

pris entre 0 et 11) est obtenue par l'addition modulo 12 de k à tous les nombres de la série P : $P_k = [(a_1+k)^*, (a_2+k)^*, (a_3+k)^*, (a_4+k)^*, (a_5+k)^*, (a_6+k)^*, (a_7+k)^*, (a_8+k)^*, (a_9+k)^*, (a_{10}+k)^*, (a_{11}+k)^*, (a_{12}+k)^*]$. Par exemple, dans le *Concerto pour piano*, *Opus 42*, $P_5 = (5, 0, 4, 7, 6, 2, 8, 10, 3, 11, 1, 9)$.

De la même façon, nous obtenons les transposées par k demi-tons d'une série rétrograde $R_k(P)$, d'une série renversée $I_k(P)$ et d'une série renversée rétrograde $RI_k(P)$. À partir d'une série élémentaire P , nous construisons 47 séries dérivées que nous pouvons regrouper dans une matrice (voir la figure 4). Une composition dodécaphonique est construite uniquement à partir d'une série élémentaire et de ses dérivées. Le compositeur choisit la série selon l'idée qu'il a de l'œuvre.

Une série étant une permutation de 12 nombres, il en existe donc $12!$, soit 479 001 600. Les musiciens se sont intéressés à celles qui avaient certaines propriétés. Prenons, par exemple, la série $P = (0, 2, 7, 5, 10, 9, 3, 4, 11, 1, 8, 6)$: sa série transposée de six demi-tons, soit $P_6 = (6, 8, 1, 11, 4, 3, 9, 10, 5, 7, 2, 0)$ est identique à $R(P)$, aussi cette série élémentaire P a moins de 47 séries dérivées.

Une autre propriété exploitée est la combinaison de deux sous-séries élémentaires. Une série élémentaire $P = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12})$ peut être divisée en deux séries, nommées hexacordes, de six notes : la série $H_1(P) = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$ et la série $H_2(P) = (a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12})$. Les séries A et B se combinent quand $[H_1(A), H_2(B)]$ et $[H_1(B), H_2(A)]$ définissent aussi des séries élémentaires. Chaque série élémentaire se combine à sa série rétrograde. Webern a utilisé cette propriété dans *Les variations pour piano*, *opus 27* (voir la figure 2), fondée sur la série $P = (0, 1, 9, 11, 8, 10, 4, 5, 6, 2, 3, 7)$, avec $mi=0$. Cette série P se subdivise en $H_1(P) = (0, 1, 9, 11, 8, 10)$ et en $H_2(P) = (4, 5, 6, 2, 3, 7)$. Ici, $R(P) = (7, 3, 2, 6, 5, 4, 10, 8, 11, 9, 1, 0)$ se divise aussi en deux hexacordes. Quand la main droite joue le premier hexacorde de P , $H_1(P) = (0, 1, 9, 11, 8, 10)$, suivi du deuxième hexacorde de $R(P)$, la main gauche joue le premier hexacorde de $R(P)$,

suivi du deuxième hexacorde de P . La musique a ainsi la forme d'un palindrome : la main droite joue 0, 1, 9, 11, 8, 10, 10, 8, 11, 9, 1, 0, et la main gauche 7, 3, 2, 6, 5, 4, 4, 5, 6, 2, 3, 7. Quand les mains ont joué chacune leur premier hexacorde, les 12 notes de la gamme ont été émises.

Dans *Pièces pour piano*, *opus 33a* (voir la figure 5), Schoenberg utilise la série élémentaire $P = (0, 7, 2, 1, 11, 8, 3, 5, 9, 10, 4, 6)$, avec $s^p = 0$. $I(P) = (0, 5, 10, 11, 1, 4, 9, 7, 3, 2, 8, 6)$ et $I_5(P) = (5, 10, 3, 4, 6, 9, 2, 0, 8, 7, 1, 11)$. P et $I_5(P)$ sont deux séries combinées, chacune est jouée par une main : là encore, lorsqu'elles ont joué le premier hexacorde, les 12 notes ont été jouées.

