# Chapitre premier
# Éléments d'acoustique

L'instrument de musique est essentiellement un transformateur d'énergie : il transforme l'énergie fournie par le musicien en énergie sonore — c'est-à-dire en vibrations susceptibles d'être perçues par l'oreille humaine. Celle-ci à son tour transforme les vibrations en influx nerveux susceptibles d'être interprétés par le cerveau. L'instrument de musique comporte un générateur de fréquence, consistant en un oscillateur (l'élément vibrant, par exemple la corde d'un violon ou la membrane d'un tambour) couplé à un dispositif d'ajustement et de régulation de la fréquence (les doigts sur la touche du violon, le tube de la flûte, etc.) ; souvent, l'instrument comporte aussi un dispositif favorisant la diffusion de la vibration dans l'air (table de résonance, pavillon, etc.).

## 1 Vibrations

Ce qui permet aux objets ou à l'air de vibrer, c'est la combinaison de deux propriétés. La première est l'**élasticité**, c'est-à-dire la faculté de reprendre la position ou la forme initiale après avoir été déplacé ou déformé. La seconde est l'**inertie**, qui fait que l'objet ou la molécule d'air mis en mouvement a tendance à poursuivre son mouvement : revenu à son point de départ sous l'effet de l'élasticité, il le dépasse jusqu'à retrouver au-delà une position approximativement symétrique au déplacement initial. L'élasticité le fait alors revenir vers le point de repos, qui est à nouveau dépassé, etc. Ce mouvement d'aller-retour peut se comparer à celui d'un pendule ou d'un balancier d'horloge : lorsqu'il est écarté de son point de repos, le pendule tend à y revenir par son poids, qui constitue dans ce cas l'équivalent de la force d'élasticité ; mais son inertie fait qu'il dépasse le point de repos, de sorte qu'une force de rappel apparaît de l'autre côté. Le pendule oscille d'un côté à l'autre. Il en va de même d'une corde de violon, ou d'une membrane de tambour, ou encore d'une molécule d'air en vibration.

Le pendule, ou le point vibrant, atteint sa vitesse maximale au passage par la position de repos, alors qu'au contraire il est immobile pendant un instant au point de déplacement maximal. Au moment du déplacement maximal, le point vibrant est soumis à la force de rappel — la force élastique — la plus élevée, correspondant à une *énergie potentielle*. À mesure qu'il revient vers le point de repos, la vitesse augmente et la force de rappel diminue : l'énergie potentielle se transforme en *énergie cinétique*. Au point d'équilibre, l'énergie potentielle est nulle et l'énergie cinétique maximale. Ensuite, lorsqu'il a dépassé la position d'équilibre, le point déplacé ralentit et la force de rappel augmente. Il y a donc échange constant entre une énergie potentielle (résultant de la position de déséquilibre et de l'élasticité qui rend cette position instable) et une énergie cinétique (résultant de l'inertie du mobile, qui empêche un arrêt immédiat à la position de repos). Le principe de conservation de l'énergie fait qu'à tout moment la somme des énergies potentielle et cinétique reste constante — sinon que, dans les situations réelles, il y a nécessairement diffusion d'une partie de l'énergie, par exemple sous forme sonore. Il en résulte que, sans apport d'énergie supplémentaire, la vibration s'éteint progressivement.

Quelques définitions :

— ***amplitude*** : distance qui sépare les deux points extrêmes de l'oscillation (points extrêmes à gauche et à droite, par exemple, dans le cas du pendule).

— ***période*** : durée d'une vibration complète. Une vibration complète comporte un aller et un retour, de gauche à droite puis de droite à gauche par exemple ; le chemin complet parcouru par le pendule ou l'objet vibrant en une période est égal au double de l'amplitude.

— ***fréquence*** : nombre de vibrations par unité de temps. On mesure les fréquences sonores en nombre de vibrations par seconde ; cette unité s'appelle *hertz* (Hz). La fréquence est l'inverse de la période : si, par exemple, une période dure 1/100$^{e}$ de seconde, il y a 100 périodes, donc 100 vibrations, par seconde — la fréquence est de 100 Hz.

Certains matériaux sont élastiques par nature : c'est le cas de l'air, mais aussi de la plupart des matériaux solides. Dans le cas de l'air, le déplacement des molécules crée une surpression locale, mais les molécules tendent à revenir à leur position initiale par un effet d'équilibrage des pressions (voir le paragraphe 5 ci-après, Propagation du son dans l'air). Les matériaux solides subissent des déformations, par exemple sous l'effet d'une percussion, mais tendent ensuite à reprendre leur forme initiale. D'autres matériaux ne deviennent élastiques que sous la tension. C'est le cas en particulier des cordes et des membranes. On verra au chapitre 2 que ces propriétés constituent des éléments essentiels de la classification des instruments.

