

CE MAGAZINE VOUS PLAÎT ?

OFFRE
DURÉE
LIBRE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

2 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓
Le Hors-Série papier (4 numéros par an)	✓	✓
L'accès en ligne illimité www.pourlascience.fr		✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)		✓
L'édition numérique du Hors-Série (4 numéros par an)		✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	6,50 € PAR MOIS	8,20 € PAR MOIS
VOTRE RÉDUCTION	- 32 %	- 44 %

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG18STDDOS

1 / JE CHOISIS MA FORMULE (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE INTÉGRALE

- 12 n°s du magazine papier
- 4 Hors-Séries papier
- Accès illimité aux contenus en ligne

8,20 €
PAR MOIS
- 44 %

IPV8E20

☐ FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE

- 12 n°s du magazine papier
- 4 Hors-Séries papier

6,50 €
PAR MOIS
- 32 %

PPV6E50

2 / MES COORDONNÉES

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Tél. : :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2018 en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

3 / MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de huit semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

Organisme créancier: Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE

ABONNEZ-VOUS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

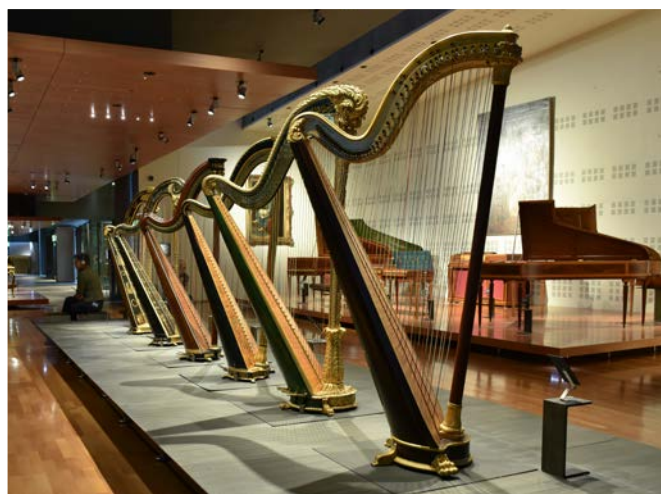
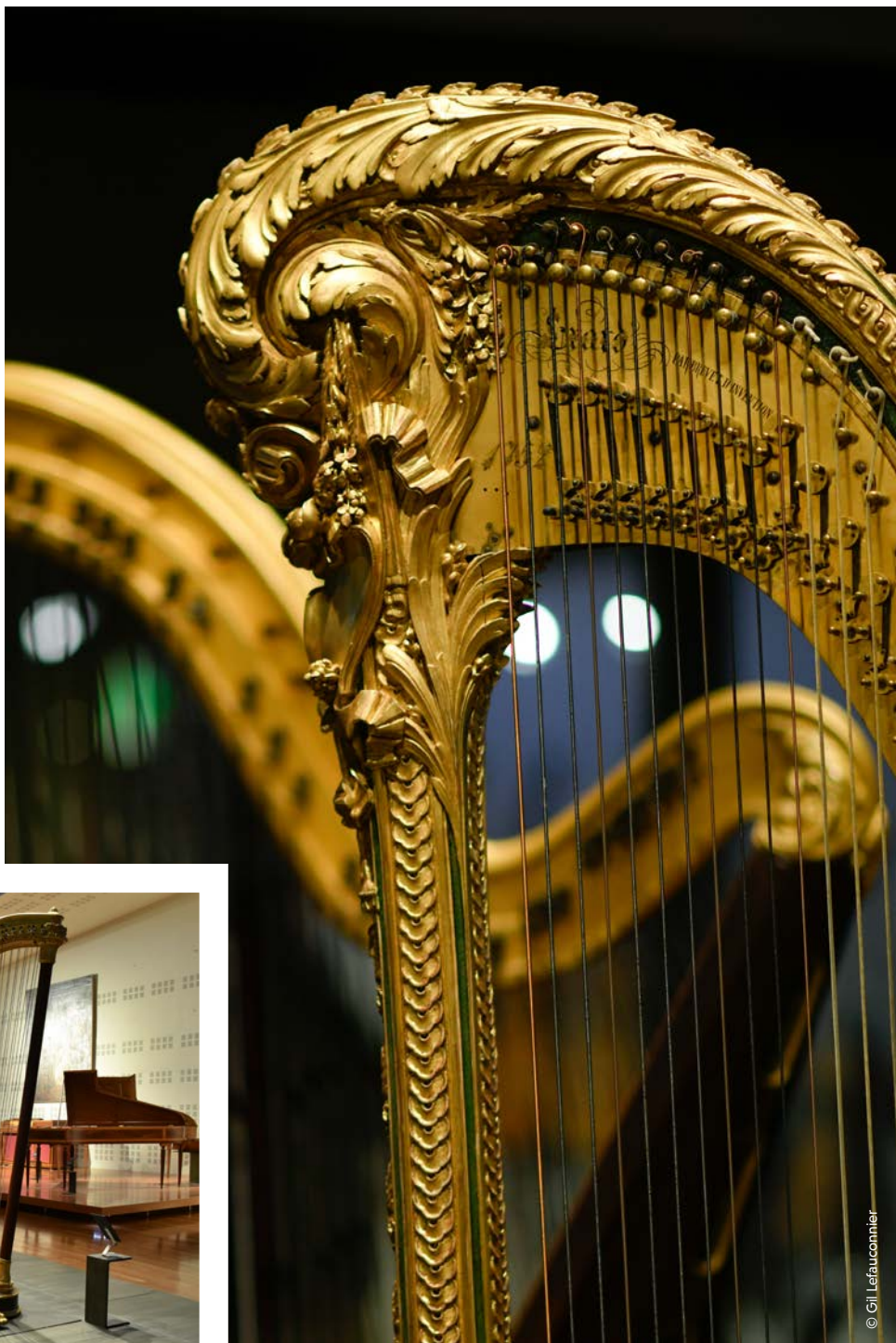
4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