Du trio viennois, Anton von Webern est celui qui s'est le plus éloigné de la musique tonale. Ses compositions sont souvent brèves et concises : elles durent seulement quelques minutes. La mélodie traditionnelle y est substituée par des notes individuelles, qui sont parfois attribuées à des instruments différents, comme dans le *Concerto pour neuf instruments*, *opus 24*. La série élémentaire de cette composition, $P = (0, 11, 3, 4, 8, 7, 9, 5, 6, 1, 2, 10)$, avec $Si = 0$, a été choisie pour ses nombreuses symétries internes. Prenons la série des trois premières notes $T = (0, 11, 3)$, $I(T) = (0, 1, 9)$, $R(T) = (3, 11, 0)$ et $RI(T) = (9, 1, 0)$. En décalant, on obtient : $I_1(T) = (1, 2, 10)$, $R_6(T) = (9, 5, 6)$ et $RI_7(T) = (4, 8, 7)$. La série élémentaire P peut être réécrite à partir de ces mini séries $P = (T, RI_7(T), R_6(T), I_1(T))$: chaque mini série est jouée par un instrument différent (voir la figure 3).

Après Schoenberg, Berg et Webern, d'autres compositeurs ont utilisé des séries pour des éléments musicaux autres que les notes, tels la métrique, l'intensité du son, le timbre...

Si «la musique dodécaphonique a été condamnée par les nazis, car son auteur était juif, par les staliniens pour avoir un formalisme cosmopolite bourgeois et par le public pour être différent de tout ce qui existait», elle est sans doute appréciée des mathématiciens.

Carlota SIMOES,
Université de Coimbra, Portugal



3. DANS LE *CONCERTO POUR NEUF INSTRUMENTS*, *OPUS 24*, de Webern, la série élémentaire P (en haut) se décompose en quatre sous-séries de trois notes. À partir de la première sous-série Q , on construit $RI_7(Q)$, $R_6(Q)$ et $I_1(Q)$. P se réécrit ainsi $(Q, RI_7(Q), R_6(Q), I_1(Q))$. Chacune de ces sous-séries est jouée par un instrument différent : la flûte, le hautbois, la clarinette et la trompette.

	1	7	11	2	1	9	3	5	10	6	8	4	
P	0	7	11	2	1	9	3	5	10	6	8	4	R
P ₅	5	0	4	7	6	2	8	10	3	11	1	9	R ₅
P ₁	1	8	0	3	2	10	4	6	11	7	9	5	R ₁
P ₁₀	10	5	9	0	11	7	1	3	8	4	6	2	R ₁₀
P ₁₁	11	6	10	1	0	8	2	4	9	5	7	3	R ₁₁
P ₃	3	10	2	5	4	0	6	8	10	9	11	7	R ₃
P ₉	9	4	8	11	10	6	0	2	7	3	5	1	R ₉
P ₇	7	2	6	9	8	4	10	0	5	1	3	11	R ₇
P ₂	2	9	1	4	3	11	5	7	0	8	10	6	R ₂
P ₆	6	1	5	8	7	3	9	11	4	0	2	10	R ₆
P ₄	4	11	3	6	5	1	7	9	2	10	0	8	R ₄
P ₈	8	3	7	10	9	5	11	1	6	2	4	0	R ₈
	RI	RI ₇	RI ₁₁	RI ₂	RI ₁	RI ₉	RI ₃	RI ₅	RI ₁₀	RI ₆	RI ₈	RI ₄	

4. CETTE MATRICE regroupe les séries dérivées d'une série élémentaire P . À partir de celle-ci, on construit la série rétrograde $R(P)$, la série renversée $I(P)$ et la série renversée rétrograde $RI(P)$. Chacune de ces quatre séries peut être décalée de 1 à 11 demi-tons : on construit ainsi P_k , $R_k(P)$, $I_k(P)$ et $RI_k(P)$, pour k , un entier compris entre 1 et 11. Au total, une série P a 47 séries dérivées.



5. LES *PIÈCES POUR PIANO*, *OPUS 33A*, de Schoenberg, sont élaborées à partir d'une série élémentaire P et de la série renversée décalée de cinq demi-tons $I_5(P)$. Ces deux séries (en haut, à

droite) se combinent : quand les mains gauche et droite ont joué chacune les six premières notes de chaque série, les 12 notes de la gamme chromatique ont été jouées.



Chevaucher les ondes

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

Un mobile rattrapant les ondes qu'il émet au cours de son mouvement en subit les rudes effets. Au contraire, quand il les dépasse, il peut en profiter.

Un avion qui vole à la vitesse du son vibre tant qu'il est difficile à piloter. Depuis 1947, date à laquelle le «mur du son» fut vaincu par l'aviateur américain Charles Yeager, les pilotes savent que les fortes vibrations qui, au passage du mur du son, secouent la carlingue d'un avion non préparé à cette fin, disparaissent dès que sa vitesse excède celle du son.

L'apparition de vibrations au passage de la vitesse de propagation d'une onde est un phénomène général. Il existe ainsi un «mur de l'onde» pour chaque type : un «mur de l'onde mécanique», un «mur de la vague» etc. Quand la vitesse du mobile a dépassé celle de l'onde qu'il vient de chevaucher, celui-ci reprend une allure paisible.

LE MUR DE LA CATÉNAIRE

En 1990, les ingénieurs de la SNCF qui préparaient le record de vitesse du TGV furent confrontés au phénomène : le train ne pouvait dépasser 500 kilomètres par heure car, à cette vitesse, le captage du courant devient difficile à cause des

mouvements qui agitent la caténaire (le câble tendu, suspendu à l'horizontale au-dessus du train où circule le courant). Ce courant alimentant en énergie la motrice est prélevé par le pantographe, un bras articulé situé sur le toit.

Telle une corde de piano, la caténaire vibre verticalement dans une direction perpendiculaire à son axe : des «ondes transverses» s'y propagent. Leur vitesse est d'autant plus grande que la caténaire est légère et qu'elle est tendue (cette vitesse est égale à la racine carrée du quotient de la tension par la masse par unité de longueur de la caténaire).

À titre de comparaison, la corde de piano qui donne le *la* du diapason (440 hertz) est soumise à une tension d'environ 85 kilogrammes. D'une longueur de 42 centimètres et d'un diamètre de un millimètre, une telle corde d'acier (de densité 7,86) pèse environ 6,2 grammes par mètre. Les ondes qui la parcourent avancent à 370 mètres par seconde (1 330 kilomètres par heure) ; elles font ainsi exactement 440 aller et retour par seconde.

Le problème des ingénieurs de la SNCF était que les ondes transverses

qui parcourent une caténaire sont plus lentes que sur une corde à piano et deviennent comparables aux vitesses des trains les plus rapides. Une caténaire de TGV est constituée d'un câble profilé de cuivre pur d'une section de 150 millimètres carrés, soutenu par un câble porteur en bronze. Comme la densité du cuivre est de 8,9, la masse par unité de longueur d'un tel câble est de quelque 1,4 kilogramme par mètre soit environ 200 fois plus que celle de la corde à piano déjà évoquée ; il est mis sous une tension 30 fois plus forte que celle de cette corde, soit 2 600 décanewtons. La vitesse de propagation des ondes transverses le long de la caténaire est, par conséquent, seulement deux fois et demie plus faible que le long de la corde à piano. Elle vaut environ 500 kilomètres par heure.

Toutefois, contrairement au marteau du piano, le pantographe ne frappe pas la caténaire, mais la soulève. Afin de créer le bon contact électrique recherché, il pousse le câble de cuivre vers le haut. Lorsque le train est à l'arrêt, le pantographe soulève le câble avec une force d'environ cinq décanewtons ; la caténaire adopte la forme d'un V renversé dont la pointe est soutenue par le pantographe. La situation est similaire lorsque le train se déplace lentement. La vitesse augmentant, le V renversé dû au pantographe se déforme et des ondulations sont transmises dans la caténaire.

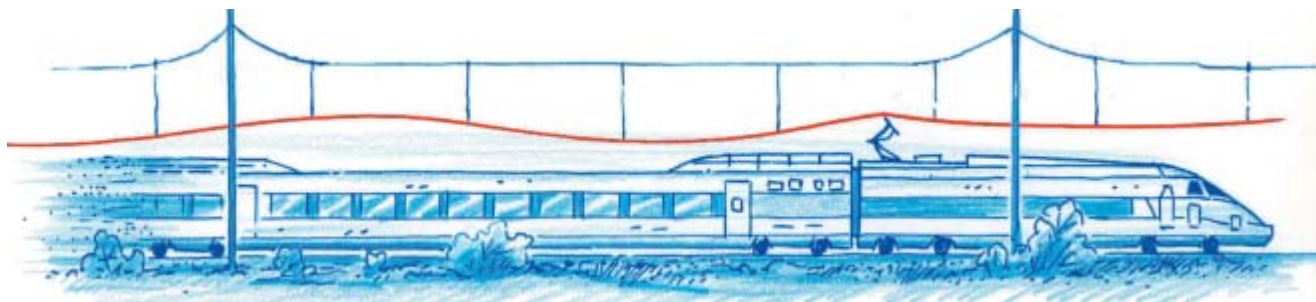
L'amplitude de ces déformations augmente avec la vitesse d'autant plus que l'on s'approche de la vitesse de propagation des ondes. Le soulèvement de la caténaire atteint alors 30 à 35 centimètres par endroits : tout se passe comme si le câble se dérobait devant le pantographe. Le phénomène dégrade le captage du courant jusqu'à entraîner la disjonction des engins de traction, voire des avaries sur les installations!

Ainsi, la vitesse de propagation de ce type d'onde apparaît comme une vitesse limite. Il existe un «mur de la caténaire» analogue au mur du son. Sur une voie de TGV normale, où la vitesse



Illustrations de B. Vacaro

De violents mouvements agitaient la carlingue d'un avion transsonique qui dépassait le mur du son ; ce phénomène fit courir de graves dangers aux pilotes d'essais qui franchirent en premier le mur du son après la Seconde guerre mondiale. Actuellement, la conception des avions supersoniques modernes permet d'atténuer considérablement tous ces effets.



La motrice d'un TGV est alimentée en courant électrique par l'intermédiaire du pantographe, un bras articulé conçu pour soulever le câble électrique suspendu au-dessus du train (la caténaire). Après le passage du TGV, la déformation imposée par le pantographe engendre des oscillations de ce câble, d'autant plus nocives que la vitesse du TGV est proche de la vitesse de propagation des

ondes mécaniques dans la caténaire (500 kilomètres par heure) : à cette vitesse l'onde est stationnaire par rapport au train et les déformations de la caténaire détachent celle-ci du pantographe, ce qui coupe l'alimentation en électricité. La SNCF limite pour cette raison la vitesse des TGV à 70 pour cent de la vitesse de propagation, c'est-à-dire à 350 kilomètres par heure.

de propagation des ondes mécaniques est proche de 500 kilomètres par heure, un bon captage de l'électricité n'est possible que si le TGV ne dépasse pas 470 kilomètres par heure. La SNCF a d'ailleurs spécifié que, lors des trajets normaux, la vitesse de ses TGV ne devait jamais excéder 70 pour cent de la vitesse de propagation des ondes le long de la caténaire. Pour franchir la barre symbolique des 500 kilomètres sur rails il faut donc augmenter la vitesse de propagation des ondes mécaniques le long de la caténaire. Pour y parvenir, les ingénieurs avaient le choix entre deux solutions : abaisser la masse par unité de longueur de la caténaire ou augmenter sa tension. La première solution imposait de changer de matériau ; moins dense que le cuivre, le cadmium aurait fait l'affaire. Cependant, le temps disponible pour préparer le record de vitesse ne suffisait pas pour concevoir, fabriquer et tester des caténaires d'un nouveau type. Aussi, les ingénieurs ont-ils choisi d'augmenter la tension de la caténaire. Après des tests de résistance des installations en place, la caténaire a été retendue sous une plus forte tension, 3 000 décanewtons. Cette précaution a porté la vitesse de propagation des ondes mécaniques à 532 kilomètres par heure sur tout le tronçon du record. Finalement, le 18 mai 1990, la rame 325 a pu atteindre la vitesse record de 515,3 kilomètres par heure. Conformément à ce qu'avaient prévu les ingénieurs, la caténaire ne se souleva pas plus de 30 centimètres.

LE MUR DES ONDES DE GRAVITÉ

Si le «mur de la caténaire» semble infranchissable, la plupart des «murs d'ondes» ne le sont pas. Bien avant le mur du son, un autre mur, moins célèbre avait été franchi, dès le début du XIX^e siècle, sur les canaux anglais : le «mur des ondes de gravité». Les ondes

de gravité sont, par exemple, les vagues sur la mer ou celles que crée un bateau sur une surface d'eau. Leur formation est un phénomène d'analyse délicate, car la vitesse de propagation de telles vagues varie avec leurs longueurs d'onde, lesquelles dépendent à leur tour de leurs conditions de création.

La situation se simplifie toutefois dans un canal peu profond car la vitesse de propagation de toutes les vagues dont la longueur d'onde est supérieure à la profondeur du canal y est constante ; elle est égale à la racine carrée du produit de la profondeur du canal par l'accélération de la pesanteur.

Dans les canaux de faible profondeur (1,2 mètre) en usage en Angleterre au XIX^e siècle pour la navigation de barges à fond plat, cette vitesse excède à peine 12 kilomètres par heure. Si le canal est étroit, les ondes en occupent toute la largeur, et le sillage en V habituellement observé à l'arrière des bateaux ne se développe pas. Les ondes prennent naissance à l'avant du bateau et forment plusieurs ondulations qui suivent la poupe de l'embarcation. Ces ondes se déplacent avec la barge, leurs crêtes restant quasi perpendiculaires au bord du canal. Elles ralentissent le bateau qui doit en permanence gravir la vague qu'il crée devant lui, contrairement au surfeur qui profite de l'énergie de la vague qu'il chevauche en la descendant continuellement.

Comme les déformations d'une caténaire, ces ondulations de la surface de l'eau augmentent en amplitude quand s'accroît la vitesse de l'embarcation. Ces oscillations commencent à se briser et à écumer quand le bateau approche de la vitesse de propagation des ondes dans le canal (12 kilomètres à l'heure). Ce phénomène dissipe de l'énergie, ce qui freine encore plus le bateau. Cet effet est toutefois beaucoup moins gênant que les oscillations de la caténaire ou que les effets aérodynamiques à l'approche du mur du son. Le bateau peut continuer à

naviguer malgré l'apparition de ces vagues turbulentes, et si l'on dispose d'un bon cheval, il est même possible de lui faire dépasser la vitesse des vagues.

Dans un savoureux texte de 1844, l'Anglais Scott Russel raconte comment le phénomène fut découvert par hasard dans le canal de Glasgow à Ardrossan. «Un cheval fougueux tirant une barge de William Houston, l'un des propriétaires du canal, prit peur et partit au galop, tirant le bateau avec lui. Il fut observé par Monsieur Houston à son grand étonnement, que les vagues pleines d'écume de la poupe qui dévastaient les rives habituellement avaient disparu ; le bateau semblait porté sur une eau bien plus lisse qui freinait beaucoup moins le bateau. Monsieur Houston eut l'intelligence de reconnaître l'intérêt de cette découverte pour la société exploitant le canal, dont il était actionnaire. Il s'occupa lui-même d'introduire sur le canal des bateaux naviguant à des vitesses pouvant atteindre neuf miles par heure, ce qui augmenta considérablement les bénéfices des propriétaires du canal».

Une fois le «mur de l'onde» passé, les vagues créées par le bateau sont désordonnées et ont une amplitude très faible. L'eau est à nouveau plate devant le bateau et la résistance à l'avancement fortement réduite.

Le grand physicien Rutherford, à qui l'on demandait s'il suivait la mode dans ses recherches en physique, avait déjà répondu : «Je crée la vague, je ne la suis pas...». Comme le batelier de William Houston.

R. LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **J.-M. COURTY** est physicien, chargé de recherche au CNRS.

La caténaire, au-delà du mur Michel Barberon, *L'album des records La vie du rail* hors série juin 1990

James Lighthill, Waves in Fluids, Cambridge University Press, 1978.