur le toit de leur yourte. Les joueurs de *khomus*, une sorte de guimbarde, imitent également les sons humains, notamment la parole : les bons joueurs de *khomus* codent des textes qu'un auditeur expérimenté comprend.

C'est toutefois dans le chant de gorge que les Touvas reconnaissent l'aboutissement de l'imitation, l'élément vénéré d'un langage expressif qui commence là où s'arrête le langage parlé. Pour les bergers, il exprime les sentiments de jubilation et d'indépendance que les mots ne peuvent formuler. La paix intérieure s'épanouit au milieu des contraintes les plus strictes, qui sont ici les limites physiques des gammes d'harmoniques.

Theodore LEVIN est professeur d'ethnomusicologie au collège Dartmouth. Michael EDGERTON est compositeur.

Des extraits sonores et vidéo sont disponibles sur le site Internet : <http://www.sciam.com/1999/0999issue/0999levinissue.html>

Trân QUANG HAI et Hugo ZEMP, *Le*

chant des harmoniques, film produit par le CNRS et le musée de l'Homme, 1989.

Ingo R. TITZE, *Principles of Voice Production*, Prentice Hall, 1994.

Mark VAN TONGEREN, *A Tuvan Perspective on Throat Singing*, in *Oideion: The Performing Arts Worldwide*, vol. 2, pp. 293-312, sous la direction de Wim van Zanten et Marjolijn van Roon,

Centre of Non-Western Studies, University of Leiden, 1995.

Galsan TSCHINAG, *Ciel bleu, une enfance dans le Haut-Altaï*, Anne-Marie Métailié, 1996.

Theodore LEVIN, *The Hundred Thousand Fools of God: Musical Travels in Central Asia (and Queens, New York)*, Indiana University Press, 1997.