LES TRÉSORS DE LA MUSIQUE

**L'histoire de la musique
racontée en plus de
1 000 instruments. Telle est
la vocation du musée de la
Musique, au sein de la
Philharmonie de Paris, qui
fête cette année ses 20 ans.
Morceaux choisis.**

HARPE

Connue depuis l'Antiquité, la harpe évolue jusqu'au début du XIX^e siècle. L'instrument est très en vogue dans l'aristocratie à la fin du XVIII^e siècle, les décors soignés en attestent (*ci-contre, une console de harpe Érard, Paris, 1873*).



OCTOBASSE

Cet instrument gigantesque (de Jean-Baptiste Vuillaume, Paris, France, vers 1850) n'a pas un son beaucoup plus grave (une tierce en dessous) que celui d'une contrebasse. En revanche, ce son est beaucoup plus puissant. Présenté à l'Exposition universelle de 1855, il reçoit les éloges d'Hector Berlioz.



GUITARE

À la fin du ^{xv}^e siècle, la *vihuela de mano*, donne naissance à la guitare. Au ^{xvi}^e siècle, cette dernière colonise rapidement la France et l'Italie. Au ^{xvii}^e siècle, elle est montée de cinq paires de cordes, avec un dos plat (ici, l'instrument de Jacques Dumesnil, Paris, 1648) ou bombé comme le luth.



© Albert Giordan

GUITARE ÉLECTRIQUE

La célèbre entreprise allemande Höfner produit sa première guitare électrique monobloc (*solidbody*) en 1956. Le modèle 173 (ci-dessous), commercialisé en 1962, emprunte sa forme et son circuit électronique à celle de la Fender Stratocaster.



© Gil Lefauconnier



VOLONCELLE

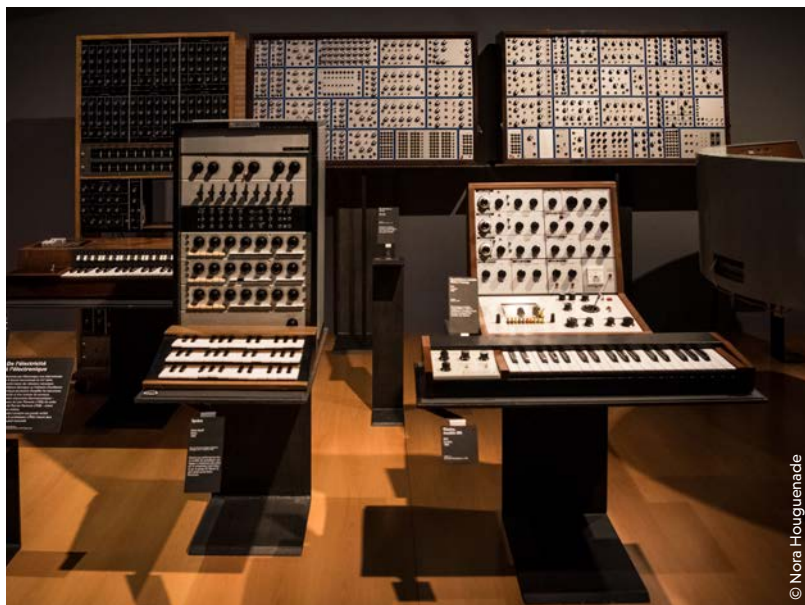
Témoignage emblématique de la Première Guerre mondiale, ce violoncelle dit le « Poilu » fut construit pour Maurice Maréchal (*photo en haut*) à partir de bois de caisses de munitions. Il a été signé par les généraux Foch, Gouraud, Joffre, Mangin et Pétain.

© Yazid Medmoun



CLAVECIN

Les plus anciens clavecins italiens (à un seul clavier) datent du XVI^e siècle. Leur facture varie peu jusqu'au XVIII^e siècle. La caisse extérieure (*ci-dessus*) de celui-ci (Faby, Bologne, 1677) est peinte en faux marbre. Le clavier (*ci-contre*) est en ivoire gravé et en ébène incrusté.



LUTHERIE ÉLECTRONIQUE

Le synthétiseur Synket (*au premier plan*), fabriqué à Rome en 1964, a appartenu au groupe de recherche musical Studio R7, dont faisait partie Ennio Morricone. Les deux modules du synthétiseur E-mu (*au fond*) ont été spécialement développés pour Frank Zappa en 1976.







