

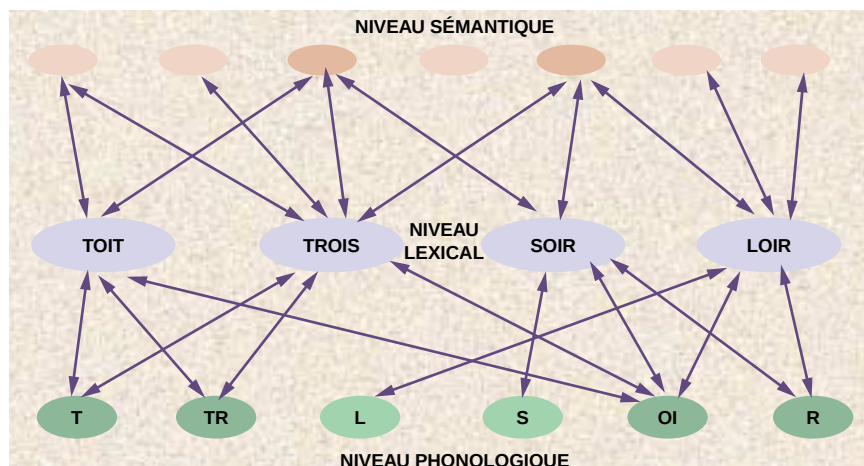
Les erreurs qualifiées de mixtes, telles que *Il y a des tueurs, euh ! des tireurs d'élite sur les toits. Il a montré une autre façade... facette de sa recherche* sont des substitutions entre deux mots phonologiquement, mais aussi sémantiquement parents. Enfin, l'effet lexical est le mécanisme par lequel le résultat d'une erreur phonologique tend à être un mot de la langue plutôt qu'un non-mot. Ainsi l'*opéra Bastille* devient l'*opéra Pastille* plutôt que l'*opéra Rastille*.

Dans la théorie interactive, les malapropismes et les erreurs mixtes naîtraient des mêmes mécanismes que ceux mis en jeu dans le lapsus *France Toir*. La probabilité d'une erreur mixte augmente quand le concurrent est un parent de la cible à la fois par le sens et par la forme. L'effet lexical s'expliquerait par la rétropropagation de l'information phonologique vers le niveau lexical qui agit comme un filtre favorisant les mots présents dans le dictionnaire : *Pastille* est ainsi préféré à *Rastille*.

Quel modèle doit-on privilégier : le sériel ou l'interactif ? En fait, nous pensons, avec W. Levelt, que plusieurs arguments valident le modèle sériel : la sélection d'un mot est trop rapide pour que le choix soit réalisé parmi tous les lemmes activés dans le modèle interactif ; de multiples rétroactions fragiliseraient le système et conduiraient à un nombre d'erreurs bien supérieur à celui qui est attesté dans une communication normale ; les catégories de lapsus qui semblent militer en faveur de la théorie interactive, tels les malapropismes et les erreurs mixtes, auraient en fait leur origine à l'extérieur des modules de production de la parole du modèle sériel, dans le «moniteur postlexical», une boucle de rétroaction interne qui contrôle la production du module phonologique (voir la figure 2).

Les boucles d'autocontrôle

Les modules d'élaboration de la parole représentent la «voie de production» ; l'autocontrôle exercé par le moniteur, dans le modèle sériel, emprunte la «voie de perception» ; c'est un mécanisme inconscient. La voie de perception est parallèle à la voie de production de la parole. Ainsi, reprenons l'exemple de l'*opéra Pastille*. La boucle interne, à la sortie du module phonologique, active le système de compréhension ; ce dernier donne accès soit aux dictionnaires des formes et des lemmes, soit au module conceptuel. Si, pour des



3. DANS LE MODÈLE INTERACTIF, les différents niveaux de production de la parole interagissent. On pourrait ainsi expliquer l'origine du lapsus *France Toir* à la place de *France Trois*. Les termes *France* et *Trois* activent tous les noyaux apparentés du niveau lexical (par exemple, *trois* active *trois, toit, soir, foire, loir*, etc.). Ces noyaux lexicaux activent à leur tour les noyaux phonologiques *t, tr, oi*, etc. Le lapsus *Toir* est alors possible. Toutefois, un tel mécanisme de production de la parole entraînerait un nombre d'interférences et, par conséquent, de lapsus bien supérieur à ce que l'on constate en réalité.

raisons diverses, par exemple parce que le temps disponible pour le contrôle est insuffisant, seul le dictionnaire des formes est activé : *Pastille* est validé puisque c'est un mot usuel. Pendant l'articulation du lapsus, la boucle externe de rétroaction auditive permet au locuteur de s'entendre (c'est cette auto-audition que l'on suractive dans les laboratoires de langues) et de contrôler ce qui est dit. Cette boucle externe est responsable de la correction, la plupart du temps consciente, des lapsus articulés qui ont échappé à la vigilance du moniteur.