## 2 Sons complexes, sons partiels, sons harmoniques

Les caractéristiques du son sont déterminées par les propriétés de l'oreille, qui est sensible aux variations de la pression dans l'air. La hauteur perçue est liée à la fréquence de la vibration, à tel point que la mesure de la fréquence peut être prise comme mesure de la hauteur ; l'intensité du son est liée au niveau de pression, c'est-à-dire à l'amplitude des mouvements de l'air[1].

L'oreille agit comme un outil d'analyse : elle identifie la forme de la vibration par un processus de décomposition en sons constituants. La perception d'un son « pur », formé d'un constituant unique, correspond à des conditions idéales rarement réunies[2]. Plus souvent, le son sera perçu comme formé d'une superposition de sons purs. Dans des conditions normales, l'effet sur l'oreille est global : le son paraît unique, mais affecté d'un timbre caractéristique. Il est possible, par une attention soutenue ou par des procédés artificiels, de mettre en lumière les sons constituants, appelés « sons partiels »[3]. Les sons produits par les instruments de musique sont des sons complexes, formés de superpositions de sons partiels. La complexité du son détermine notamment ce qu'on appelle son ***timbre***. L'oreille y reconnaît, d'abord, le type d'instrument ; ensuite, l'instrument particulier — elle distingue le violon d'une guitare, puis tel violon de tel autre, éventuellement tel violoniste de tel autre.

[1] À strictement parler, la hauteur perçue n'est pas exactement en relation directe avec la fréquence, ni l'intensité perçue avec la pression d'air. On constate en effet que la hauteur perçue dépend partiellement de l'intensité, et réciproquement, et que d'autres facteurs encore entrent en ligne de compte. Mais cela ne sera pas considéré ici : les approximations selon lesquelles la hauteur dépend de la fréquence, l'intensité de l'amplitude, suffiront pour notre propos.

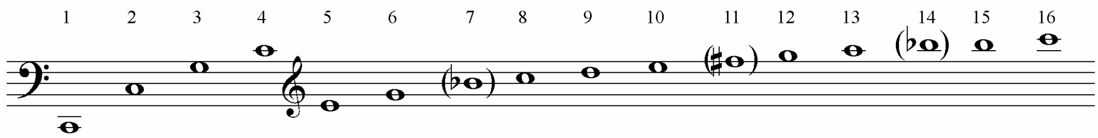
[2] Ce point ne sera pas considéré non plus dans le détail. Très brièvement, les conditions idéales seraient que la force de rappel (force élastique) soit à tout moment proportionnelle au déplacement du point auquel elle s'applique et que l'accélération du point soit elle-même directement proportionnelle à la force. La vibration, dans ce cas, est « sinusoïdale ». Ceci implique en outre notamment qu'il n'y ait aucune perte d'énergie dans le système — ce qui n'est jamais réalisé. Pour fixer les idées, on peut considérer le cas d'un haut-parleur, dont la membrane est mise en mouvement par un électro-aimant. Même si la vibration électrique agissant sur l'aimant et le champ magnétique qui en résulte correspondent aux conditions théoriques d'un son pur, c'est-à-dire d'une vibration sinusoïdale, les mouvements de la membrane seront moins réguliers parce que la partie mobile de son support (celle qui est attirée par l'aimant) subit des frictions et parce que le pourtour de la membrane a une certaine rigidité. On dit dans ce cas que la réponse de la membrane à l'excitation électrique n'est pas *linéaire*. Le son résultant est moins « pur » que la vibration électrique qui le provoque. Les « impuretés », perçues par l'oreille, constituent la couleur sonore (le timbre) propre au haut-parleur considéré. Le phénomène est semblable dans le cas des instruments de musique, qui possèdent chacun leur timbre propre parce qu'ils ne réagissent pas de manière linéaire aux vibrations.

La transmission des vibrations dans l'air est affectée par des phénomènes locaux du même ordre, qui déterminent le timbre propre de tel ou tel environnement acoustique (de telle salle par exemple). Enfin, l'oreille elle-même introduit des distorsions qui font que l'audition est probablement très individuelle : nous n'entendons sans doute pas *exactement* la même chose que notre voisin. Il en résulte que, même dans des conditions de laboratoire, le son « pur » n'est au mieux qu'un idéal.

[3] Le procédé classique pour mettre en lumière les sons partiels est l'utilisation de résonateurs. L'expérience peut se réaliser sur un piano : on soulève l'étouffoir de la corde correspondant au son partiel que l'on veut mettre en évidence, de telle sorte que cette corde devienne un résonateur ; on fait sonner ensuite une note plus grave, dont un partiel aigu fait résonner la corde. Il faut souligner (sans le justifier ici) que cette expérience est probante : la résonance n'existe que parce que le partiel aigu est effectivement contenu dans le son grave. On peut vérifier par exemple qu'un *do* grave (*do*1, sous la clef de *fa*) peut faire sonner la corde de *sol*3 (le *sol* de la clef de *sol*), mais pas le *fa*♯3 ou le *sol*♯3. Pour la notation des hauteurs (*do*1, *sol*3, etc.), voir l'Annexe 1.

Il faut considérer ici le cas particulier de sons dont la fréquence et l'intensité sont invariables dans le temps. Pour que de tels sons soient produits, il faut que les pertes d'énergie résultant de la diffusion sonore soient compensées par un apport constant d'énergie nouvelle — il faut, en d'autres termes, que les sons soient ***entretenus***. C'est le cas des instruments à vent, où le souffle continu du musicien constitue un apport constant d'énergie, mais aussi des instruments à archet, où la friction de l'archet sur la corde apporte de manière continue l'énergie nécessaire. Pour autant que l'apport d'énergie soit stable (c'est-à-dire, notamment, qu'il n'y ait pas de vibrato), les sons partiels constitutifs du son complexe sont entre eux dans des rapports particuliers, appelés rapports ***harmoniques***, qui ne sont autre que les rapports entre les nombres entiers successifs[4]. Ainsi, si la fréquence de vibration d'un son complexe stable est de 100 Hz (c'est approximativement le *sol*1), les sons partiels qui le constituent ont des fréquences de 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, etc. L'intensité de certains de ces partiels peut être nulle : les partiels, en d'autres termes, ne sont pas nécessairement tous présents, mais s'ils le sont, dans le cas d'un son stable, leur fréquence est nécessairement un multiple entier de la fréquence du son complexe.

Les propriétés de ces sons harmoniques sont remarquables ; elles ont joué un rôle particulièrement important dans notre musique parce qu'elles sont déterminantes pour le phénomène de consonance (voir ci-dessous, § 3) qui est à la base de la musique polyphonique. Les partiels harmoniques (ou « sons harmoniques ») forment une série remarquable qui est aussi celle des notes que l'on peut jouer sur un clairon ou une trompette naturelle, ou encore celle des sons harmoniques du violon ou du violoncelle[5]. Pour une note fondamentale *do*, cette série est la suivante :




(Les notes entre parenthèses ne peuvent être qu'approximativement transcrites de cette manière : elles sont trop basses d'environ un quart de ton. L'harmonique 11 s'écrit souvent comme un *fa*♮, trop haut alors d'un quart de ton.)

Les numéros d'ordre indiquent chaque fois le multiplicateur harmonique : quelle que soit la fréquence de la note de base (note fondamentale ; c'est aussi le premier son partiel[6]), elle doit être multipliée par 1, 2, 3, 4, etc., pour donner les fréquences des partiels harmoniques. Si la fréquence de base est 100 Hz, les partiels auront 100, 200, 200, 400, 500… Hz ; si la fréquence de base est 125, les partiels auront 125, 250, 375, 500, 625… Hz. La série se poursuit théoriquement jusqu'à l'infini. On en notera quelques propriétés arithmético-musicales : chaque note de numéro d'ordre pair se trouve à l'octave de celle de numéro d'ordre égal à la moitié (16 est à l'octave de 8, 14 à l'octave de 7, etc.) ; les intervalles sont progressivement plus petits, puisque chacun, transposé à l'octave, est divisé en deux parties inégales (1–2, devenant 2–4 à l'octave, est divisé par 3 ; 2–3, devenant 4–6, est divisé par 5 ; etc.)[7] ; etc.

[4] Le terme « harmonique » ici, ne fait pas référence à une particularité musicale. C'est un terme de mathématique, c'est plus précisément le nom mathématique de la série des nombres entiers.

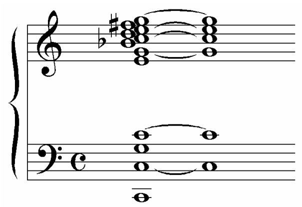
[5] On est ici en présence de trois types de « sons harmoniques » : les partiels harmoniques d'un son complexe ; les harmoniques d'une trompette naturelle ; les harmoniques d'une corde. Les phénomènes qui produisent ces divers types d'harmoniques sont fortement apparentés, mais pas identiques.

[6] Comme les autres, ce premier partiel peut être absent — c'est-à-dire d'intensité nulle. Même ainsi, la fondamentale perçue reste la même (sauf dans des circonstances spéciales). Si les partiels ont, par exemple, les fréquences 200, 300, 400, etc., mais que le partiel de fréquence 100 manque, l'oreille percevra néanmoins un son complexe dont la fréquence fondamentale est de 100 Hz. Cette propriété est utilisée parfois à l'orgue, où deux tuyaux mis côte à côte sonnent les partiels 2 et 3 de la série : le son perçu est alors une octave plus grave que la note produite par le tuyau le plus long. Il est possible d'éviter ainsi la construction de tuyaux très longs, donc très coûteux, ou tout simplement trop long pour être disposés sous la voûte de l'église.

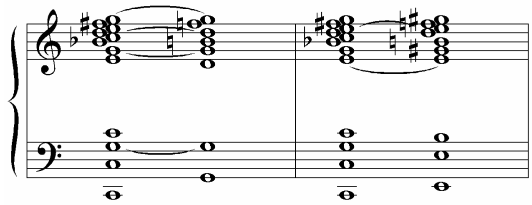
[7] Ces caractéristiques permettent de reconstruire par la réflexion la suite de la série. Les notes paires au-dessus de 16 sont à l'octave des notes dont leur numéro d'ordre est le double : 18 = 2x9 = *ré* ; 20 = 2x10 = *mi* ; 22 = 2x11 = (*fa*♯) ; etc. Les notes impaires sont intermédiaires entre les notes paires : 17, entre 16 (*do*) et 18 (*ré*), sera un *do*♯ ou un *ré*♭ ; 19 sera un *ré*♯ ou un *mi*♭ ; 21 sera approximativement un *fa* ; etc. Les intervalles deviennent cependant de plus en plus serrés et, par conséquent, les notes de plus en plus difficiles à définir exactement.

La plupart des instruments de musique n'entretiennent pas les sons qu'ils produisent. Dans ce cas, les sons partiels ne sont pas harmoniques. Il est pratiquement impossible, alors, de prédire les rapports entre eux. Plus la diffusion d'énergie est rapide, plus grande est l'inharmonicité. C'est le cas, par exemple, des cloches dont l'énergie est rapidement dissipée et dont les sons sont particulièrement inharmoniques. Le piano par contre diffuse lentement l'énergie, de sorte que les sons qu'il produit ressemblent raisonnablement au cas de sons à partiels harmoniques.

## 3 Consonance



Il n'existe toujours pas aujourd'hui de théorie définitive sur la nature de la consonance. Ce qui paraît certain, en tout état de cause, c'est que le phénomène de consonance est lié à la mise en concordance des séries harmoniques des sons qui constituent l'intervalle consonant. Par exemple, si deux *do* sont à l'octave l'un de l'autre, la consonance naît du fait que chacun des partiels harmoniques du *do* le plus aigu est à l'unisson d'un partiel (plus précisément d'un partiel sur deux) du *do* le plus grave, comme on le voit dans la figure ci-contre, qui montre les harmoniques 1 à 12 du *do* grave, 1 à 6 du *do* aigu. La figure ci-dessous montre de la même manière la concordance entre les séries harmoniques de sons distants d'une quinte et d'une tierce majeure, respectivement. Dans le cas de l'intervalle de quinte, un son sur deux de la série du plus aigu correspond à un son sur trois de la série du son le plus grave ; dans le cas de l'intervalle de tierce majeure, un son sur quatre de la série la plus aiguë correspond à un son sur cinq de la série la plus grave[8].



La dissonance a son origine dans le manque de concordance entre les partiels des sons considérés. Plus précisément, la dissonance naîtrait d'un effet désagréable (battement) causé par le manque de concordance entre les partiels. On distingue ici deux conceptions complémentaires : la première selon laquelle la consonance est le résultat d'une *fusion* entre les deux séries de partiels, la dissonance l'absence de cette fusion ; la seconde selon laquelle la dissonance résulte d'une *discordance* entre les séries de partiels, la consonance étant alors l'absence de cette discordance[9].

Aussi simplifiée soient-elles, ces conceptions de la consonance et de la dissonance permettent quelques considérations générales :

— Il ne peut y avoir ni consonance ni dissonance entre sons « purs »[10], puisque ceux-ci n'ont pas de sons partiels (ou, plus précisément, pas d'autre partiel que leur son fondamental). De tous les instruments occidentaux, la flûte est celui dont les sons se rapprochent le plus de sons purs : deux sons de flûte ne sont généralement pas vraiment discordants entre eux, mais les consonances n'y sont pas non plus très frappantes, puisque la fusion ne s'opère pas non plus. La polyphonie entre deux flûtes donne un résultat généralement satisfaisant, sans plus. Au contraire, plus deux sons complexes sont riches en harmoniques, plus l'effet consonant entre eux peut être marqué.

[8] Une vision plus naïve du problème cherche la consonance dans la série des harmoniques du son le plus grave : on constate en effet que le *sol* et le *mi* envisagés ici se trouvent dans la série harmonique du *do* auquel ils sont confrontés. Mais on ne trouve pas dans la série du *do* le *fa*, la quarte, ni le *mi* bémol, la tierce mineure, dont la consonance reste alors difficile à justifier. Si on admet que la consonance naît de la concordance entre deux séries harmoniques, on vérifie aisément qu'un son sur trois de la série harmonique du *fa* coïncide avec un son sur quatre de celle du *do* une quarte plus bas ; dans le cas de la tierce mineure, la concordance est d'un son sur six contre un sur cinq. Etc.

[9] La théorie de la fusion est due en particulier à Carl Stumpf (*Tonpsychologie*, Leipzig, 1883-1890 ; celle de la discordance (battements) à Hermann von Helmholtz (*Die Lehre von den Tonempfindungen*, Brunswick, 1863).

[10] À moins qu'ils ne soient si proches l'un de l'autre qu'un phénomène de battement direct se produise entre eux. Des sons purs à distance de demi-ton peuvent être dissonants, mais ils ne le sont pas à distance de septième majeure, etc. On se rappellera cependant que les sons ne sont jamais vraiment purs.

— Deux sons à partiels inharmoniques ne sont jamais vraiment consonants[11]. Ceci est manifeste dans le cas de carillons de cloches : bien que l'on puisse reconnaître tel ou tel intervalle comme une quinte ou une tierce majeure, ils ne sonnent pas particulièrement justes, à tel point qu'il est difficile de faire la différence entre une quinte ou une tierce « justes » (ou, plutôt, numériquement exactes) et les mêmes intervalles « faux » ; le carillon paraît sonner faux tout le temps, ou presque. Mais le cas peut se présenter aussi lorsqu'un instrument à cordes est monté de cordes de fabrication déficiente : il est impossible alors d'accorder, parce que tous les intervalles sonnent faux.
— Lorsque les sons partiels d'un son complexe sont approximativement harmoniques, il existe une zone plus ou moins large dans laquelle une concordance relative est maintenue entre les séries de partiels : les intervalles sonnent approximativement consonants. Ceci peut se produire soit dans le cas du piano, dont les sons partiels sont approximativement harmoniques et qui supporte donc un accord approximativement juste (tel que le tempérament égal), soit encore dans le cas d'un instrument à sons entretenus, comme le violon, mais où la stabilité des sons est volontairement altérée, par exemple par un vibrato : celui-ci, augmentant l'inharmonicité des partiels, voile la distinction entre justesse exacte et justesse approximative — c'est une des raisons pour lesquelles il est plus difficile de jouer juste sans vibrato.

## 4 Mesure des intervalles

La définition (imprécise) de la consonance qui vient d'être donnée permet aussi une première mesure des intervalles. Le phénomène de consonance est toujours un phénomène d'unisson : ce qui caractérise acoustiquement la consonance, ce n'est pas la distance caractéristique entre les notes qui la forment, mais bien l'unisson entre certains des harmoniques de ces notes. On comprend aisément que si les deux séries sont véritablement harmoniques, dès que deux partiels harmoniques sont à l'unisson, tous les autres partiels dont la fréquence est l'un de leurs multiples sont aussi à l'unisson. Ceci est très frappant dans le cas d'un violon qui s'accorde : le violoniste favorise la richesse harmonique des sons qu'il produit en menant l'archet de la façon la plus constante possible ; lorsque la consonance est presque atteinte, un nombre élevés d'harmoniques des deux séries sont presque à l'unisson — et donc nettement dissonants ; au moment où l'accord se fait juste, tous les partiels des deux séries atteignent ensemble l'unisson, de sorte que la fusion est à la fois soudaine et très forte — on a le sentiment que la consonance éclate soudain avec une sonorité lumineuse.

Puisque tous les partiels se mettent ensemble à l'unisson, il suffit de considérer ici le premier unisson dans la série, pour chacun des intervalles à examiner :
— l'octave correspond à la mise à l'unisson du partiel 1 (fondamental) de la note aiguë avec le partiel 2 de la note grave (comme il vient d'être dit, tous les multiples de ces partiels se mettent à l'unisson au même moment : le partiel 2 de la note aiguë avec le partiel 4 de la note grave, 3 avec 6, 4 avec 8, etc.). Le rapport de fréquence entre les fondamentales est de 2 à 1. Par exemple, si la note grave est un *sol*1 de 100 Hz, la note aiguë sera à l'unisson de son partiel 2, à 200 Hz.
— la quinte correspond à la mise à l'unisson du partiel 2 de la note aiguë avec le partiel 3 de la note grave ; le rapport des fréquences est de 3 à 2 (soit 1,5). Par exemple, si la note grave est le même *sol*1 de 100 Hz, le partiel 2 de la note aiguë sera à l'unisson du partiel 3 de la note grave, à 300 Hz ; le partiel 1 de la note aiguë sera une octave plus bas, à 150 Hz (soit 100 Hz x 1,5).
— la quarte correspond à la mise à l'unisson du partiel 3 de la note aiguë avec le partiel 4 de la note grave, à 400 Hz ; la fondamentale de la note aiguë vaut 400/3 = 133,3… Hz ; le rapport des fréquences est de 4 à 3 (soit 1,333…).

[11] Cette affirmation doit sans doute être tempérée, eu égard à l'intérêt porté par des compositeurs récents à la possibilité de créer des « consonances » qui ne correspondraient pas aux sons harmoniques, ni donc aux définitions usuelles de l'octave, de la quinte, de la tierce majeure, etc. Ce qui est visé ici, c'est que dès le moment où des vibrations « naturelles » (ce qui veut dire ici « en dehors des conditions de sons électroniques en laboratoire ») sont inharmoniques, aucune prédiction ne peut plus être faite concernant leur niveau de consonance : les caractéristiques de telles vibrations sont aléatoires.

— la tierce majeure correspond à la mise à l'unisson du partiel 4 de la note aiguë avec le partiel 5 de la note grave, à 500 Hz ; le rapport des fréquences est de 5 à 4 (soit 1,25). Pour une note de 100 Hz, la tierce majeure est à 125 Hz.
— la tierce mineure correspond à la mise à l'unisson du partiel 5 de la note aiguë avec le partiel 6 de la note grave, à 600 Hz ; le rapport des fréquences est de 6 à 5 (soit 1,2), comme de 100 Hz à 120 Hz.

On pourrait continuer de la sorte et définir des intervalles de plus en plus petits. Mais la musique n'est pas fondée seulement sur des intervalles plus ou moins consonants, elle repose aussi nécessairement sur des combinaisons d'intervalles. Pour cette combinatoire, les intervalles décrits ci-dessus sont largement suffisants. Ainsi par exemple, avant de rechercher un intervalle plus petit que la tierce mineure qui se situerait entre les harmoniques 6 et 7 des séries concernées, il faut considérer la différence entre les intervalles de quinte et de quarte déjà définis, différence qui forme aussi un intervalle plus petit que la tierce mineure. Le rapport de quinte, on vient de le voir, équivaut à 3/2 ; le rapport de quarte à 4/3. La différence entre ces deux rapports se calcule en multipliant le premier par l'inverse de l'autre : 3/2 x 3/4 = 9/8. Cet intervalle est celui qui sépare deux sons dont l'harmonique 8 de l'un est mis à l'unisson de l'harmonique 9 de l'autre. Notre théorie musicale décrit cet intervalle comme le « ton majeur » et néglige donc absolument les intervalles harmoniques qui séparent la tierce mineure (6/5) du ton majeur (9/8), soit les intervalles 7/6 et 8/7 : c'est la raison pour laquelle, dans l'exemple illustrant la série harmonique au paragraphe 2 ci-dessus, il est impossible de donner une notation satisfaisante de l'harmonique 7 (« *si*♭ » trop bas d'un quart de ton : tant l'intervalle *sol*–[*si*♭], correspondant à 7/6, que l'intervalle [*si*♭]–*do*, correspondant à 8/7, ne sont déterminés ni dans notre système musical, ni dans notre notation). Une fois définies la tierce majeure, la tierce mineure et le ton majeur, on peut se demander en quoi consiste cet autre ton qui fait la différence entre la tierce majeure (5/4) et le ton majeur (9/8) ; ici aussi, la réponse s'obtient en multipliant le premier par l'inverse de l'autre : 5/4 x 8/9 = 40/36 = 10/9, qui constitue le ton mineur. Le demi-ton diatonique se définit aisément comme la différence entre la quarte (4/3) et la tierce majeure (5/4), soit 4/3 x 4/5 = 16/15. Les intervalles intermédiaires, entre 10/9 et 16/15, n'ont pas vraiment d'utilité dans notre musique[12].

Il appartient à la nature même de la série harmonique (la série des nombres entiers) que les consonances telles qu'elles sont définies ici s'expriment par des rapports de nombres entiers. Plus encore, ces rapports ont la particularité que le numérateur est toujours supérieur au dénominateur d'une unité (rapports « superparticuliers » ou « épimores »). Le tableau ci-dessous indique les premiers rapports épimores :

| | |
|---|---|
| 2/1 | Octave (*do*–*do*) |
| 3/2 | Quinte (*do*–*sol*) |
| 4/3 | Quarte (*sol*–*do*) |
| 5/4 | Tierce majeure (*do*–*mi*) |
| 6/5 | Tierce mineure (*mi*–*sol*) |
| 7/6 | [Petite tierce mineure, *sol*–(*si*♭), inusitée ; ce (*si*♭) trop bas d'un quart de ton n'est pas utilisable dans le système diatonique] |
| 8/7 | [Grande seconde majeure, (*si*♭)–*do*, inusitée ; ce (*si*♭) trop bas n'est pas utilisable dans le système diatonique] |
| 9/8 | Ton majeur (*do-ré*) |
| 10/9 | Ton mineur (*ré-mi*) |
| Etc. | |

On peut noter encore que le ton majeur (9:8) est celui que produisent deux quintes successives diminuées d'une octave (par exemple *do*1–*sol*1, puis *sol*1–*ré*2, puis *ré*2–*ré*1) ; l'opération arithméti-

[12] Ceci est vrai en particulier au plan théorique, où le ton est défini comme la différence entre la quarte et la quinte, le demi-ton comme la différence entre la tierce et la quarte, etc. La justesse effectivement réalisée par les musiciens peut s'écarter fortement de cette théorie.

que correspondante est 3/2 x 3/2 x 1/2 = 9/8. La tierce majeure est le produit d'un ton majeur par un ton mineur : 9/8 x 10/9 = 90/72 = 5/4.

Mais ces opérations arithmétiques ne correspondent pas aux expressions courantes des musiciens. Il n'est pas d'usage en effet de *multiplier* deux quintes l'une par l'autre, puis de les *diviser* par une octave pour trouver un ton ; on se contente d'*additionner* deux quintes et d'en *retrancher* une octave… De même, nous disons que la tierce majeure se compose d'un ton majeur *plus* un ton mineur, plutôt que d'un ton majeur *multiplié par* un ton mineur. Sans entrer ici dans les détails, il suffira de dire que le langage commun se trouve dans une relation logarithmique avec l'arithmétique du tableau ci-dessus[13]. Concrètement, pour décrire simplement les intervalles, il suffit de se doter d'une unité de mesure qui peut être par exemple le demi-ton. La facilité impose de choisir comme unité le demi-ton tempéré, défini comme la douzième partie d'une octave ; la quinte tempérée se définit alors comme valant 7 demi-tons, la quarte 5, la tierce majeure 4, etc. — les intervalles tempérés, par définition, comptent un nombre entier de demi-tons tempérés. Le tableau ci-dessous donne les valeurs précises en demi-tons (avec deux décimales, donc une précision au 100e de demi-ton) des principales consonances « justes »[14], que l'on comparera aux valeurs tempérées :

<table>
<tr><th></th><th>Rapport numérique</th><th>Consonance « juste »<br>(en demi-tons)</th><th>Consonance tempérée<br>(en demi-tons)</th></tr>
<tr><td>Octave</td><td>2/1</td><td>12</td><td>12</td></tr>
<tr><td>Quinte</td><td>3/2</td><td>7,02</td><td>7</td></tr>
<tr><td>Quarte</td><td>4/3</td><td>4,98</td><td>5</td></tr>
<tr><td>Tierce majeure</td><td>5/4</td><td>3,86</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Tierce mineure</td><td>6/5</td><td>3,16</td><td>3</td></tr>
<tr><td>Ton majeur</td><td>9/8</td><td>2,04</td><td rowspan="2">2</td></tr>
<tr><td>Ton mineur</td><td>10/9</td><td>1,82</td></tr>
</table>

Les rapports de demi-ton ne sont pas décrits ici parce que leur définition varie. On peut cependant calculer aisément n'importe quel autre intervalle à partir des valeurs ci-dessus. Par exemple, le demi-ton diatonique qui sépare la quarte juste de la tierce majeure vaut 4,98 – 3,86 = 1,12 demi-ton tempéré. La tierce majeure (fausse !) qui s'obtient en additionnant quatre quintes (comme *do–sol–ré–la–mi*), puis en retranchant deux octaves, mesure (4 x 7,02) – (2 x 12) = 28,08 – 24 = 4,08 demi-tons tempérés[15].

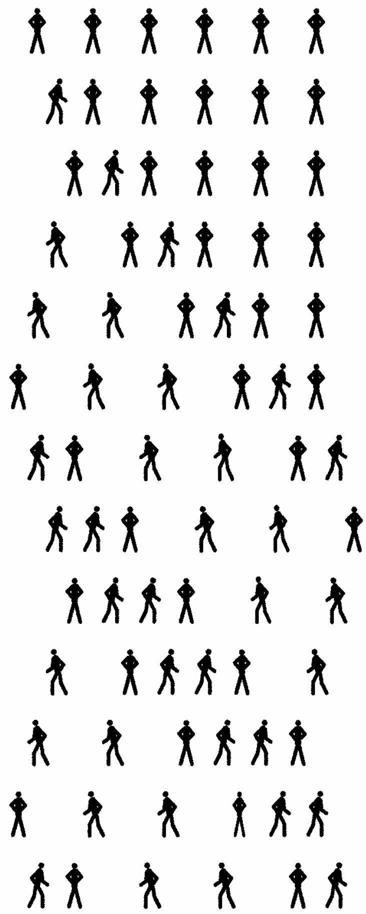
Les ethnomusicologues ont pris l'habitude de mesurer les intervalles au moyen d'une unité plus petite, le centième de demi-ton, appelé *cent*. Les résultats sont les mêmes, cependant, que dans le tableau ci-dessus : il suffit d'y multiplier les valeurs par 100. La quinte juste, par exemple, vaut 702 *cents* (correspondant à 7,02 demi-tons), la quarte juste à 498 *cents* (pour 4,98 demi-tons), etc. Dans tous les cas, on voit que la quinte juste est légèrement plus grande (2 centièmes de demi-ton, 2 *cents*) que la quinte tempérée, la quarte juste légèrement plus petite que la quarte tempérée. La tierce majeure juste est assez bien plus petite (14 centièmes de demi-ton) que la tierce tempérée et la tierce mineure juste plus grande (16 centièmes de demi-ton) que la tierce tempérée.

[13] Le lecteur intéressé trouvera plus de détails à ce propos dans l'annexe 2.

[14] Le mot « juste » est écrit entre guillemets pour rappeler que la définition de la justesse reste malgré tout problématique ; ce point ne sera pas discuté ici.

[15] Dans ce calcul, (4 x 7,02) représente les quatre quintes successives ; (2 x 12) représente les deux octaves qu'il faut soustraire, puisque quatre quintes ne produisent pas une tierce, mais bien une dix-huitième. La tierce résultant de quatre quintes s'appelle « tierce pythagoricienne ». Il faut comparer sa valeur à celle de la tierce tempérée (4 demi-tons), mais aussi à celle de la tierce « juste » (3,86 demi-tons) qui est nettement plus petite. La différence entre la tierce pythagoricienne et la tierce juste, 4,08 – 3,86 = 0,22 demi-ton, est l'une des définitions possibles du comma. On calculera aussi que le demi-ton qui sépare la quarte juste de la tierce pythagoricienne n'est que de 4,98 – 4,08 = 0,90 demi-ton tempéré.

## 5 Propagation du son dans l'air



La figure ci-dessous tente de donner une idée du mouvement du son dans l'air. Les particules d'air sont représentées ici par des bonshommes qui se bousculent et se déplacent. Le mouvement initial (celui du premier bonhomme à la deuxième ligne) a été provoqué par exemple par un jet d'air dans un instrument à vent, ou par le déplacement de la table d'harmonie d'un instrument à cordes. Les mouvements des bonshommes ont pour effet de produire à certains endroits des « condensations », des compressions (c'est-à-dire une plus grande concentration de bonshommes dans l'espace, une plus grande densité de l'air qu'ils représentent), à d'autres endroits des raréfactions, des dépressions (une moins grande concentration de bonshommes, une moins grande densité de l'air). Il faut lire la figure de haut en bas, chaque ligne de bonshommes représentant un moment du phénomène de propagation. Les bonshommes eux-mêmes se déplacent assez peu. On peut suivre par exemple le mouvement du premier bonhomme, qui se déplace vers la droite jusqu'à la troisième ligne, puis revient vers la gauche de la troisième ligne à la sixième, et ainsi de suite. Après avoir été heurté par le précédent, chacun des bonshommes effectuent les mêmes mouvements, mais décalés dans le temps. On notera que, dans leur mouvement vers la gauche, les bonhommes, entraînés par leur inertie, dépassent leur position initiale. Le mouvement de gauche à droite puis de droite à gauche est de type pendulaire (c'est-à-dire conforme aux mouvements de pendule décrits au § 1). L'amplitude est la distance entre le point le plus à gauche et le point le plus à droite du déplacement. La période est le temps qui s'écoule avant que chaque bonhomme revienne à une position donnée en se déplaçant dans le même sens ; dans la figure ci-contre, la période est le temps qui sépare une ligne de celle qui se trouve six lignes plus haut. La fréquence est le nombre de déplacements complets (de gauche à droite et de droite à gauche) en une seconde.

Si les bonshommes (ou les particules d'air) se déplacent relativement peu par rapport à leur position initiale, on constate que les compressions et les dépressions, par contre, progressent de gauche à droite : ainsi, la compression créée à la deuxième ligne par le déplacement du premier bonhomme atteint le bonhomme de droite à la sixième ligne ; on peut imaginer qu'elle continue ensuite à se propager vers la droite, au delà des limites de la figure. Au moment où les variations de pression viennent frapper le tympan de l'oreille, elles sont perçues sous forme sonore. La vitesse de translation des compressions et des dépressions est indépendante de celle des bonshommes eux-mêmes ; elle dépend par contre de la distance entre eux en position de repos. Dans l'air, la vitesse du son dépend de la densité, donc notamment de la pression atmosphérique et de la température. Dans des conditions normales, elle est de l'ordre de 340 mètres par seconde[16].

Les bonshommes de la figure se déplacent horizontalement seulement. On comprend bien que dans le cas de l'air, les molécules se déplacent dans toutes les directions. C'est comme un jeu de billes, où une bille venant frapper un tas de billes envoie celles-ci dans toutes les directions à la fois.

[16] Cette vitesse a été mesurée dès le XVIII$^{e}$ par une observation du temps séparant, à une distance donnée, la vision et l'audition d'un phénomène à la fois visuel et sonore — typiquement, un coup de pistolet, produisant à la fois une flamme et un son. Si on admet que la propagation de la lumière est instantanée (ce qui est approximativement exact) et si la distance est, par exemple, de 3 Km 400, le son sera entendu 10 secondes après que la flamme ait été vue. On calcule par le même principe la distance à laquelle la foudre tombe, en mesurant le temps écoulé entre la vue de l'éclair et l'audition du tonnerre : chaque seconde passée correspond à une distance d'environ 340 m.