© Nicolas Borel

PIANOS À QUEUE

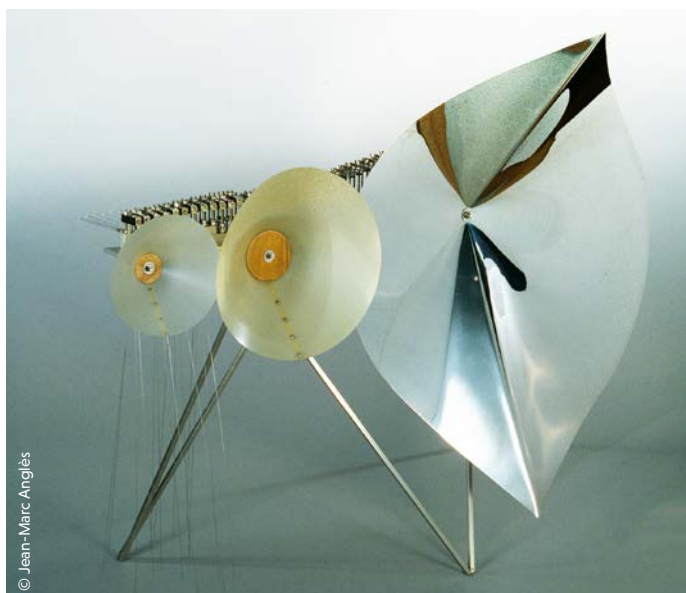
Ces instruments (*Érard, Paris, 1802 et 1812*) sont les premiers pianos de concert français. Leur succès dépasse largement les frontières de la France. Des compositeurs tels que Haydn et Beethoven ont possédé un modèle identique au piano à queue du premier plan.



© Nora Houguenade

ORCHESTRE «PIPHAT MON»

Ce type d'ensemble instrumental, essentiellement composé de gongs, de métalphones et de xylophones, est répandu en Asie du Sud-Est et en Indonésie. Cet orchestre thaïlandais *piphat mon* est plus spécifiquement dédié à la célébration de rites funéraires et se distingue par des instruments constitués d'une succession de petits gongs disposés sur des châssis verticaux en demi-lune. Somp tueusement décoré et doré à la feuille, il a appartenu à une famille de musiciens professionnels.



© Jean-Marc Anglès

CRISTAL BASCHET

Mis au point dans les années 1950 par Bernard et François Baschet, l'instrument est constitué d'une rangée de 56 tiges de verre (couvrant 4 octaves et demie) encastrées dans une plaque de métal. Une grande feuille en acier inox conique pliée à la main et deux cônes en fibres de verre ainsi qu'un réseau de tiges métalliques servent d'amplificateurs. On joue en frottant ses doigts humides sur les baguettes de verre.



CITÉ DE LA MUSIQUE
PHILHARMONIE
DE PARIS

20 ans
MUSÉE
DE LA MUSIQUE

Des instruments de musique... virtuels

Comment créer des instruments de musique virtuels aux sonorités réalistes ? En modélisant les phénomènes physiques en jeu dans les vrais instruments et en utilisant des outils mathématiques et informatiques.

P

ourquoi, lorsqu'on souffle plus fort dans une flûte, le son produit est non seulement plus fort, mais la note ou le timbre changent aussi ? Quelle est l'influence de la géométrie et du matériau sur l'instrument ? Pourquoi un musicien a-t-il besoin d'un apprentissage long et difficile pour donner de l'expressivité à son art ? De telles questions laissent entrevoir la complexité des phénomènes mis en jeu dans le fonctionnement des instruments de musique.

Cette complexité est à l'origine de ce qui rend le son de l'instrument naturel, unique et vivant. Mais elle n'a pas empêché les scientifiques de chercher à comprendre les instruments de musique et à reproduire électroniquement leurs sonorités. Les progrès réalisés sont tels qu'on sait aujourd'hui

simuler sur ordinateur et piloter en temps réel des instruments de musique virtuels avec un rendu réaliste.

Dans l'histoire de la synthèse sonore, qui vise à créer des sons de façon artificielle (par voie électronique ou informatique), on peut distinguer deux types de procédés. Dans la « synthèse par modèles de signaux », on s'attache à construire directement le signal électrique à envoyer dans les haut-parleurs, pour obtenir des sonorités insolites qu'on trouve par exemple dans la musique dite électronique. La « synthèse par modèles physiques » s'intéresse, au contraire, au générateur de l'onde sonore, c'est-à-dire à l'instrument et à l'instrumentiste, plutôt qu'au son lui-même. Dans ce cas, qui fait l'objet du présent article, on veut mimer la réponse de l'instrument à tous les gestes possibles du musicien : attaques, transitoires entre notes, évolution du timbre avec la nuance.

DES INSTRUMENTS CHIMÉRIQUES

Quel est l'intérêt de la synthèse par modèles physiques ? Il est, bien sûr, de disposer de versions virtuelles et jouables d'instruments réels, anciens ou même disparus. Mais il est aussi de tester virtuellement des modifications de la géométrie et des matériaux de l'instrument, voire d'optimiser la puissance de celui-ci, sa brillance sonore... On peut également concevoir des instruments imaginaires ou farfelus, mais qui restent physiquement censés : des instruments de taille immense, un hautbois

L'ESSENTIEL

● Scientifiques et ingénieurs conçoivent des instruments virtuels, dont on synthétise les sons.

● Cette synthèse sonore requiert une modélisation physique de l'instrument qui soit à la fois soignée et assez simple pour procéder en temps réel.

● La prise en compte du jeu de l'instrumentiste, en plus de la physique de l'instrument, reste un défi.

LES AUTEURS



THOMAS HÉLIE
directeur de recherche
au CNRS, Laboratoire
STMS, à l'Ircam-CNRS-SU,
à Paris.



CHRISTOPHE VERGEZ
directeur de recherche
au CNRS, Laboratoire de
mécanique et d'acoustique à
Marseille (CNRS-AMU-ECM).

➤ évoluant continûment en saxophone au cours du temps, ou même un conduit vocal de dragon ou de dinosaure pour le son au cinéma... De même, on sait aujourd'hui concevoir virtuellement des matériaux évoluant du métal au bois pendant la vibration!