Jusqu'ici, nous avons raisonné comme si les malapropismes, les erreurs mixtes et l'effet lexical étaient des erreurs de langage fréquentes. En fait, d'après notre corpus de 4 000 lapsus, si les malapropismes sont fréquents (27 pour cent environ), les deux autres types de lapsus sont bien moins fréquents (une analyse statistique montre qu'ils pourraient être dus au hasard). De plus, les malapropismes, substitutions de deux mots totalement étrangers par le sens, confirmeraient l'hypothèse sérielle, selon laquelle le module phonologique ne dispose pas de l'information sémantique. Ces trois catégories de lapsus sont de «fausses preuves» du modèle interactif.

Nous pensons que le modèle sériel rend compte de tous les aspects des lapsus et, par conséquent, de la production du langage. Le moniteur postlexical (la voie de la perception inconsciente de la parole) assure la rétroaction de contrôle qui devrait éviter les erreurs,

mais qui est, parfois, mise en défaut : les lapsus résultent d'«accidents» dus à un manque d'attention, à la fatigue, à la rapidité du débit, à la rareté de certaines catégories linguistiques remplacées par de plus fréquentes, à l'effet du contexte ou de la situation, au fonctionnement de la mémoire, à l'intrusion d'un distracteur pendant que nous parlons, etc.

Enfin, les mécanismes qui expliquent les lapsus du français sont également ceux qui ont été établis pour d'autres langues, quelle que soit leur structure linguistique. Les contraintes, propres à chaque langue et que les lapsus respectent, modifient certains aspects de ces lapsus, mais les mêmes mécanismes sont à l'œuvre partout, prouvant l'unicité fondamentale de la faculté de langage.

Mario ROSSI est professeur émérite à l'Université de Provence.

G.S. DELL, *A spreading-activation theory of retrieval in sentence production*, in *Psychological Review*, vol. 3, pp. 3-23, 1986.

M. ROSSI et E. PETER-DEFARE, *Les Lapsus*, éditions PUF, 1998.

W.J.M. LEVELT et al., *A theory of lexical access in speech production*, in *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 22, pp. 1-75, 1999.

J. SEGUI et L. FERRAND, *Leçons de parole*, éditions Odile Jacob, 2000.

Le corpus des lapsus recueilli par les auteurs est disponible sur le site :

<http://www.lpl.univ-aix.fr/lpl/personnel/rossi/mariorossi.htm>

Ces si délicats instruments de verre

JEAN-CLAUDE CHAPUIS

Les verres que l'on fait vibrer ont un son spécifique, «cristallin», qui a plu à de nombreux compositeurs. La faible puissance de ces instruments et leur fragilité les ont fait disparaître des orchestres, mais des innovations récentes mettent en valeur leurs qualités musicales.

Le son éthéré du verre fascine les mélomanes depuis des siècles et a suscité l'invention d'instruments de verre variés. Le plus simple est la cloche en verre, que l'on fait résonner par percussion. Plus élaboré, l'euphone émet des sons quand le doigt frotte une tige de verre horizontale, excitant des vibrations dans une tige métallique verticale, reliée à la tige de verre. Dans la grande famille des instruments de verre, l'harmonica de verre est sans doute le plus connu : il est composé d'un axe horizontal qui porte, emboîtées, des cloches de diverses tailles ; l'exécutant fait tourner l'ensemble, tandis que ses doigts mouillés, posés sur le bord des cloches, les font vibrer par frottement, comme on fait vibrer, à la fin des repas de famille où l'on s'ennuie un peu, un verre en frottant son bord.

Le son du verre semblait avoir des vertus psychologiques. Le compositeur et facteur allemand Karl Leopold Röllig, qui joua de l'harmonica de verre et composa pour lui, accordait à ses sons le pouvoir de ramener l'amitié entre des amis : «Il se jetait sur moi en pleurant et il me demandait d'arrêter ; ils s'embrassaient pleins d'amitié et de passion.» Il s'inquiète aussi de cette faculté : «Ce que peut devenir un harmonica dans les mains d'un superstitieux ou d'un truand, je ne peux l'imaginer.»

Les «musiciens de verre» espéraient élever l'âme de leurs auditeurs : «Je serais très heureux de pouvoir ajouter un peu à leurs joies secrètes et célestes», écrit le musicien allemand Johann Christian Müller en 1780.

Pourquoi le verre a-t-il un son si remarquable ? Et comment le son est-il produit ? À Londres, en 1761, quand Ann Ford publie une méthode et des œuvres pour des jeux de verres musicaux, elle s'étonne : «La seule musique dont vous entendez l'effet sans connaître la cause.» Nous ne perdrons pas en poésie ce que nous gagnerons en compréhension de l'acoustique des instruments de musique en verre et

nous verrons que cette analyse conduit à des modifications des instruments classiques et à l'introduction d'instruments nouveaux.

Cloches et verres percutés

Depuis au moins le XIII^e siècle en Chine et depuis le XV^e en Europe, des musiques sacrées et profanes sont exécutées sur des cloches de verre. Certains jeux de cloches étaient même organisés comme les carillons, avec des claviers qui commandaient des maillets percuteurs. On fabriquait ces instruments autour de la Bohême, qui fut l'un des principaux centres de verrerie d'art jusqu'à la fin du XVIII^e siècle.