Les travaux pionniers du savant allemand Hermann von Helmholtz, à la fin du XIX^e siècle, et de nombreux autres, en partie rassemblés par les Américains Neville Fletcher et Thomas Rossing à la fin du XX^e siècle, ont permis de comprendre le fonctionnement élémentaire des instruments de musique. En n'en retenant que les éléments clés, plusieurs équipes dans le monde ont proposé dès la fin des années 1980 des premières synthèses sonores en temps réel, c'est-à-dire des synthétiseurs, des instruments électroniques, qui calculent suffisamment vite pour que l'opérateur humain ne perçoive aucun délai entre son action (appuyer sur la touche du clavier) et le résultat sonore.

Depuis, les travaux s'attachent à améliorer les modèles pour augmenter le réalisme sonore tout en préservant le traitement en temps réel. Un autre défi pour le réalisme reste le contrôle de l'instrument virtuel: même avec une excellente modélisation de l'instrument, le premier son que l'on produit en jouant sur un instrument virtuel est souvent... un canard! Il s'agit de construire les «réflexes coordonnés» acquis par le musicien expert et qui lui permettent de bien jouer. Avant toute tentative de synthèse par modèle physique, il faut étudier et comprendre le fonctionnement d'un instrument de musique.

Depuis Helmholtz, on sait que ce fonctionnement repose sur une boucle de rétroaction où un excitateur (anche, archet, lèvres, plectre, jet d'air...) se couple à un résonateur (tuyau, corde, membrane...). Ce faisant, le résonateur cède un peu d'énergie sous la forme d'un rayonnement acoustique, perçu par nos oreilles. Dans le cas des instruments entretenus – c'est-à-dire capables d'auto-osciller spontanément à partir d'une excitation statique telle qu'un souffle constant, par opposition aux instruments pincés ou frappés –, l'émission d'une note résulte d'un couplage entre l'excitateur et le résonateur, et requiert en permanence des ajustements très fins de la part du musicien.

Pour la synthèse sonore en temps réel, on doit réduire au maximum la complexité du modèle de l'instrument afin d'avoir des temps de calcul courts. Mais le modèle simplifié doit aussi pouvoir expliquer une grande partie du fonctionnement d'un instrument. Une telle «formulation minimale» peut intégrer des descriptions sommaires de l'excitateur et du résonateur, mais, pour expliquer et reproduire le phénomène d'auto-oscillation, elle ne peut faire l'impasse sur la nature non linéaire de

l'excitateur et de son couplage avec le résonateur (voir l'encadré page ci-contre). L'expression «non linéaire» signifie que la réponse (ou «sortie») du système n'est pas proportionnelle à l'action (ou «entrée») qu'on lui applique.

Il a été montré que ces modèles simples et peu coûteux à simuler incorporent assez la physique de l'instrument pour produire des comportements comparables à ceux de l'instrument réel: le son synthétisé est déjà caractéristique de telle ou telle classe d'instruments. Cependant, il faut raffiner les modèles pour réussir à leurrer l'oreille quant à la nature synthétique du son. Comment le faire de façon compatible avec une synthèse en temps réel, c'est-à-dire en n'allongeant pas trop les temps de calcul?

DES TUBES OU DES CYLINDRES?

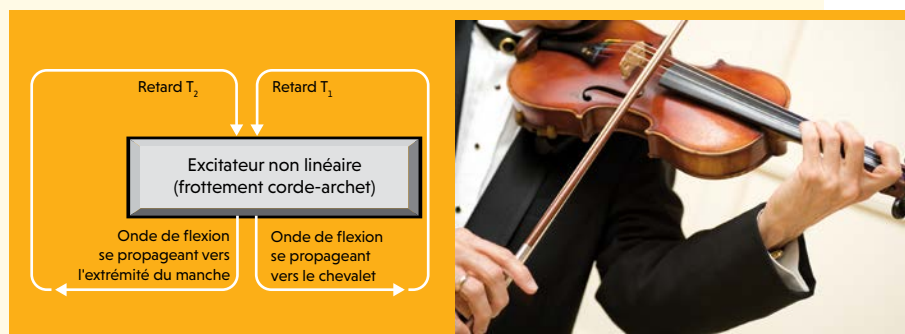
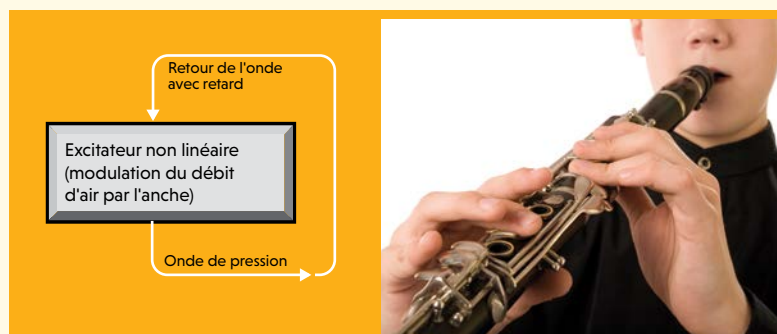
L'une des approches est de modéliser de façon simplifiée la forme géométrique du résonateur. Les résonateurs d'instruments, qu'ils soient mécaniques (cordes, plaques, etc.) ou acoustiques (tubes) sont le lieu où se propagent des ondes. Simuler précisément cette propagation dans une géométrie tridimensionnelle se révèle souvent trop coûteux en calculs. Prenons le cas d'un résonateur d'un instrument tel qu'une trompette, qui a la forme d'un tube à section variable – on parle de la «perce» de l'instrument. Comment le représenter de façon simplifiée? La première idée pour la synthèse sonore était d'approcher cette perce par un profil en marches d'escalier, comme si l'on raccordait des tubes droits (voir la figure page 68).

Dans ce cadre, quand une onde acoustique plane, c'est-à-dire dont les fronts sont plans et perpendiculaires à l'axe du tube, se propage le long du tube et arrive à une discontinuité de section, elle subit une réflexion partielle

**Virtuellement,
on conçoit aujourd'hui
des matériaux évoluant
du métal au bois**

DES MODÈLES MINIMAUX D'INSTRUMENTS

Les simulations les plus simples du fonctionnement d'un instrument de musique intègrent deux ingrédients clés. D'une part, il faut représenter le mécanisme non linéaire d'excitation (modulation du débit d'air par l'anche dans le cas d'une clarinette, frottement entre l'archet et la corde dans le cas d'un violon...) par un système simple d'équations non linéaires, bâti à l'aide de fonctions élémentaires. D'autre part, on doit prendre en compte les retards des ondes, c'est-à-dire les temps mis par les ondes pour effectuer un aller et retour au sein de l'instrument. Ainsi, une onde acoustique qui se propage d'une distance L dans un tube droit, puis se réfléchit, subit un retard $T = 2L/c$, imposé par la vitesse du son c . Considérons l'exemple d'une clarinette. Un mouvement d'anche crée une fluctuation de pression qui se propage à la vitesse c le long de l'instrument, jusqu'au premier trou ouvert (situé à une distance L), où elle est réfléchie avec un changement de signe. Cette onde revient donc à l'anche après un retard $T = 2L/c$ et y modifie les conditions de pression. En conséquence, l'extrémité de l'anche se déplace, ce qui modifie le débit d'air entrant et crée une nouvelle perturbation de pression. Autre exemple : un violon et son archet. Le frottement entre le crin enduit de colophane et la corde engendre des ondes de flexion



sur chaque partie de la corde. Ces ondes se propagent à une certaine vitesse, l'une vers le chevalet, l'autre vers l'extrémité du manche. Parvenues à l'extrémité, elles y sont réfléchies. Après des temps de parcours différents T_1 et T_2 (sauf si l'archet frotte la corde en son milieu, auquel cas les temps de parcours sont égaux), les deux ondes reviennent à l'archet et interagissent à nouveau avec lui.

instantanée (comme si une partie de l'onde rebondissait sur cette jonction) et se transmet aussi partiellement au tronçon voisin.

En fin de compte, on aboutit à une « structure de guide d'ondes » où, du point de vue mathématique et informatique, n'intervient qu'un petit nombre d'opérations élémentaires : retards de l'onde proportionnels à la longueur du tube, additions, multiplications des amplitudes ondulatoires par des coefficients de réflexion qui dépendent des sections du tube. Ce modèle a été utilisé dès les années 1960 pour simuler le conduit vocal humain ; une fois optimisée, la structure informatique correspondante a été nommée, d'après les deux chercheurs qui l'ont introduite, structure de Kelly-Lochbaum (encore utilisée pendant chacun de nos appels téléphoniques pour la resynthèse de nos voix).

Mais des tubes droits raccordés restent une approximation grossière du profil doux des pavillons et de nombreux instruments. Ainsi,

pour un instrument à perce régulière, la simulation crée des artefacts que l'oreille perçoit. Pour renforcer le réalisme tout en restant compatible avec un traitement en temps réel, nous avons conçu vers 2002 un modèle à une dimension qui respecte mieux la géométrie du tube.

LA GÉOMÉTRIE DE LA PERCE

On part d'un tube à symétrie axiale, avec une perce dont le rayon dépend régulièrement de la coordonnée z mesurée le long de l'axe. Le calcul des sons produits par un tel tube implique de déterminer la pression acoustique régnant en chaque point à l'intérieur du tube, en réponse à une certaine pression appliquée à l'entrée. Ainsi, pour chaque position z le long de l'axe, on s'intéresse à la pression acoustique régnant à la distance r de l'axe. Cette pression obéit à une équation, qui décrit la propagation des ondes acoustiques, et dépend à la fois de la position et du temps. Dans le plan (z, r) et à un instant donné, les points associés à une

> même valeur de la pression constituent des courbes, nommées isobares comme sur une carte météorologique (voir la figure page 70).

Les isobares dessinent en général des lignes courbes, ce qui traduit le fait que la pression dépend à la fois de la coordonnée radiale r et de la coordonnée axiale z . L'idée de notre modélisation unidimensionnelle revient en quelque sorte à construire un miroir déformant qui redresse les isobares, pour les transformer en lignes droites perpendiculaires à l'axe. Dans cette nouvelle image, la pression devient indépendante de la coordonnée radiale, ce qui réduit la dimension effective du problème à un et simplifie beaucoup les calculs.

L'outil mathématique qui effectue cette transformation est un changement de coordonnées dynamique: on passe des coordonnées z et r à deux autres coordonnées a et b grâce à des fonctions appropriées f et g , qui dépendent du temps t (et de la perce de l'instrument). On réécrit ensuite l'équation des ondes en termes de coordonnées a et b , de façon que la pression y apparaisse comme une fonction de la nouvelle coordonnée a uniquement, et non de b .

La géométrie du résonateur n'est pas le seul aspect à prendre en compte dans la synthèse sonore. Un autre est l'amortissement. Si l'archet ou le souffle du musicien s'arrête, le son finit par s'éteindre: un instrument de musique est un système amorti, où l'énergie perdue par l'instrument est essentiellement le son émis lui-même. Or les émissions acoustiques des tubes, barres, plaques sont connues, et on sait les prendre en compte avec une bonne approximation dans les simulations du fonctionnement d'un instrument.