Quand les verriers anglais inventèrent le cristal, en ajoutant de l'oxyde de plomb à un oxyde de silicium purifié, la transparence du nouveau matériau augmenta (l'oxyde de fer contenu dans le sable donne souvent une coloration brunâtre ou verdâtre). Le verre de Bohême perdit sa prééminence en verrerie générale, mais il resta utilisé en facture instrumentale : pour les verriers, ce type de verre est le «sonore», il émet un son moins riche, mais plus puissant que le cristal.

Longtemps, la percussion a été seule employée : lors de la percussion, on écarte une partie de l'objet de sa position d'équilibre. Si la déformation



1. BENJAMIN FRANKLIN jouant de son «harmonica» de verre.

reste dans les limites d'élasticité du matériau, le solide reprend sa forme d'équilibre, éventuellement après avoir oscillé à une fréquence déterminée par la forme et par les propriétés mécaniques du matériau. En vibrant, le matériau comprime périodiquement l'air environnant : la propagation de ces variations de pression de l'air correspond à l'émission de sons à la fréquence de vibration du solide

Ainsi, le choc sur la paroi de la cloche de verre déforme toute la cloche, qui se met en vibration selon plusieurs modes de flexion. Quand l'ouverture est circulaire, le mode de déformation le plus simple est une transformation du cercle en ellipse, qui s'écrase ensuite en une ellipse perpendiculaire à la première, et ainsi de suite. Ces principes sont bien connus des fondeurs de cloches métalliques d'église : pour favoriser certains modes de déformation, donc certaines fréquences, ils ajustent les épaisseurs (et donc les rigidités) sur différentes sections de la cloche, particulièrement au sommet et à la base. Les fréquences retenues font la personnalité des cloches.

L'énergie acoustique des ondes rayonnées est proportionnelle au carré de l'amplitude de vibration, à la masse volumique du matériau vibrant et au carré de la fréquence. Aussi les verres sont peu sonores : comme l'état vitreux est analogue à l'état liquide (le verre est un «liquide qui ne coule pas»), les verres ont des densités faibles (voisines de 2,2) ; en outre, l'amplitude de leurs vibrations est limitée. Sans des systèmes de résonance, tels ceux des balafons, les instruments de verre ne peuvent jouer *forte*.

En revanche, leur timbre fait leur personnalité. Ce timbre est déterminé par le type de vibrations qui mettent l'air en mouvement. Si le signal sonore était parfaitement sinusoïdal, une seule fréquence serait émise. Les solides vibrent rarement selon une seule fréquence, mais selon un mode de déformation compliqué. Cette déformation, nous le savons grâce aux travaux du mathématicien français Joseph Fourier (1768-1830), peut être décomposée en une somme d'ondes sinusoïdales à des fréquences multiples de la fréquence de base, dite fon-

damentale. Les ondes de fréquences supérieures sont les harmoniques.

Toutefois, cette décomposition n'est possible que pour des ondes strictement périodiques. Dans le cas de sons qui évoluent avec le temps – par exemple, ceux des instruments à percussion –, certaines fréquences ne sont pas des multiples exacts du son fondamental : on les nomme «partiels» non harmoniques.

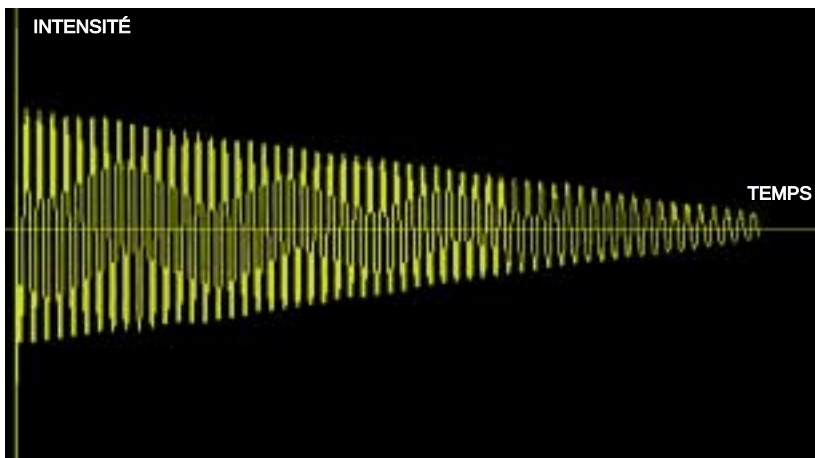
L'intensité des diverses fréquences qui composent le son total détermine le timbre de l'instrument, sa «couleur sonore». Ce timbre s'étudie à l'aide d'appareils qui enregistrent le spectre sonore, ou sonagramme. On observe alors que le son n'est pas de composition spectrale constante : en début d'excitation, des «transitoires» qui sont émis caractérisent l'«attaque» de l'instrument.

La prise en compte des transitoires est essentielle dans le cas des instruments de verre percutés, car ils sont associés à des phénomènes perceptibles. Par exemple, quand on heurte un barreau de verre, le choc engendre aussi bien des vibrations perpendiculaires à la longueur, comme celles d'une

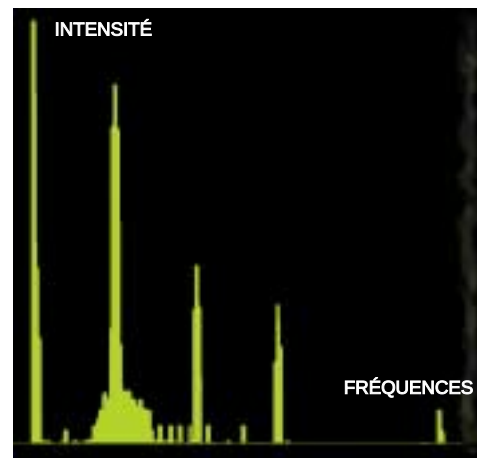


2. QUELQUES-UNS DES DIVERS INSTRUMENTS DE VERRE. Certains sonnent par percussion, telles les cloches de verre (1 et 2), les cymbales (3), le «gamelan» (4), le tympanon (5), le balafon (6)

et le vibrapone (7). Le séraphin (8) et l'harmonica de verre (9) sont frottés. Dans l'euphone (10), le frottement d'une tige de verre excite des tiges métalliques.



3. LE SON D'UN INSTRUMENT tel que l'harmonica de verre est un signal quasi périodique (à gauche) où l'on distingue à l'œil les basses fréquences. On analyse les timbres des instruments de



musique en examinant leur spectre, c'est-à-dire l'amplitude du son aux diverses fréquences (à droite). Ici le spectre d'une note d'harmonica de verre est surtout riche en premiers harmoniques.

corde de violon, que des vibrations perpendiculaires à la largeur du barreau ; comme le son d'une corde courte est plus aigu que le son d'une corde longue, les ondes sonores dues aux vibrations perpendiculaires à la largeur du barreau sont rapidement amorties, mais leurs fréquences sont bien supérieures. De ce fait, on entend un crissement initial avant d'entendre la vibration harmonieuse du barreau, qui résulte des vibrations perpendiculaires à sa longueur.

L'extinction du son, d'autre part, caractérise également le timbre des instruments de verre ; la note fondamentale s'installe immédiatement (clarté et douceur) et perdure, disparaissant lentement et régulièrement (impression de «halo», de «suspension»...). En outre, un sentiment d'«élévation» provient sans doute du nombre de fréquences émises sur un spectre large s'étendant vers les aigus. Ces fréquences ont des intensités qui diminuent régulièrement : la lecture des sonagrammes donne une sensation d'équilibre que confirme l'écoute.

Parfois, les sonagrammes montrent certains défauts : une mauvaise fusion du mélange verrier ou une forme «vrillée» de la cloche au soufflage créent des partiels non harmoniques. L'émission de ces derniers est courante dans les plaques percutees, et, parfois, les facteurs favorisent même leur émission afin d'enrichir le spectre. Le risque est que, s'ils n'ont pas été recouverts par la série harmonique, des battements pénibles pour l'oreille ne se fassent entendre.

Gênés par la fragilité des cloches de verre percutees, les musiciens et les fac-

teurs d'instruments cherchèrent des modifications qui pallieraient les mal-adresses des exécutants. La succession notariale des biens d'un prince d'Autriche signale ainsi l'existence d'un jeu de cloches percutees par des maillets qui étaient mis en mouvement par un clavier, une sorte de célesta à cloches.

L'évolution vers l'harmonica

Plus tard apparurent le cristallophone, qui est un vibrapone à lames de verre, et le glacechord, un piano à «cordes de verre» (ces «cordes» sont en fait des lames ou des barres) qui fut inventé

par le Français M. Beyer vers 1780. Dans le glacechord, un clavier actionne des marteaux qui frappent des lames de verre. L'impératrice Joséphine en eut un dans son salon de musique. Hector Berlioz, qui le nommait l'«harmonica à clavier», écrivit pour l'instrument sa première version de *La tempête*. Camille Saint Saëns lui donna une partie très caractéristique dans *L'aquarium*.

Dans ces deux instruments, le spectre sonore est complexe, car la lame oscille dans les trois dimensions (y compris en torsion). Elle est frappée par-dessus dans le vibrapone, et par-dessous dans le glacechord. La masse volumique et l'élasticité du verre en définissent les propriétés mécaniques et, donc, acoustiques ; on accorde les deux instruments en ajustant la longueur, l'épaisseur ou le diamètre des lames ou des barres.

Une autre voie est explorée à partir du XVI^e siècle : la mise en résonance des verres par frottement. Si Galilée cite les verres (des verres à boire) mis en vibration par frottement, c'est à titre d'expérience de physique et non à titre musical. Toutefois, en 1673, le père jésuite Athanasius Kircher (qui s'intéressa aux aimants, aux éclipses, à la lanterne magique qu'il semble avoir inventée, aux volcans...) évoque les verre musicaux dans un de ses ouvrages. Puis, en 1747, l'Irlandais Richard Puckridge installe à des fins musicales un jeu de verres qu'il accorde en les remplissant plus ou moins et avec lesquels il interprète des œuvres en frottant les bords avec les doigts mouillés. Il nomme son instrument «orgue angélique» ; aujourd'hui on le nomme aussi séraphin ou vérillon.



Musée national des techniques, CNAM

4. UN CYMBALUM DE VERRE du Conservatoire national des arts et métiers, à Paris.

Une cloche de verre frottée se déforme de la même façon qu'une cloche percutée, mais la mise en mouvement est différente : le principe d'entretien des vibrations sur un verre que l'on fait chanter est comparable à celui de l'archet sur la corde du violon ; c'est celui du coller-glisser (*stick-slip*). Le violoniste enduit les crins de l'archet de colophane (une résine) avant de jouer ; le joueur d'harmonica de verre, lui, mouille ses doigts. Lorsque l'archet entre en contact avec la corde, l'adhérence (*stick*) fait qu'il entraîne celle-ci, jusqu'au moment où la force d'adhérence devient inférieure à la force qui rappelle la corde en arrière : la corde glisse (*slip*). L'archet ou le doigt continuant leur mouvement, ils accrochent de nouveau la corde, qui est de nouveau entraînée, et ainsi de suite.

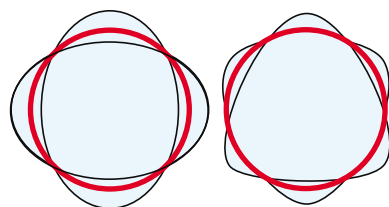
La friction du bord supérieur d'une coupe excite la fréquence propre la plus basse de la coupe (le fondamental). Comme pour la cloche, diverses fréquences sont émises lors de l'attaque, mais l'entretien de la vibration rend le fondamental prééminent. Une impression musicale de «pureté» et de «richesse» se dégage. Cette richesse peut être un souci pour l'instrumentiste : alors qu'il attaque une note, un manque d'eau ou bien une pression ou une vitesse d'entraînement inappropriées font parfois sonner plus fortement l'une des fréquences harmoniques. Cet effet, que l'exécutant cherche évidemment à éviter, n'est jamais bien grave, car les harmoniques restent dans des rapports harmonieux. La richesse en fréquences permet de rendre plaisants des rapports de notes qui seraient désagréables sur d'autres instruments, l'oreille pouvant rechercher, au sein des spectres de deux notes très rapprochées, les rapports qui apaisent les tensions internes de l'accord. Ce principe de mise en vibration engendre des timbres qui enthousiasment les auditeurs. La tessiture va du *sol* à 97,99 hertz au *do* à 1 046,5 hertz, soit quatre octaves et une tierce (de la note basse du baryton à la note aiguë de la soprano, elle est comparable à celle d'un violon alto qui émettrait davantage vers les graves).

Les musiciens ont créé pour le séraphin des méthodes et des œuvres. Gluck (1714-1787), par exemple, en sera un bon interprète. Le répertoire exécuté est constitué d'œuvres originales, d'adaptations de musique religieuse et d'airs à la mode. Cette tradition de musique religieuse sur séraphin se

maintiendra dans les pays anglosaxons durant tout le XIX^e siècle.

Toutefois, si les timbres enchantent, les difficultés d'interprétation et les limites techniques restreignent le jeu. Ainsi, on fait difficilement tourner le doigt à vitesse régulière sur les verres immobiles. De surcroît, au XVIII^e siècle, l'accordage résulte d'un remplissage partiel des verres : le liquide modifie les vibrations, parce qu'il augmente l'inertie du système, et vous pouvez vous convaincre que plus le verre est plein, plus la note émise est basse. Ce type d'accordage présente des inconvénients : comme le liquide s'évapore, l'exécutant doit réaccorder souvent l'instrument ; en outre, le jeu est limité en tessiture, car, quand on emplit le verre, il «sonne» moins (la surface d'oscillations est réduite) et le timbre s'appauvrit.

La fabrication de verres préalablement accordés et toujours vides évite cet inconvénient, mais le jeu reste difficile : avec le séraphin, on ne peut exécuter des accords que de six notes, et avec difficulté.



5. LES VERRES FROTTÉS des séraphins et des harmonicas, tout comme les cloches de verre, sonnent parce qu'ils se déforment périodiquement, après qu'on les a écartés de leur position d'équilibre. Plusieurs modes de vibration sont simultanés (en haut, on en a représentés deux : les verres oscillent entre les deux courbes noires). La photographie inférieure montre, à l'aide d'eau placée dans une coupe, comment cette dernière vibre quand on l'excite par «glisser-coller».

Benjamin Franklin perfectionne alors l'instrument. Rédacteur de la constitution des États-Unis, Franklin est aussi l'inventeur du paratonnerre, de cheminées, de verres à double foyer et de dispositifs d'éclairage, critique musical et compositeur ; il fréquente assidûment les concerts, ainsi que le salon de Mme Brillon de Jouy. Fasciné par le timbre du séraphin, il décide d'en rendre l'emploi plus musical en résolvant un à un les problèmes que celui-ci pose à l'interprète et au compositeur.

Franklin, inventeur de l'«armonica»

Tout d'abord, il accorde des cloches (ainsi, il n'y a plus à réaccorder l'instrument en cours de jeu par la hauteur d'eau), qu'il assemble les unes dans les autres, de sorte que l'on puisse exécuter des accords de dix notes. Il installe cette succession de cloches sur un axe que fait tourner l'instrumentiste, tandis qu'il pose les doigts mouillés sur les cloches qui se mettent en vibration par friction. Franklin décide de nommer cet instrument «armonica», en hommage à la musique italienne et à la musicalité de la langue italienne.

L'harmonica peut être réalisé différemment de celui de Franklin, et avec des matériaux variés : des instruments chinois nommés timbres sont aussi demi-sphériques, mais en laiton, et des bols tibétains fonctionnent sur le même mode de mise en vibration grâce à une batte en bois frottée sur le pourtour supérieur. Le président américain Thomas Jefferson, au XVIII^e siècle, fabriquait un «bellarmonie» selon le même principe que l'harmonica, mais avec des cloches en métal ; elles peuvent également être de porcelaine (le timbre serait différent).

Comment créer les diverses notes ? Dans le cas du violon, l'accordage s'effectue par une modification de la longueur ou de la tension de la corde. Dans l'harmonica, c'est le constructeur qui accorde, en changeant la taille des cloches ou leur rigidité. La fréquence propre augmentant avec la rigidité de la structure, on rend les sons émis plus aigus quand on épaissit les parois ou quand on réduit le diamètre ; inversement, on obtient des sons plus graves en amincissant les parois ou en augmentant le diamètre des cloches.

Les cloches de verre de l'harmonica sont mises en vibration par glisser-coller, comme les verres musicaux, mais, en raison du frottement sur le côté et non sur le bord supérieur, ou «buvant», la mise en vibration se fait plus lentement : dans le séraphin, l'attaque de la cloche de verre sur le buvant est plus efficace, car il est plus facile de déformer un bord libre. L'allegretto, que l'on obtient sans difficulté avec le séraphin, est inaccessible à l'harmonica (à qualité de verre équivalente, car certains verres «accrochent» mieux que d'autres).

En revanche, dans l'harmonica comme dans le séraphin, les sons sont durables : même après le retrait des doigts, les verres mis en vibration continuent de sonner, et des effets de vibrato sont possibles ; un crescendo résulte naturellement de l'excitation entretenue, et un vibrato de hauteur est obtenu quand on fait descendre et monter le doigt le long de la paroi (ce que l'on ne peut pas faire avec le séraphin).

Au total, le timbre vapoureux, angélique de l'harmonica charma Mozart, Beethoven, Pleyel, et bien d'autres compositeurs, poètes et artistes, qui composèrent pour lui. Goethe disait que l'harmonica lui parlait le «langage du cœur du monde», et Paganini s'exclamait : «Ah! quelle voix! Cela est vraiment fait pour prier...» Les pièces sont souvent écrites pour «Pianoforte ou Glassa-harmonica», d'où, d'ailleurs, une difficulté à retrouver le répertoire original. Nombreuses sont les œuvres qui restent à découvrir.

L'harmonica dans le tumulte électronique

Avant l'avènement des moyens électroniques d'amplification, l'harmonica était peu sonore : le gain en possibilités de jeu dû à l'emboîtement des cloches réduit la puissance de jeu, parce que les ondes sonores émises par une cloche sont absorbées et déviées par les cloches voisines. Par exemple, pour enregistrer, on doit mettre le microphone sur le côté des cloches ; en bout d'axe, il capte très mal...

Aussi, malgré un son plus «moelleux», «somp tueux»,

l'harmonica disparut progressivement. Il était concurrencé par le piano, auquel on avait adapté une pédale de *forte*, rendant l'instrument plus puissant et plus expressif. De surcroît, à la fin du XVIII^e siècle, les habitudes d'écoute musicale avaient changé : les orchestres jouaient dans des salles plus grandes, et, dans les orchestres, les instruments à vent couvraient le chant de l'harmonica. Certes, son timbre plaisait aux âmes préromantiques, mais il s'adaptait mal à l'évolution des mœurs et des goûts. Fragile, coûteux, de fabrication complexe et difficile à jouer, il était accusé d'être néfaste à la santé mentale (le médecin allemand Franz Anton Mesmer l'employa dans ses séances d'hypnose et a été responsable de cette mauvaise réputation.)

Alors que l'harmonica déclinait, d'autres instruments employant le verre apparurent. Par exemple, dans les années 1780, l'acousticien allemand Ernst Chladni (1756-1827) inventa d'abord le clavicylindre, où les tiges de métal sont frottées par un rouleau de verre. Puis il mit au point l'euphone, où l'exécutant frotte une tige de verre horizontale, qui pointe vers lui ; cette tige communique sa vibration à une tige de métal accordée. C'est donc le timbre du métal que fait entendre cet instrument. Comme pour les jeux de

verres musicaux, le doigt adhère et glisse ; ce mouvement anime la tige de verre d'une oscillation longitudinale et de bas en haut.

Chladni trouva le principe de cet instrument alors qu'il étudiait les fréquences émises par une tige métallique. Il avait initialement installé le système sur des tampons en liège et sur une caisse en bois, de sorte que les pertes d'énergie acoustique étaient considérables ; le son qui en sortait était très faible. Dans les années 1960, les frères François et Bernard Baschet ont élargi les possibilités d'expression de l'instrument en installant le système sur une plaque de duralumin et en y ajoutant des cônes d'amplification. Le spectre ainsi obtenu est celui d'une note «pure» avec un fondamental très développé et bien défini, les cônes donnant des effets de réverbération que l'on utilise pour régler la puissance de jeu et enrichir le timbre.

L'universalité des instruments de verre

Tous les pays qui ont fabriqué du verre ont façonné des instruments dans ce matériau : en Inde du Sud, on pratique le jalatharang depuis des siècles ; les Polonais, les Belges, les Turcs ont fabriqué des trompettes har-

moniques en verre... Dans tous les cas, les verres utilisés étaient à base d'oxyde de silicium et d'autres éléments qui abaissaient la température de fusion : des carbonates de calcium, de potassium, des oxydes d'aluminium, pour les verres les plus courants, du carbonate de potassium seulement dans le sonore.

Pour examiner la grande variété des instruments de verre, reprenons la classification générale des instruments de musique selon leur mode de production du son, le mode d'exécution et la facture. Dans la vaste classe des instruments à percussion, on distingue les idiophones (frappés, pincés, frottés) et les membranophones (percussions à peau), les cordophones, les aérophones et les instruments électroniques. La plupart peuvent être construits avec du verre, mais ce matériau n'est



6. LE SÉRAPHIN est le premier instrument où fut utilisé le principe du glisser-coller. Pour accorder les verres, on devait initialement les emplir partiellement d'eau, mais l'évaporation de cette dernière faisait le jeu. On préfère aujourd'hui préaccorder les verres en amincissant leurs parois à la meule.

pas toujours intéressant : une trompette en verre n'a pas de qualité musicale particulière ; un violon de verre stimule l'imagination, mais, en termes d'amplification des mouvements vibratoires des cordes et de leur transmission par un chevalet, le gain est nul...

À la famille des idiophones appartiennent la majorité des instruments de verre. Ils produisent des sons par

leur propres vibrations sans le concours d'une colonne d'air, d'une membrane ou d'une corde. L'harmonica, le séraphin, les cloches, le cristalophone et le glacechord se servent du verre comme corps vibrant et comme corps résonateur.

Parmi les cordophones, la trompette marine fait usage du verre : une corde unique est tendue sur un chevalet

Le verre frotté et le bruit du ruban adhésif

Pourquoi le verre frotté vibre-t-il ? À cause du phénomène de glisser-coller, ou *stick-slip*. Ce principe d'émission sonore agit dans des situations variées : quand on joue du violon, quand on fait glisser le doigt sur une surface mouillée, quand on tire de son dévidoir un morceau de ruban adhésif ou quand on rompt un solide. Examinons d'abord ce dernier cas.

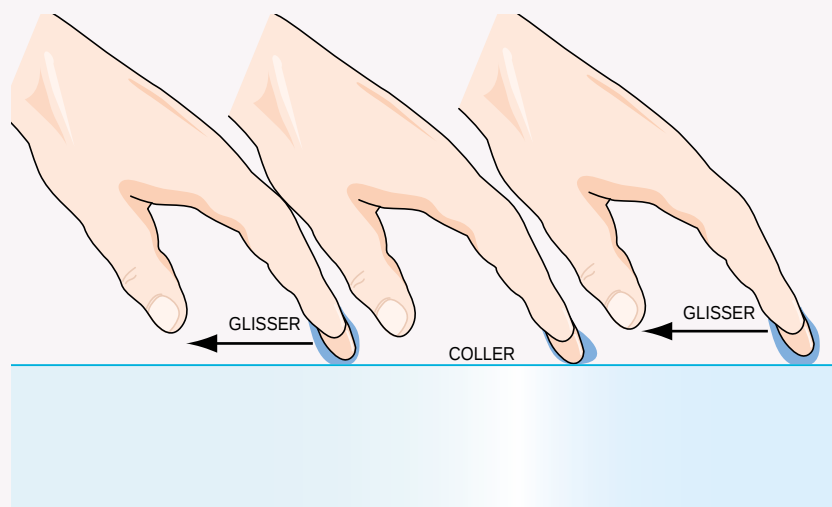
Rompre un solide, c'est créer une fissure à partir d'un défaut préexistant, et provoquer la propagation de cette fissure. Cette propagation consomme de l'énergie, car il faut briser les liaisons interatomiques. L'énergie est apportée sous la forme d'une contrainte qui déforme d'abord le matériau dans les limites de son élasticité. Quand les liaisons chimiques qui assurent la cohésion du matériau sont rompues, la fissure apparaît tandis que l'énergie des liaisons est brusquement libérée. La vitesse de propagation de la fissure dépend de la différence entre le taux de restitution de l'énergie et l'énergie superficielle, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons chimiques. Pour un matériau idéalement élastique, la fissure accélérerait jusqu'à atteindre la vitesse des ondes de Rayleigh (soit la vitesse du son). Toutefois, pour les matériaux réels, une partie de l'énergie

est perdue, notamment sous forme acoustique. De ce fait, la propagation de la fissure cesse momentanément, avant de reprendre quand la contrainte est redevenue suffisante.

On peut étudier le *stick-slip* à l'aide d'un dévidoir automatique de ruban adhésif, que l'on couple à un système qui mesure la force de tirage du ruban. Les expériences, bien interprétées par un modèle théorique, montrent que les oscillations sont sinusoïdales ou en dent de scie, selon l'inertie du système.

Dans le cas des verres frottés, le phénomène est du même type, mais compliqué par la présence du liquide. Quand le doigt est mouillé (l'eau entre par capillarité dans les interstices de la peau), l'eau facilite le glissement. Toutefois, le déplacement du doigt laisse de l'eau sur le verre, par le même phénomène que celui qui fait qu'un pinceau dépose de la peinture sur un mur (la vitesse d'un liquide est nulle au contact d'un solide). Après s'être déplacé sur une courte distance (glisser), le doigt est sec, de sorte qu'il ne glisse plus ; c'est la phase du coller. Puis l'eau environnant la zone sèche revient, par mouillage, humecter le doigt, et le glissement reprend.

Michel BARQUINS, E.S.P.C.I.





7. HARMONICA DE VERRE DU XVIII^e SIÈCLE ; l'axe qui porte les cloches de verre est entraîné par un pédalier. L'instrument a été modernisé : un moteur électrique entraîne maintenant les cloches, tandis qu'un brumisateur maintient les doigts humides.

mobile qui ne s'appuie que d'une jambe sur la caisse de résonance. Lors de la mise en vibration de la corde, cette jambe percute périodiquement une petite plaque de verre, engendrant un son sec. L'effet obtenu quand on ne joue que les notes harmoniques sur la corde est celui d'un cor ou d'une trompe de chasse. Cette plaque peut être également en métal ou en ivoire : le facteur d'instruments choisit le matériau selon le timbre qu'il souhaite donner à l'instrument.

Les aérophones dont la structure comporte du verre sont plus variés : des facteurs ont construit des orgues en verre (avec des tuyaux fermés, comme la flûte de Pan en verre), des flûtes traversières (tuyau ouvert), des trompes droites, des embouchures de clarinette et des saxophones de verre. Ces instruments (de construction difficile) sont superbes, et l'emploi de mélanges verriers pour leur réalisation se justifie par la très faible dilatabilité des verres d'oxydes. Les flûtes métalliques, par exemple, ont l'inconvénient de s'allonger ou de se raccourcir selon les variations de températures (de la pièce, de l'instrument chauffé par l'exécutant) : les facteurs doivent généralement construire le corps de ces instruments en plusieurs morceaux, que l'on enfonce plus ou moins les uns dans les autres. Ayant observé cette faible dilatation des verres, au début du XIX^e siècle,

le facteur français Claude Laurent eut l'idée de les employer pour construire ses belles flûtes de cristal ; aujourd'hui, d'autres verres peuvent être mis en œuvre à cette même fin. Cette faible dilatation a intéressé certains facteurs de flûte de Pan ou d'orgues. Ces derniers employèrent des bouteilles selon le principe des flûtes globulaires, faisant vibrer la colonne d'air interne à la cavité à partir du jet de l'air sur un rebord de bouteille. Les bouteilles étant de tailles différentes, on obtenait des notes différentes.

À la famille des idiophones appartiennent les harmonicas, séraphins, cloches déjà examinés, et aussi d'autres instruments, qui ont été inventés après la Renaissance. Par exemple, des cristallophones (vibraphones à lame de verre) furent perfectionnés. L'euphone, lui, se sert du verre comme corps excitateur. Au sein de ce groupe d'instruments, les verres musicaux et l'harmonica occupent une place à part : avec la scie musicale, ce sont les seuls instruments qui émettent par friction des sons de hauteurs différentes et déterminées. Le facteur de séraphin ou d'harmonica, qui n'est pas limité à l'utilisation de verres à boire, peut explorer des formes variées, qui facilitent le jeu, améliorent le timbre et augmentent la puissance sonore. Pour ces optimisations, il doit tenir compte de l'excitation particulière qui est mise en œuvre : les frottements du buvant,

dans le séraphin, ou de la zone plane qui jouxte le buvant pour l'harmonica, engendrent des sons différents. Ce qui est recherché ici, c'est un timbre « chaud et rond », et le son entretenu qui permet d'explorer de nouveaux horizons sonores par des notes maintenues.

D'autres améliorations sont possibles : par exemple, j'ai motorisé l'instrument (qui était naguère actionné par un système de pédalier) et l'ai équipé d'un brumisateur qui conserve l'exacte humidité des doigts de l'instrumentiste.

On comprend aujourd'hui les causes des vibrations inédites des instruments de verre, mais la compréhension des phénomènes physiques n'épuise pas la poésie qui se dégage des timbres, variés et rares, de cet instrumentarium. Le public contemporain ressent toujours la « nouveauté » et la richesse d'expression de ces instruments.

Jean-Claude CHAPIUS est musicien, compositeur et facteur d'instruments. Il a créé l'ensemble *TransparenceS*, où figurent des instruments décrits ici, à côté d'instruments plus connus.

Daniel MOUGIS et Michel BARQUINS, *Stick Slip and Peeling of Adhesive Tapes*, in *Adhesion*, vol. XII, pp. 205-222, K.W. Allen, Elsevier, Londres, 1988.

John PIERCE, *Le son musical*, Éditions Belin-Pour la Science.