Cependant, d'autres types d'amortissements intrinsèques au résonateur ont un effet important sur le son. Reprenons le cas des tubes. La colonne d'air en vibration dans le tube crée un frottement sur ses parois et échange de la chaleur avec elles. Ces phénomènes viscothermiques dépendent de la texture de la surface du tube, du type de matériau et de son aptitude à conduire la chaleur. De plus, leur effet sur les ondes sonores dépend de la fréquence de celles-ci.

Si la modélisation n'intègre pas bien cet amortissement, le son produit par l'instrument virtuel semble, à l'oreille, synthétique. Or la prise en compte du bon amortissement peut se révéler parfois délicate sur le plan mathématique, avec par exemple une opération étonnante telle qu'une dérivation temporelle fractionnaire (de même que les puissances non entières généralisent les mises au carré ou au cube, dériver une demi-fois généralise la dérivée qui donne la vitesse à partir de la position, ou l'accélération à partir de la vitesse).

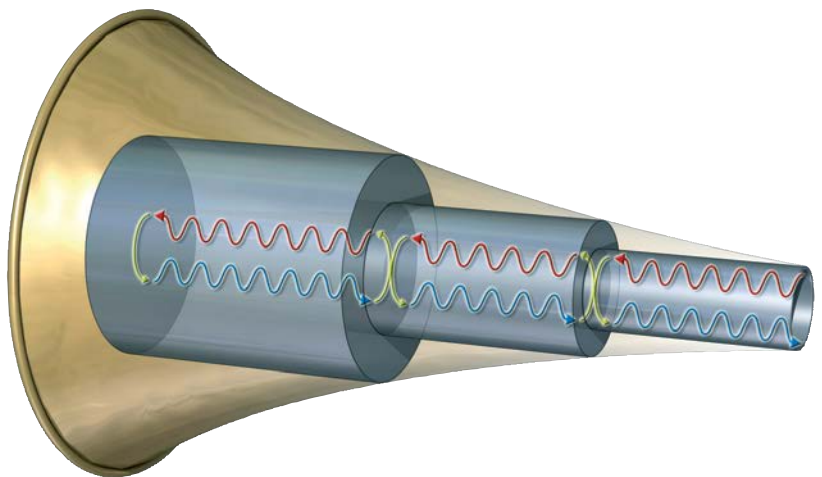
Pour les résonateurs à cordes, barres ou plaques, les amortissements peuvent avoir des

complexités similaires, selon les matériaux. On devrait pouvoir leur adapter les méthodes mathématiques utilisées pour le cas des instruments à vent, ce à quoi nous nous attelons.

Comme on l'a vu, la géométrie du résonateur et les phénomènes d'amortissement viscothermiques sont deux points clés pour élaborer un instrument virtuel à rendu réaliste. Un troisième est que, dans un instrument de musique, les ondes d'amplitude élevée sont souvent distordues par des effets non linéaires.

DES DISTORSIONS NON LINÉAIRES

Voyons comment sur l'exemple de la guitare. Pour accorder votre guitare, vous réglez la tension des cordes grâce aux mécaniques: plus la tension est élevée, plus la célérité de propagation des ondes (et donc la hauteur du son!) l'est aussi. Or pendant que la corde vibre, sa longueur varie par élasticité, ce qui modifie la tension et, partant, la vitesse de propagation des ondes. Il s'ensuit une distorsion



des ondes, effet d'autant plus marqué que l'on pince fortement la corde.

Autre exemple: pour accorder votre trompette, vous réglez la longueur du tube à l'aide d'une petite coulisse... mais seulement après avoir joué un peu pour chauffer l'instrument. Car plus l'air est chaud, plus la célérité du son y est grande et la note est haute. Or une surpression d'une onde sonore chauffe l'air où elle se propage, ce qui augmente aussi la célérité. Ainsi, comme pour la corde de guitare que l'on pince plus fortement, souffler plus fort dans la trompette distord l'onde sonore produite.

En résumé, modestes à faible amplitude, ces effets non linéaires peuvent devenir significatifs aux nuances *fortissimo* et participent

Pour modéliser un instrument à vent en forme de tube de perce (ou profil) variable, on peut en première approximation l'assimiler à un ensemble de trois tubes droits. À chaque jonction entre tubes, une partie des ondes acoustiques est réfléchie (en bleu) dans le même tube et une autre transmise (en rouge) au tronçon voisin. Le modèle correspondant, après optimisation, est nommé structure de Kelly-Lochbaum.

même à la signature sonore naturelle d'un instrument. C'est le cas du «cuivrage» pour les trombones et trompettes: la brillance (renforcement des hautes fréquences par rapport aux basses) provient de telles distorsions.

Maintenant, rêvez un peu et supposez que, grâce à la modélisation physique et aux techniques mathématiques, votre trompette au profil optimisé ou votre stradivarius virtuels sont là. À vous de jouer? Pas si simple...

En effet, le modèle physique ne fait que reproduire virtuellement la production du son lorsque les lèvres vibrent au passage de l'air

soufflé dans la trompette ou lorsque la corde oscille sous l'action du frottement de l'archet. C'est déjà beaucoup, mais pas suffisant pour en faire un instrument virtuel!

Pour transformer un programme informatique qui simule la physique de la production du son en instrument de musique, il faut lui adjoindre une interface homme-machine adaptée. Par ce biais, l'utilisateur peut modifier les valeurs de certains paramètres des équations du modèle physique (souffler plus fort, tendre ses lèvres, modifier la vitesse de l'archet ou son appui sur la corde...). C'est le ➤

UN ESCARGOT POUR S'ACCORDER

Une vibration sonore se compose d'oscillations d'amplitudes et de fréquences différentes, dont l'ensemble forme le «spectre du son». Les analyseurs de spectres sonores standards affichent des courbes d'amplitude, correspondant au volume du son, en fonction de la fréquence.

L'application «The Snail – IrcamLab» repose sur la combinaison de deux éléments: un nouveau procédé d'analyse du spectre du son, et une représentation de ce spectre sous une forme en spirale (d'où le nom *snail*, c'est-à-dire escargot) adaptée à une échelle musicale.

Le procédé apporte une précision fréquentielle assez fine pour travailler sur l'accordage ou le microaccordage. La représentation cartographique les composantes du son sous une forme assez intuitive. L'axe des fréquences, enroulé en spirale, va des graves (au centre) vers l'aigu (à l'extérieur), de sorte qu'un tour correspond à une octave (soit le doublement d'une fréquence). Ainsi,

toutes les composantes fréquentielles en relation d'octave (c'est-à-dire partageant le même nom de note) sont alignées sur un rayon de l'escargot et partagent le même angle. Graphiquement, les composantes actives du spectre sont reportées sur ce squelette en spirale de sorte qu'un stimulus auditif se traduit par un stimulus visuel en cohérence avec l'échelle perceptive.

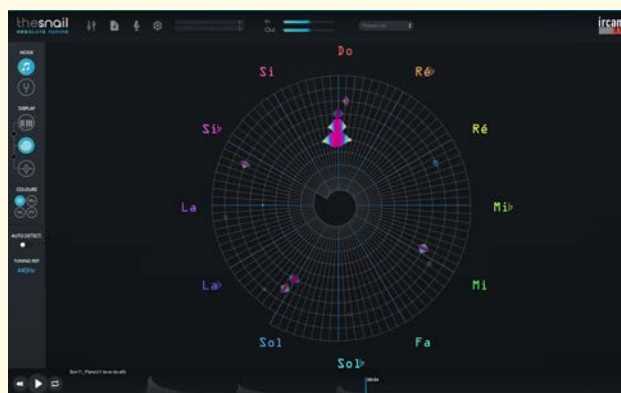
Si l'on repère sur la spirale l'angle associé à une fréquence de référence (un *la* à 440 hertz par exemple) et que l'on divise un tour complet en douze angles égaux, on conçoit une grille correspondant à la gamme tempérée, où les douze notes sont séparées par un demi-ton (voir la figure). D'autres choix de marquage permettent d'exploiter d'autres diapasons et d'autres tempéraments. La figure montre l'analyse par Snail du *do* central (noté *do* 3) d'un piano droit (le point en cyan indique le diapason, ici, 440 Hz). On constate qu'une note est composée de plusieurs vibrations simultanées. La composante la plus forte est

la fondamentale (le *do* 3 correspond à la tache la plus étendue, en rose). Puis après un tour de spire (dans le sens des aiguilles d'une montre, vers l'extérieur), vient l'harmonique 2 (le *do* 4), puis 3 (*sol* 4), puis 4 (*do* 5), puis 5 (*mi* 5, décalé par rapport à la ligne), puis 6 (*sol* 5, non aligné avec le *sol* 4), puis 7 (*si* bémol 5), puis 8 (*do* 6), puis 9 (*ré* 6, plus haut)... Le défaut d'alignement entre les composantes des notes (*do*, *mi*, *sol*...) exprime précisément l'inharmonicité: on ne parle plus dans ce cas d'harmonique, mais de partiel. La déviation des

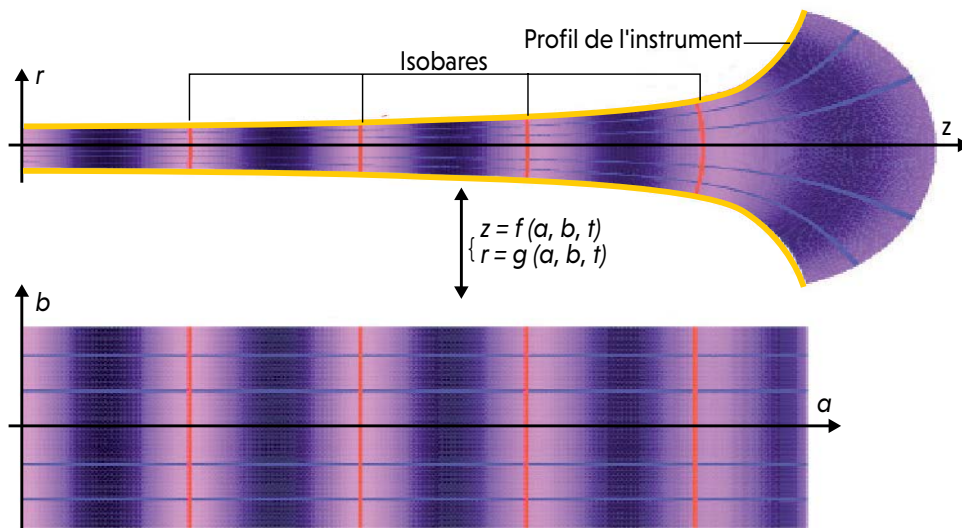
composantes par rapport aux traits de repère (ici, tracés pour le tempérament égal) exprime les déviations aux références de ce tempérament.

L'ensemble offre en fin de compte un outil précis pour le musicien ou une personne travaillant dans le son. De plus, cet outil est utilisable dès le plus jeune âge, par exemple, pour affiner le contrôle de la hauteur de la voix avec des consignes simples telles que «chanter en essayant d'aligner ses propres points lumineux sur une note de la grille».

**THOMAS HÉLIE ET
CHARLES PICASSO**
Laboratoire STMS
(Ircam-CNRS-SU)



L'analyse par Snail du *do* central (*do* 3) d'un piano droit (le point en cyan indique le diapason, ici, 440 Hz).



Les ondes acoustiques qui se propagent dans un tube symétrique autour de son axe Oz représentent un problème à deux dimensions, où les coordonnées pertinentes sont z et r (distance à l'axe). Les isobares sont ici des courbes. En effectuant un changement de coordonnées dynamique de (z, r) en (a, b) , à l'aide de fonctions appropriées f et g qui dépendent du temps et du profil du tube, on peut redresser les isobares. Autrement dit, les isobares deviennent des droites perpendiculaires à l'axe de la coordonnée a , ce qui signifie que la pression est indépendante de la coordonnée b . La dimension du problème se réduit à un, ce qui simplifie les calculs.

- > point clé qui permet au musicien d'interagir avec le modèle physique et d'en jouer comme un instrument virtuel.

Quelle forme peut prendre l'interface homme-machine? Il en existe une multitude, allant des plus simples aux plus élaborées. Les claviers de commande (qui ressemblent à un clavier de piano) sont parmi les plus anciennes et les plus répandues, mais certainement pas les plus adaptées pour transmettre des gestes comme l'évolution d'une pression dans la bouche ou le frottement d'un archet.

Pour les instruments à vent, une alternative a été proposée avec des contrôleurs de souffle, dispositifs qui peuvent évoquer visuellement un instrument à vent mais qui ne produisent pas de son. En revanche des paramètres sont mesurés (par exemple la pression d'air avec laquelle on souffle, le doigté choisi) et envoyés au modèle physique. Ces dernières années, avec l'avènement des smartphones et tablettes, l'écran est également devenu une interface homme-machine pour le pilotage des modèles physiques.

Par exemple, votre doigt frottant l'écran peut devenir un archet qui joue du violon virtuel: la corde que vous frottez à l'écran, la vitesse de déplacement du doigt et son écrasement sont autant d'informations transmises en temps réel au modèle physique simulé sur le téléphone ou la tablette, qui peut alors atteindre le statut d'instrument virtuel complet.

Depuis les premiers synthétiseurs, les pianistes ont eu la chance de pouvoir tirer parti de leur maîtrise du jeu sur clavier. Des pianos hybrides ont même été conçus où, au mode de jeu traditionnel – les marteaux, actionnés par les touches du clavier, frappent des

cordes – s'ajoute un mode hybride, où les marteaux frappent des capteurs qui envoient à un synthétiseur les caractéristiques de la frappe (instant et vitesse du choc). Ainsi, plus de problèmes de voisinage, le jeu au piano peut se faire en silence, un casque sur les oreilles!

DES CLARINETTES HYBRIDES ?

Pour les instruments à anche comme la clarinette et le saxophone, le projet de recherche INVENTHEA (un partenariat CEA List, le Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS et le fabricant Buffet Crampon) cherche aujourd'hui à proposer des instruments hybrides à anche.

Dans le même esprit que pour le piano, l'idée est de pouvoir rendre facilement l'instrument muet, tout en mesurant de manière non intrusive ce que fait l'instrumentiste (souffle, doigté, pincement de l'anche) pour envoyer ces informations à un modèle physique qui assurera la production du son. Les calculs du son pourront être faits par le téléphone dans la poche du musicien. Le son sera alors, selon les envies et le contexte, amplifié ou écouté au casque. Et ce n'est plus de la science-fiction d'imaginer que, demain, un saxophoniste pilotera depuis son saxophone un modèle physique de clarinette, de trompette, ou de violon!

Les progrès permettent aujourd'hui de proposer certaines optimisations aux facteurs d'instruments. Quant aux instrumentistes et aux chanteurs, des nouveaux outils (voir l'encadré page précédente) leur offrent à présent des moyens de visualiser en temps réel le son produit, et qui sont adaptés par exemple au travail de l'écoute, la justesse, l'intonation en solo ou en groupe. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. HÉLIE ET A. AGULLO, *Le Snail-Absolute Tuning: visualiser les sons et accorder des instruments de manière précise et intuitive*, Presse CNRS, 2016. <http://bit.ly/2l3IbB8>

A. CHAIGNE ET J. KERGOMARD, *Acoustique des instruments de musique*, 2^e édition, Belin, 2013.

Le projet INVENTHEA, 2015. <http://bit.ly/2l2oone>

E. RECK MIRANDA ET M. WANDERLEY, *New Digital Musical Instruments: Control And Interaction Beyond the Keyboard*, A-R Editions, 2006.

POUR LA SCIENCE HORS-SERIE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 88 (juil. 15)
réf. DO088



N° 89 (oct. 15)
réf. DO089



N° 90 (janv. 16)
réf. DO090



N° 91 (avr. 16)
réf. DO091



N° 92 (juil. 16)
réf. DO092



N° 93 (oct. 16)
réf. DO093



N° 94 (janv. 17)
réf. DO094



N° 95 (avr. 17)
réf. DO095



N° 96 (août 17)
réf. DO096



N° 97 (nov. 17)
réf. DO097



N° 98 (févr. 18)
réf. DO098



N° 99 (mai 18)
réf. DO099

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,90 €.**

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ x 10,90 € = _____ €
 2^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Offre valable jusqu'au 31/12/2018 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr

Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls> Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR