

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication :

2 958 068

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national :

10 01154

⑤1 Int Cl⁸ : G 10 H 1/14 (2006.01), G 10 H 1/053, 3/22

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 24.03.10.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 30.09.11 Bulletin 11/39.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : THUILLIER ETIENNE EDMOND JAC-
QUES — FR.

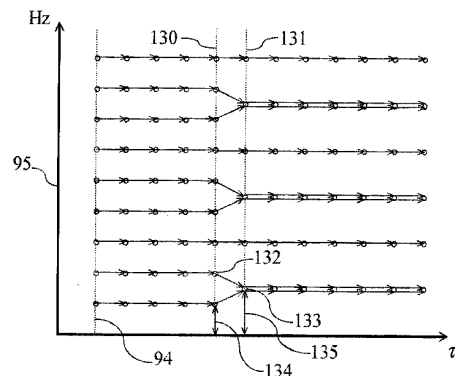
⑦2 Inventeur(s) : THUILLIER ETIENNE EDMOND JAC-
QUES.

⑦3 Titulaire(s) : THUILLIER ETIENNE EDMOND JAC-
QUES.

⑦4 Mandataire(s) : THUILLIER ETIENNE.

⑤4 PROCÉDE ET DISPOSITIF DE SYNTHÈSE D'UN SIGNAL AUDIO SELON UN PHRASE MELODIQUE IMPARTI
SUR UN ORGANE VIBRANT.

⑤7 Procédé et dispositif de synthèse à partir d'un signal
représentatifs de hauteurs de notes selon lequel l'organe vi-
brant est mis en vibration, dans lesquels au moins un signal
tonal de contact est produit pour plusieurs contacts d'excita-
tion impartis sur l'organe vibrant. Pour au moins un con-
tact d'excitation, dit contact de changement de note,
correspondant à une nouvelle hauteur de note (135) dans la
séquence, au moins une composante fréquentielle d'un si-
gnal tonal de contact, dit signal tonal harmonisé, résultant
d'un contact antérieur au contact de changement de note,
est modulée autour d'une fréquence (133) harmonique de la
nouvelle hauteur de note (135) correspondant à un rang
d'harmonique différent d'un rang d'harmonique d'une pré-
cédente fréquence de synthèse (132) de la composante fré-
quentielle. Un signal audio synthétisé est produit par mixage
de chaque signal tonal harmonisé et d'au moins un signal
audio de contact résultant du contact de changement de no-
te.



FR 2 958 068 - A1



PROCÉDÉ ET DISPOSITIF DE SYNTHÈSE D'UN SIGNAL AUDIO
SELON UN PHRASÉ MÉLODIQUE IMPARTI SUR UN ORGANE
VIBRANT

L'invention concerne un procédé de synthèse d'un signal
5 audio, dit signal audio synthétisé, à partir d'un signal, dit signal de note,
représentatif d'une séquence de hauteurs de notes selon lequel l'organe vibrant est
mis en vibration, et d'un signal de séquençement représentatif d'une séquence de
contacts impartis sur un organe vibrant, ladite séquence de contacts comprenant des
10 contacts d'excitation aptes à mettre l'organe vibrant en vibration, procédé dans
lequel au moins un signal audio de contact est produit pour chacun desdits contacts
d'excitation, et plusieurs composantes fréquentielles, dites composantes modulées,
d'au moins un signal audio de contact, dit signal tonal de contact, sont modulées
chacune successivement autour de fréquences, dites fréquences de synthèse, propres
15 chacune à un rang d'harmonique d'une hauteur de note de la séquence. L'invention
s'étend à un dispositif de synthèse.

Le protocole d'interface numérique d'instrument de musique,
dit protocole MIDI, permet de représenter le jeu d'un instrumentiste sous forme
d'une séquence d'événements dans le temps, décrits chacun selon un nombre
prédéterminé de descripteurs (instant de déclenchement d'un son, hauteur de note,
20 intensité...). Ce protocole est particulièrement adapté pour décrire le jeu d'un
claviériste et a été très largement adopté à ce titre.

On connaît des appareils, dits convertisseurs MIDI
traditionnels, adaptés pour mettre en œuvre une conversion audio vers MIDI, en vue
de pouvoir commander un synthétiseur MIDI compatible, à partir d'instruments de
25 musique dotés d'organes vibrants (par exemple des cordes de guitare) entrant en
vibration libre suite à la réalisation de contacts d'excitation impartis sur l'organe
vibrant. Ces appareils comprennent des moyens de raccordement avec au moins un
micro monté sur l'instrument de musique, le micro fournissant pour chaque organe
vibrant, un signal, dit signal de microphone, représentatif de la vibration de l'organe
30 vibrant.

Les convertisseurs MIDI traditionnels produisent des messages MIDI de commande d'un synthétiseur compatible MIDI à partir du signal de microphone. Pour ce faire, les convertisseurs MIDI traditionnels sont adaptés pour détecter à tout moment si le signal de microphone répond à des critères
5 prédéfinis de détection d'un contact d'excitation imparti sur l'organe vibrant, déclenchant à ce titre un son synthétisé. En outre, les convertisseurs MIDI traditionnels sont adaptés pour détecter à tout moment pendant la vibration libre de l'organe vibrant, si le signal de microphone répond à des critères prédéfinis de détection d'un contact d'étouffement total imparti sur l'organe vibrant par
10 l'instrumentiste, déclenchant à ce titre une interruption d'un son synthétisé en cours. Le cas échéant, une interruption du son synthétisé en cours est par ailleurs commandée suite à un nouveau contact d'excitation détecté succédant directement à un contact d'excitation détecté précédent, sans détection préalable d'un contact d'étouffement total.

15 À titre d'exemple, on connaît des convertisseurs MIDI traditionnels mettant en œuvre une détection de contacts d'excitation, dite détection d'attaque, dans laquelle une valeur détectée de variation globale de l'intensité de la vibration de l'organe vibrant est comparée à un seuil prédéterminé d'amplification de l'intensité vibratoire, dit seuil de détection d'attaque, au-delà duquel un nouveau
20 son synthétisé est produit.

Il existe un besoin d'optimiser la sensibilité de la détection des contacts d'excitation, sans que cela ne compromette la fidélité de la représentation du jeu de l'instrumentiste formée par les sons synthétisés.

25 Une traduction fidèle du jeu de l'instrumentiste en sortie du synthétiseur compatible MIDI n'est obtenue que lorsque l'instrumentiste exécute des contacts d'excitation selon une technique d'attaque de note de l'instrument de musique adaptée compte tenu des critères de détection d'attaque du convertisseur MIDI traditionnel.

30 L'exécution successive de pincements d'une corde de guitare permet, à titre d'exemple, de produire à l'aide d'un convertisseur MIDI traditionnel pour guitare et d'un synthétiseur compatible MIDI, une séquence de sons

synthétisés représentatifs de la séquence de pincements réalisée. Toutefois, chaque pincement doit être exécuté proprement et distinctement sous peine de voir certains pincements dépourvus de conséquences audibles en sortie du synthétiseur compatible MIDI.

5 Un réglage du seuil de détection d'attaque doit être opéré en vue d'améliorer la sensibilité de la détection d'attaque du convertisseur MIDI traditionnel pour tenir compte de contacts d'excitation impartis sur l'organe vibrant, entraînant une amplification globale de l'intensité vibratoire relativement faible.

10 Un tel réglage entraîne toutefois une augmentation du risque de détection intempestive d'un contact d'excitation alors que l'instrumentiste n'a pas touché l'organe vibrant. En effet, un dépassement du seuil de détection d'attaque risque alors de se produire sous l'effet de composantes vibratoires non stationnaires en vibration libre (hors contact avec l'organe vibrant) : phénomènes de battements de la vibration de la corde, légère excitation de l'organe vibrant par vibration sympathique, légère excitation de l'organe vibrant par absorption d'une
15 onde sonore se propageant dans l'air ou transmise à l'organe vibrant au niveau de points de fixation de l'organe vibrant sur l'instrument de musique... Le son synthétisé intempestif correspondant est d'autant plus malvenu qu'il interrompt de manière inopinée un son synthétisé précédent éventuellement en cours de
20 production.

En outre, la détection effective de contacts d'excitation exécutés selon d'autres techniques d'attaque que par pincement de la corde, en particulier des techniques d'ornementation (ornementations rythmiques, frottements impartis sur la corde...), est incertaine. En tout état de cause, les spécifications du
25 protocole MIDI ne prévoient pas de traduire les nuances de jeu correspondant aux techniques d'ornementation précitées, les nuances correspondant aux différentes techniques d'attaque de la corde (frappe, pincement en butée dit apoyando, pincement en traction dit tirando, pincement au moyen d'un médiator...), les nuances correspondant aux différents endroits sur la corde où sont exécutées
30 lesdites techniques d'ornementation et d'attaque... En particulier, l'exécution de techniques d'ornementation est susceptible d'entraîner la production de sons

synthésisés souvent intempestifs du point de vue de l'instrumentiste, en tout cas très peu réalistes, c'est-à-dire aucunement représentatifs du son attendu par l'instrumentiste compte tenu de la manipulation réalisée sur la corde, donc tout à fait inopportuns.

5 En particulier, on connaît des convertisseurs MIDI traditionnels mettant en œuvre une détection de la hauteur de vibration de l'organe vibrant à partir du signal de microphone en vue de produire une séquence de sons synthésisés traduisant le phrasé mélodique imparti sur l'organe vibrant par l'instrumentiste. Une telle détection est avantageusement mise en œuvre pour des
10 instruments dont la hauteur de note est déterminée par une manipulation directe de l'organe vibrant (une corde de guitare par exemple), sans l'aide d'un mécanisme interposé entre l'instrumentiste et l'organe vibrant. En effet, une synthèse représentative des changements de hauteur note et des modulations de chaque hauteur de note exécutés par l'instrumentiste est dès lors mise en œuvre avec un
15 encombrement minimal de l'instrument de musique. A titre d'exemple, dans le cas de la guitare, lesdits changements de hauteur de note peuvent être réalisés par des techniques de jeu de la main gauche et lesdites modulations des hauteurs de notes peuvent être réalisées par traction latérale de la corde dans le cas d'une guitare.

Or, tout contact imparti sur l'organe vibrant introduisant des
20 composantes vibratoires inharmoniques et/ou modifiant les amplitudes relatives de composantes vibratoires harmoniques de l'organe vibrant, est susceptible d'entraîner un changement intempestif de la hauteur de note détectée alors que l'instrumentiste n'a pas effectué de geste volontaire pour une telle modification. A titre d'exemple, un contact de l'organe vibrant en vibration libre au niveau d'un
25 nœud de vibration d'un mode vibratoire basse fréquence, par exemple par impact d'un doigt à cet endroit, est susceptible d'entraîner un changement intempestif de la hauteur de note détectée pour le reste de la durée de la vibration de la corde hors contact détecté supplémentaire. En outre, les composantes de vibration transitoires introduites par tout contact, bref ou prolongé, imparti sur la corde sont susceptibles
30 d'entraîner des changements intempestifs temporaires de la hauteur de note détectée. Un changement intempestif de la hauteur de note détectée est d'autant plus

malvenu qu'ils se produit en cours de production d'un son synthétisé antérieurement déclenché alors que ce dernier n'est pas interrompu par le contact ayant entraîné le changement intempestif. En effet, le changement intempestif entraîne alors un effet de changement intempestif de la hauteur de note dudit son synthétisé, ou un effet sonore, dit rupture intempestive de résonance, de variation passagère mais soudaine et disgracieuse du timbre dudit son synthétisé. Il en résulte, dans un cas comme dans l'autre, une diminution de la fidélité de la représentation du jeu de l'instrumentiste formée par les sons synthétisés.

Compte tenu de ce qui précède, l'instrumentiste est contraint de dépouiller son jeu de tout contact d'excitation non adapté aux critères prédéfinis de détection d'attaque, en particulier des contacts susceptibles d'entraîner un changement intempestif de la hauteur de note détectée, en vue de pouvoir contrôler tout à fait la synthèse. Il en résulte une diminution du potentiel expressif de l'instrument de musique. Pour prendre la mesure du degré d'altération du discours musical, il suffit par exemple d'imaginer ce que deviendrait n'importe quel morceau de guitare après qu'il ait été dépouillé des effets précités : une succession de sons déclenchés d'intensités et de durées variables, mais qui présentent toutes le même timbre. Les synthétiseurs commandés au moyen de convertisseurs MIDI traditionnels héritent ainsi du caractère très mécanique et désincarné des claviers électroniques bon marché.

Il existe donc un besoin de produire pour tout contact d'excitation imparti sur l'organe vibrant, des sons synthétisés représentant de façon fidèle et réaliste ledit contact d'excitation, sans limites quant à la technique de jeu employée. Outre la guitare donnée à titre d'exemple, ce problème se ressent plus généralement pour les instruments de musiques dépourvus de mécanismes interposés entre l'organe vibrant et l'instrumentiste de sorte qu'une très grande liberté d'exécution est accordée à l'instrumentiste en vue d'exciter l'organe vibrant. Les possibilités de jeu ne sont alors plus dénombrables, l'instrumentiste pouvant librement choisir les manipulations à effectuer, les objets avec lesquels réaliser ces manipulations le cas échéant....

L'invention vise à pallier ces inconvénients.

6

En particulier, l'invention vise à permettre l'exécution de toute technique instrumentale traditionnelle de l'instrument de musique sans qu'il n'en résulte d'effets de rupture intempestive de résonance ou d'effet de changement intempestif de la hauteur de note des sons synthétisés. En particulier, l'invention
5 vise à éviter tout rallongement d'un délai de détection de la hauteur de note en cours.

En outre, l'invention vise à permettre de tenir compte d'un plus grand nombre de contacts d'excitation impartis sur l'organe vibrant sans compromettre la fidélité de la représentation du jeu de l'instrumentiste formée par
10 les sons synthétisés.

En outre, l'invention vise à effectuer cette traduction de manière plus représentative, pour chacun desdits contacts d'excitation impartis en tenant compte des nuances avec lesquelles des techniques d'attaque et des techniques d'ornementation peuvent être exécutées sur l'organe vibrant.

15 L'invention vise en outre à procurer une telle solution pouvant être mise en œuvre à un prix de revient économique, notamment pouvant être mise en œuvre sur un dispositif électronique et/ou informatique constitué de composants bon marché, en particulier des composants informatiques et/ou électroniques génériques du commerce.

20 L'invention vise aussi à proposer un dispositif et un procédé de synthèse d'un signal audio à partir d'une séquence de contacts d'excitation impartis sur un organe vibrant et aptes à mettre l'organe vibrant en vibration, qui soient compatibles avec une mise en œuvre en temps réel, sans délai rédhibitoire entre un contact impartis sur l'organe vibrant et son effet dans le signal audio de
25 synthèse.

L'invention vise aussi à atteindre ces buts d'une façon techniquement simple à développer, notamment pour plusieurs catégories d'instruments de musique sans surcoûts significatifs pour son adaptation entre différentes catégories d'instruments, par exemple la guitare, la guitare basse, le
30 banjo, la mandoline le violon, le violoncelle, la contrebasse, l'alto etc.

Pour ce faire, l'invention concerne un procédé de synthèse d'un signal audio, dit signal audio synthétisé, à partir d'un signal, dit signal de note, représentatif d'une séquence de hauteurs de notes selon lequel l'organe vibrant est mis en vibration, et d'un signal de séquençement représentatif d'une séquence de contacts impartis sur un organe vibrant, ladite séquence de contacts comprenant des contacts d'excitation aptes à mettre l'organe vibrant en vibration, procédé dans lequel :

- 5 - au moins un signal audio de contact est produit pour chacun desdits contacts d'excitation,
- 10 - plusieurs composantes fréquentielles, dites composantes modulées, d'au moins un signal audio de contact, dit signal tonal de contact, sont modulées chacune successivement autour de fréquences, dites fréquences de synthèse, propres chacune à un rang d'harmonique d'une hauteur de note de la séquence,
- 15 caractérisé en ce que :
 - pour au moins un contact d'excitation, dit contact d'excitation et de changement de note, entraînant une variation du signal de note vers une nouvelle hauteur de note dans la séquence, au moins une composante modulée, dite composante canalisée, d'un signal tonal de contact, dit signal tonal harmonisé, résultant d'un contact d'excitation antérieur audit contact d'excitation et de changement de note, est modulée autour d'une fréquence harmonique, dite nouvelle fréquence de synthèse, de la nouvelle hauteur de note, correspondant à un rang d'harmonique différent du rang d'harmonique d'une précédente fréquence de synthèse de la composante canalisée,
 - 20
 - 25 - le signal audio synthétisé après ledit contact d'excitation et de changement de note est produit par mixage de chaque signal tonal harmonisé et du signal audio de contact dudit contact d'excitation et de changement de note.

L'invention permet dès lors de produire en réponse audit contact d'excitation et de changement de note, un nouveau signal tonal de contact apportant au signal audio synthétisé des contributions fréquentielles réparties selon les fréquences harmoniques de la nouvelle hauteur de note détectée, sans nécessiter

d'interrompre tout signal tonal de contact résultant d'un contact d'excitation antérieur au contact d'excitation et de changement de note. En effet, les composantes modulées d'un signal tonal harmonisé selon l'invention sont, suite au changement de hauteur de note, réparties en fréquence conformément à la nouvelle

5 hauteur de note de sorte qu'elles se combinent harmonieusement avec tout signal tonal résultant du contact d'excitation de changement de note. Cette répartition peut être procurée grâce à l'invention en modulant de façon modérée chaque composante canalisée suite audit changement de hauteur de note. Dès lors, l'invention permet de prévenir toute rupture intempestive de résonance ou effet de changement

10 intempestif de la hauteur de note du signal tonal harmonisé consécutif à un changement intempestif de hauteur de note par effet du contact d'excitation et de changement de note sur l'organe vibrant.

Compte tenu de ce qui précède, l'invention permet de tenir compte d'un plus grand nombre de contacts d'excitation impartis sur l'organe

15 vibrant, sans compromettre la fidélité de la représentation du jeu de l'instrumentiste formée par les sons synthétisés.

Dans tout le texte, l'expression « fréquence harmonique » est, sauf mention contraire, utilisée selon son acception la plus large, faisant référence à des fréquences qui ne sont pas nécessairement d'exactes multiples entiers d'une

20 fréquence fondamentale correspondante, compte tenu de phénomènes d'inharmonie éventuels. Par ailleurs, la fréquence fondamentale forme selon cette terminologie, une fréquence d'harmonique de rang 1.

Avantageusement et selon l'invention, le signal de note est produit à partir d'un signal, dit signal source de détection de hauteur de note, représentatif de la vibration de l'organe vibrant. Plus particulièrement,

25 avantageusement et selon l'invention, le signal de note est produit par détection de hauteur de note au fur et à mesure de la réception du signal source de détection de hauteur de note, en particulier par exécution itérative d'une étape de détection de hauteur du signal source de détection de hauteur de note.

30 Dans tout le texte, le terme « signal » est utilisé selon son acception fonctionnelle sans limite quant au mode de représentation du signal

employé. En particulier, une (ou plusieurs) voie(s) analogique(s) et/ou numérique(s) de transmission peuvent être utilisée(s) pour chaque signal selon l'invention. A titre d'exemple, un signal audiofréquence peut être transmis par l'entremise de plusieurs canaux de transmissions analogiques chacun dédié pour la transmission d'une sous

5 bande audiofréquence du signal. Par ailleurs, chaque signal peut être issu d'une ou plusieurs sources. A titre d'exemple, signal source de détection d'excitation peut être issu de plusieurs circuits microphoniques captant la vibration de l'organe vibrant.

Avantageusement et selon l'invention, la nouvelle fréquence

10 de synthèse est choisie de sorte qu'elle se trouve, parmi les fréquences harmoniques de la nouvelle hauteur de note, directement voisine de ladite précédente fréquence de synthèse. En particulier, avantageusement et selon l'invention, la nouvelle fréquence de synthèse est choisie de façon à être, parmi les fréquences harmoniques de la nouvelle hauteur de note, la plus proche fréquence harmonique de la nouvelle

15 hauteur de note par rapport à ladite précédente fréquence de synthèse, de préférence selon une échelle logarithmique de la fréquence.

Avantageusement et selon l'invention, plusieurs composantes modulées du signal tonal harmonisé, dites composantes de bas rangs, dont les fréquences de synthèse, dites fréquences de synthèses précédentes, en vigueur pour

20 une hauteur de note précédant la nouvelle hauteur de note dans la séquence, sont inférieures à la fréquence de synthèse, en vigueur pour ladite précédente hauteur de note, d'une autre composante modulée du signal tonal harmonisé, dite composante de haut rang, sont modulées chacune vers une fréquence harmonique de ladite nouvelle hauteur de note, choisie de façon à se trouver, parmi les fréquences

25 harmoniques de la nouvelle hauteur de note, directement voisine de la fréquence de synthèse précédente de la composante de bas rang.

Avantageusement et selon l'invention, au moins une composante de haut rang est modulée vers une fréquence harmonique de la nouvelle hauteur de note choisie de façon à maintenir constant l'écart entre les rangs

30 d'harmoniques des fréquences de synthèse de la composante de haut rang et d'une composante de bas rang associée.

Avantageusement et selon l'invention, un signal, dit signal de variation de note, représentatif d'un taux de variation de hauteur de note est produit à partir du signal de note, et la nouvelle fréquence de synthèse est choisie parmi les fréquences harmoniques de la nouvelle hauteur de note selon le signal de variation
5 de note.

Avantageusement et selon l'invention, plusieurs composantes modulées du signal tonal harmonisé sont modulées chacune :

- selon des données, dites données de rang de synthèse, représentatives d'un précédent rang d'harmonique, dit rang de synthèse, auquel
10 correspond une précédente fréquence de synthèse de la composante modulée,

- et selon des données préenregistrées comprenant, pour une pluralité d'intervalles prédéfinis de taux de variation de hauteur de note, des données représentatives de valeurs de mise à jour de rangs de synthèse.

Avantageusement et selon l'invention, le signal de séquencement est produit à partir d'un signal, dit signal source de détection
15 d'excitation, représentatif de la vibration de l'organe vibrant.

Avantageusement et selon l'invention, le signal de séquencement est également représentatif d'une intensité d'excitation de chaque contact d'excitation. Plus particulièrement, avantageusement et selon l'invention, le
20 signal de séquencement est produit à partir d'un signal, dit signal source de détection d'excitation, représentatif de la vibration de l'organe vibrant, de sorte que le signal de séquencement est représentatif, pour différentes bandes de fréquences, dites bandes d'excitation, du signal source de détection d'excitation, d'au moins une valeur d'intensité d'excitation de chaque contact d'excitation dans chacune desdites
25 bandes d'excitation. Plus particulièrement, avantageusement et selon l'invention, le signal de séquencement est en outre représentatif d'au moins une valeur de phase d'excitation de chaque contact d'excitation dans chaque bande d'excitation.

Plus particulièrement, avantageusement et selon l'invention, le signal de séquencement est produit par détection d'excitation au fur et à mesure
30 de la réception du signal source de détection d'excitation, en particulier par exécution itérative d'une étape de détection d'excitation du signal source de

détection d'excitation. En particulier, le signal source de détection d'excitation peut être formé du signal source de détection de hauteur de note.

Avantageusement et selon l'invention, le signal de note est produit à partir d'un signal représentatif de la vibration de l'organe vibrant selon un octave de détection de hauteur de note.

Avantageusement et selon l'invention, le signal source de détection de hauteur de note est représentatif de la vibration d'un organe vibrant dépourvu d'organe amortisseur rapporté.

Avantageusement et selon l'invention, le signal source de détection de hauteur de note est représentatif d'une corde montée sous tension.

L'invention s'étend à un dispositif de mise en œuvre d'un procédé selon l'invention.

L'invention concerne donc un dispositif de synthèse comprenant au moins une unité de traitement adapté pour synthétiser un signal audio, dit signal audio synthétisé, à partir d'un signal, dit signal de note, représentatif d'une séquence de hauteurs de notes selon lequel l'organe vibrant est mis en vibration, et d'un signal de séquençement représentatif d'une séquence de contacts impartis sur un organe vibrant, ladite séquence de contacts comprenant des contacts d'excitation aptes à mettre l'organe vibrant en vibration, caractérisé en ce que l'unité de traitement est adaptée pour :

- produire au moins un signal audio de contact, pour chacun desdits contacts d'excitation,

- moduler plusieurs composantes fréquentielles, dites composantes modulées, d'au moins un signal audio de contact, dit signal tonal de contact, chacune successivement autour de fréquences, dites fréquences de synthèse, propres chacune à un rang d'harmonique d'une hauteur de note de la séquence,

caractérisé en ce que :

- pour au moins un contact d'excitation, dit contact d'excitation et de changement de note, entraînant une variation du signal de note vers une nouvelle hauteur de note dans la séquence, l'unité de traitement est adapté

pour pouvoir moduler au moins une composante modulée, dite composante canalisée, d'un signal tonal de contact, dit signal tonal harmonisé, résultant d'un contact d'excitation antérieur audit contact d'excitation et de changement de note, autour d'une fréquence harmonique, dite nouvelle fréquence de synthèse, de la
5 nouvelle hauteur de note, correspondant à un rang d'harmonique différent du rang d'harmonique d'une précédente fréquence de synthèse de la composante canalisée,

- l'unité de traitement est adapté pour produire, après tout contact d'excitation et de changement de note, le signal audio synthétisé par mixage de chaque signal tonal harmonisé correspondant et du signal audio de contact dudit
10 contact d'excitation et de changement de note.

Avantageusement et selon l'invention, l'unité de traitement est apte à mettre en œuvre un procédé de synthèse conforme à l'invention.

L'invention s'étend à un support d'enregistrement - notamment du type amovible (CD-ROM, DVD, Clé USB, disque dur électronique
15 externe)- adapté pour pouvoir être lu dans un lecteur d'un dispositif informatique, et sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur adapté pour pouvoir être chargé en mémoire vive du dispositif informatique lorsque le support d'enregistrement est chargé dans ledit lecteur, caractérisé en ce que le programme d'ordinateur comprend des portions de code de programme pour l'exécution des étapes d'un
20 procédé de synthèse d'un signal audio selon l'invention lorsque le programme d'ordinateur est chargé en mémoire vive du dispositif informatique.

L'invention s'étend à un programme d'ordinateur comprenant des portions de code de programme pour l'exécution des étapes d'un procédé de synthèse d'un signal audio selon l'invention lorsque ledit programme est exécuté
25 sur un dispositif informatique.

L'invention concerne également un procédé, un dispositif, un support d'enregistrement et un programme d'ordinateur caractérisés en combinaison par tout ou partie des caractéristiques mentionnées ci-dessus ou ci-après.

D'autres, buts caractéristiques et avantages de l'invention
30 apparaissent à la lecture de la description suivante qui se réfère aux figures

annexées représentant des modes de réalisation donnés à titre d'exemple non limitatifs, et dans lesquelles :

5 - la figure 1 est une représentation schématique d'un exemple de dispositif selon un mode préféré de réalisation de l'invention, agencé en configuration de fonctionnement avec un amplificateur audio et une guitare dotée d'un micro hexaphonique,

- la figure 2 est une représentation schématique détaillée de composants électroniques et informatiques embarqués équipant le dispositif de la figure 1,

10 - la figure 3 est un diagramme schématique fonctionnel d'un circuit de détection équipant un périphérique synthétiseur du dispositif de la figure 1,

- la figure 4 est un diagramme schématique fonctionnel d'un circuit de synthèse équipant ledit périphérique synthétiseur,

15 - la figure 5 est une représentation schématique dans le plan complexe de valeurs d'échantillons fréquentiels de mesure et de valeurs d'échantillons fréquentiels prédits correspondants, illustrant un principe de détection d'atténuation mis en œuvre par le circuit de détection de la figure 3, lesdites valeurs étant données à titre d'exemple illustratif et non limitatif,

20 - la figure 6 est une représentation schématique de valeurs d'échantillons numériques fréquentiels d'atténuation et de valeurs d'amplitude d'échantillons numériques fréquentiels d'excitation, produits pour différents bandes de fréquences d'une représentation en fréquence, lesdites valeurs étant données à titre d'exemple illustratif et non limitatif,

25 - la figure 7 est un schéma représentant la forme d'onde d'un signal numérique de mesure, et la forme d'onde d'un signal de prédiction correspondant produit par le circuit de détection de la figure 3 à partir du signal numérique de mesure, lesdites formes d'onde étant données à titre d'exemple illustratif et non limitatif,

30 - la figure 8 représente les formes d'ondes d'une première partie et du début d'une deuxième partie d'un signal numérique filtré à partir duquel

sont produites des données de timbre enregistrées dans une mémoire du circuit de synthèse de la figure 4, lesdites formes d'onde étant données à titre d'exemple illustratif et non limitatif,

- la figure 9 représente un schéma algorithmique selon lequel
5 s'exécutent des modules générateurs du circuit de synthèse de la figure 4,

- la figure 10 représente un schéma algorithmique d'une étape de modifications en fréquence exécutée itérativement par chaque module générateur,

- la figure 11 représente des valeurs précédentes de fréquences
10 de transposition de contributions fréquentielle d'un son modifié en fonction d'un taux courant de variation d'une valeur fondamentale détectée,

- la figure 12 est un graphique représentant les trajectoires en fréquence de plusieurs contributions fréquentielles basses fréquences d'un son modifié produit par un module générateur du circuit de synthèse au fur et à mesure
15 d'itérations successives, lesdites trajectoires étant données pour un premier exemple illustratif et non limitatif,

- la figure 13 est un graphique représentant les trajectoires en fréquence des contributions fréquentielles basses fréquences d'un son modifié, données pour un deuxième exemple illustratif et non limitatif,

- la figure 14 est un schéma représentant des modifications en fréquence du signal numérique filtré de la figure 8, réalisées par un module générateur, lesdites modifications étant données à titre d'exemple illustratif et non
20 limitatif,

- la figure 15 est un schéma représentant la forme d'onde du
25 signal numérique de mesure de la figure 7, et la forme d'onde d'un signal de synthèse tonale résultant produit par le circuit de synthèse de la figure 4, lesdites formes d'ondes étant données à titre d'exemple illustratif et non limitatif,

- la figure 16 est un schéma représentant la forme d'onde d'un
30 signal de perturbation produit à partir du signal numérique de mesure et du signal de prédiction de la figure 7, ainsi que la forme d'onde d'un signal de synthèse inharmonique produit à partir du signal de perturbation et de la première partie du

signal filtré de la figure 8, lesdites formes d'ondes étant données à titre d'exemple illustratif et non limitatif.

La figure 1 représente un dispositif 3 selon un mode préféré de réalisation de l'invention raccordé à un micro hexaphonique équipant une guitare 1 au moyen d'un câble 4 de transmission adéquat, ledit micro hexaphonique étant adapté pour transmettre un signal microphonique pour chaque corde 2 de la guitare 1 par l'intermédiaire du câble 4 de transmission, ledit signal microphonique étant représentatif de la vibration de la corde. En particulier, le micro hexaphonique peut être de type comprenant un capteur piézoélectrique, électromagnétique ou optique pour chaque corde, par exemple un micro hexaphonique commercialisé par RMC Pickup Co. (USA), Graph Tech Guitar Labs (Canada), Roland corp. (Japon)...

Le dispositif 3 de la figure 1 comprend un boîtier 5 rigide dans lequel est ménagée une prise 6 équipée d'un circuit 200 de réception des signaux analogiques de mesure. Le boîtier 5 renferme une unité 148 centrale informatique, équipée d'au moins un processeur 150 s'exécutant selon un programme informatique embarqué chargé dans une mémoire 151 vive associée au processeur 150. En particulier, le programme informatique embarqué peut être enregistré dans une mémoire 152 de masse et chargé en mémoire vive suite à une mise sous tension du dispositif 3.

Le boîtier 5 renferme en outre, pour chaque corde 2 de la guitare, un périphérique 136 synthétiseur équipé d'un circuit 137 de détection. Chaque périphérique 136 synthétiseur de l'exemple est en outre équipé d'un circuit 138 convertisseur analogique/numérique électriquement relié au circuit 137 de détection et à un port de sortie du circuit 200 de réception délivrant le signal microphonique correspondant. De façon traditionnelle, le circuit 138 convertisseur analogique/numérique est adapté pour recevoir le signal microphonique de la corde 2, échantillonner et quantifier ledit signal microphonique, et transmettre un signal 7 numérique de mesure résultant au circuit 137 de détection. A noter que seuls trois périphériques synthétiseurs sont représentés dans la figure 2 par souci de clarté.

Le dispositif 3 de l'exemple comprend en outre une prise 63 de branchement d'un support 64 de mémoire amovible, ménagée dans le boîtier 5

rigide, et des moyens 65 de saisie -pédale(s), molette(s), bouton(s), écran(s)...-, ladite prise et lesdits moyens de saisie étant reliés à l'unité 148 centrale au moyen de bus 153 de données et d'interfaces 220 d'entrée/sortie correspondantes. L'unité 148 centrale est adaptée pour s'exécuter dans un mode de chargement de sons 5 préenregistrés, dans lequel un fichier numérique de son préenregistré peut être sélectionné, par l'intermédiaire des moyens 65 de saisie, pour chaque corde 2 de la guitare parmi plusieurs fichiers numériques préalablement enregistrés par tout moyen dans le support 64 de mémoire amovible. L'unité centrale 148 informatique lit les données numériques du fichier dans le support 64 de mémoire amovible et 10 transmet des échantillons, dits échantillons de source sonore, représentatifs de la forme d'onde du son correspondant, dit son sélectionné, au périphérique 136 synthétiseur correspondant, par l'intermédiaire d'un bus 149 de données reliant l'unité 148 centrale informatique et ledit périphérique 136 synthétiseur.

Chaque périphérique 136 synthétiseur de l'exemple comprend 15 en outre un circuit 141 de prétraitement et un circuit 68 de synthèse, et est adapté pour s'exécuter, suite à la réception desdits échantillons de source sonore, dans un mode de chargement du son sélectionné. Dans ce mode, ledit circuit 141 de prétraitement produit des données de timbre à partir des échantillons de source sonore et transmet lesdites données de timbre à un circuit 68 de synthèse qui les 20 enregistre dans une mémoire 139 équipant ledit circuit 68 de synthèse.

Dans l'exemple, chaque périphérique 136 synthétiseur est en outre adapté pour fonctionner, suite à une commande correspondante saisie par l'entremise des moyens 65 de saisie, et transmise par l'unité 148 centrale informatique, dans un mode interactif de synthèse sonore dans lequel le 25 périphérique 136 synthétiseur synthétise en temps réel un signal de séquence sonore (non représenté) à partir du signal 7 numérique de mesure et des données de timbre chargées dans la mémoire 139 du circuit 68 de synthèse.

Le circuit 137 de détection de l'exemple comprend un module 8 de transformée en fréquence mettant en œuvre une méthode de transformée de 30 fourrier numérique à fenêtre glissante, le module 8 produisant, pour chacun de plusieurs intervalles de temps successifs du signal 7 numérique de mesure, des

échantillons fréquentiels numériques de mesure descriptifs d'une représentation en fréquence du signal 7 numérique de mesure dans l'intervalle de temps, dit fenêtre d'observation. De préférence, une transformée de fourrier rapide est mise en œuvre itérativement au fur et à mesure de l'acquisition du signal 7 numérique de mesure, selon des fenêtres 10, 11, 13, d'observations successives se chevauchant décalées selon un pas, dit pas de décalage, correspondant à un nombre prédéterminé d'échantillons du signal 7 numérique de mesure.

De préférence, la transformée de fourrier est mise en œuvre selon des fenêtres 10, 11, 13, d'observation de longueur plusieurs fois supérieure à une période fondamentale nominale à vide de la corde 2 correspondant au périphérique 136 synthétiseur, de façon à permettre d'utiliser une fonction de fenêtrage améliorant l'efficacité de la séparation des composantes fréquentielles harmoniques de la corde obtenue dans la transformée en fréquence. A titre indicatif, l'usage d'une fenêtre de Hann ou de Hamming suppose une longueur de fenêtre d'observation au moins deux fois supérieure à la période fondamentale de la corde à vide, l'usage d'une fenêtre de Blackman-Harris à quatre termes suppose une longueur au moins quatre fois supérieure... Des valeurs nulles peuvent être ajoutées suite à la séquence d'échantillons, conformément à une technique traditionnelle, dite méthode de concaténation avec des zéros, d'interpolation de la représentation en fréquence. Cette méthode permet de réduire avantageusement le pas d'échantillonnage fréquentiel dans la bande de Shannon-Nyquist.

Compte tenu de ce qui précède, chaque échantillon fréquentiel numérique de mesure est représentatif d'une composante fréquentielle du signal 7 numérique de mesure logée dans une bande de fréquences dont la largeur correspond au lobe principal de la fonction de fenêtrage.

Le circuit 137 traitement comprend en outre un module 9 de détection de hauteur de note adapté pour produire un signal numérique, dit signal de fondamentale, à partir du signal 7 numérique de mesure, de sorte que ledit signal de fondamentale est représentatif d'une valeur de fondamentale détectée courante pour chaque fenêtre d'observation de la transformée en fréquence.

Dans l'exemple, le module 9 de détection de hauteur de note comprend un sous module (non représenté) de détection de hauteur de note adapté pour fournir à chaque itération une valeur préliminaire de fondamentale détectée pour cette itération. En pratique, une technique traditionnelle de détection de hauteur de note peut être mise en oeuvre à partir des échantillons du signal numérique de mesure de la fenêtre d'observation courante. En particulier, une technique de détection dans le temps peut être utilisée, par exemple une technique de détection par autocorrélation du signal numérique de mesure (cf. McLeod et Wyvill, *A smarter Way to Find Pitch*, département des sciences informatiques de l'université d'Otago - Nouvelle Zélande). En alternative, une technique de détection en fréquence peut être utilisée, par exemple une technique de détection à partir d'une représentation en fréquence du signal numérique de mesure selon une échelle logarithmique de la fréquence, telle qu'enseignée dans les publications de Puckette et Brown: *An efficient algorithm for the calculation of a constant Q transform* (Journal of the Acoustical Society of America, vol. 92, no. 5, novembre 1992) et *A high resolution fundamental frequency determination based on phase changes of the Fourier transform* (Journal of the Acoustical Society of America, vol. 94, no. 2, pt. 1, août 1993). Rien n'empêche d'utiliser d'autres types de techniques.

Le module 9 de détection de hauteur de note de l'exemple comprend en outre un sous module (non représenté) d'affinage par vocodeur de phase de la valeur préliminaire de fondamentale détectée. En pratique, une valeur f_{\max} de mesure affinée de la fréquence peut être déterminée pour un échantillon fréquentiel numérique de mesure, dit échantillon de maximum, de valeur d'amplitude maximale pour la fenêtre d'observation courante selon la variation de la valeur de phase dudit échantillon de maximum par rapport à l'échantillon fréquentiel numérique de mesure d'indice correspondant de l'itération précédente. La formule suivante illustre ce principe :

$$f_{\max}(\tau) = f_s \cdot \frac{\theta(\tau, \omega_{\max}) - \theta(\tau - 1, \omega_{\max}) + 2\pi \cdot cste}{2\pi \cdot \Delta}$$

Dans cette formule :

- Δ représente la durée du pas de décalage en nombre

d'échantillons,

- τ représente l'indice de l'itération courante,
- ω_{\max} représente l'indice d'échantillon de maximum dans la représentation en fréquence,
- 5 - f_s représente la fréquence d'échantillonnage en Hertz du signal de mesure,
- θ représente la phase dans la représentation en fréquence,
- $cste$ est un entier à déterminée de sorte que la valeur f_{\max} de mesure affinée se trouve au plus proche d'une fréquence centrale de la bande de
- 10 fréquence de la transformée de fourrier auquel correspond l'indice d'échantillon de maximum.

Le module 9 de détection de hauteur de note de l'exemple est adapté pour produire à chaque itération, un échantillon numérique du signal de fondamentale selon la valeur f_{\max} de mesure affinée d'une valeur de rang

15 d'harmonique auquel correspond l'échantillon de maximum, compte tenu de la valeur préliminaire de fondamentale détectée. La formule suivante illustre ce principe :

$$f_m(\tau) = \frac{1}{r_{\max}(\tau)} f_{\max}(\tau)$$

Dans cette formule :

- 20 - $f_m(r)$ représente la valeur de fondamentale détectée courante pour l'itération τ ,
- $r_{\max}(\tau)$ représente le rang d'harmonique le plus proche en fréquence de la valeur f_{\max} de mesure affinée compte tenu de la valeur préliminaire de fondamentale détectée.

25 Dans l'exemple, le sous module de détection de hauteur de note et le sous module d'affinage par vocodeur de phase sont adaptés pour produire un signal de fondamentale dont les valeurs sont comprises dans un intervalle de détection d'un octave s'étendant vers les aigus à partir d'une fréquence fondamentale nominale de la vibration de la corde à vide.

Le circuit 137 de détection de l'exemple comprend en outre un module, dit module 12 de prédiction à court terme, de prédiction des valeurs de phases des échantillons fréquentiels numériques de mesure de la fenêtre 13 d'observation suivante. En pratique, le module 12 de prédiction à court terme de l'exemple est adapté pour produire à chaque itération un échantillon fréquentiel numérique, dit échantillon $\bar{P}_a(\tau+1,\omega)$ préliminaire, à partir de chaque échantillon fréquentiel numérique de mesure, dit échantillon $\bar{m}(\tau,\omega)$ de mesure courant, issu de la fenêtre 10 d'observation courante et de l'échantillon fréquentiel numérique de mesure, dit échantillon $\bar{m}(\tau-1,\omega)$ de mesure précédent, d'indice correspondant issu de la fenêtre 11 d'observation précédente. En pratique, l'échantillon $\bar{P}_a(\tau+1,\omega)$ préliminaire peut être produit selon le principe de la formule suivante :

$$\bar{P}_a(\tau+1,\omega) = \frac{\bar{m}(\tau,\omega)^2}{\bar{m}(\tau-1,\omega)} \cdot \frac{|\bar{m}(\tau-1,\omega)|}{|\bar{m}(\tau,\omega)|}$$

Compte tenu de ce qui précède, l'échantillon $\bar{P}_a(\tau+1,\omega)$ préliminaire est représentatif d'une valeur d'amplitude correspondant à celle de l'échantillon $\bar{m}(\tau,\omega)$ de mesure courant et d'une phase correspondant à la somme de la valeur de phase de l'échantillon de $\bar{m}(\tau,\omega)$ de mesure courant et d'une valeur de déphasage entre l'échantillon $\bar{m}(\tau,\omega)$ de mesure courant et l'échantillon $\bar{m}(\tau-1,\omega)$ de mesure précédent.

Selon un principe de cohérence de phase, chaque échantillon fréquentiel logé dans le lobe principal de la transformée de fourrier d'une sinusoïde présente un déphasage spécifique relativement à chaque échantillon fréquentiel voisin dans le lobe. La formule suivante définit une valeur $\delta\theta$ théorique du déphasage d'un échantillon fréquentiel du domaine des fréquences positives de la bande de Shannon-Nyquist, compris dans un lobe de sinusoïde, par rapport à un échantillon fréquentiel attendant à gauche dans le lobe :

$$\delta\theta = \frac{W-1}{N} \cdot \pi$$

Dans cette formule, W représente la longueur des fenêtres d'observation en nombre d'échantillons, et N représente le nombre d'échantillons

fréquentiels des représentations en fréquence correspondantes ($N > W$ en cas d'une mise en œuvre de la méthode de concaténation avec des zéros).

Compte tenu de ce qui précède, les valeurs d'échantillons $\bar{p}_a(\tau+1, \omega)$ préliminaires sont déphasés par rapport aux valeurs d'échantillons $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courant selon des valeurs différentes d'un échantillon $\bar{p}_a(\tau+1, \omega)$ préliminaire attendant à l'autre, ce qui est susceptible de rompre une cohérence de phase existant éventuellement entre les valeurs d'échantillons $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courants. Pour pallier à ce problème, le module 12 prédiction à court terme de l'exemple traite les échantillons $\bar{p}_a(\tau+1, \omega)$ préliminaires selon le principe illustré dans la formule suivante :

$$\bar{p}_a(\tau+1, \omega) = \left| \bar{p}_a(\tau+1, \omega) \right| \frac{e^{-i\delta\theta} \bar{p}_a(\tau+1, \omega-1) + \bar{p}_a(\tau+1, \omega) + e^{i\delta\theta} \bar{p}_a(\tau+1, \omega+1)}{\left| e^{-i\delta\theta} \bar{p}_a(\tau+1, \omega-1) + \bar{p}_a(\tau+1, \omega) + e^{i\delta\theta} \bar{p}_a(\tau+1, \omega+1) \right|}, \quad \omega \geq 1$$

Dans cette formule, $\bar{p}_a(\tau+1, \omega)$ désigne la valeur de l'échantillon prédit, produit en sortie du module 12 de prédiction à court terme. De préférence les facteurs complexes $e^{i\delta\theta}$ et $e^{-i\delta\theta}$ peuvent être prédéterminés et préenregistrés dans une mémoire du module 12 de prédiction à court terme en vue de simplifier la mise en œuvre du module 12 de prédiction à court terme. En outre, en l'absence d'une mise en œuvre de la méthode de concaténation avec des zéros, la partie imaginaire des facteurs complexes précités peut être négligée.

Le circuit 137 de détection comprend en outre un module 14 de détection d'atténuation adapté pour produire à chaque itération un échantillon fréquentiel numérique, dit échantillon d'atténuation, représentatif d'un facteur d'atténuation d'amplitude du signal numérique de mesure, à partir de chaque échantillon $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courant et de l'échantillon $\bar{p}_a(\tau, \omega)$ prédit d'indice correspondant produit lors de l'itération précédente.

La figure 5 représente, dans le plan complexe, trois exemples de valeurs d'échantillons $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courants et trois exemples de valeurs d'échantillons $\bar{p}_a(\tau, \omega)$ prédits correspondants. Ces exemples illustrent un principe de détection d'atténuation mis en œuvre par le module 14 de détection d'atténuation de l'exemple. Selon ce principe, l'échantillon $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courant est, le cas

échant, représentatif de la superposition d'une composante 20, 21, du signal 7 numérique de mesure, maintenue avec une atténuation nulle ou partielle dans la bandes de fréquences de l'échantillon entre l'itération précédente et l'itération courante, avec une composante 22, 23, du signal 7 numérique de mesure apportée
5 entre ces itération dans la bande de fréquences.

Compte tenu de ce qui précède, un échantillon fréquentiel numérique représentatif de l'atténuation de la composante maintenue peut être produit par projection orthogonale dans le plan complexe la valeur de l'échantillon $\vec{m}(\tau, \omega)$ de mesure courant sur la droite 25 de l'échantillon $\vec{p}_a(\tau, \omega)$ prédit
10 correspondant. Dans le premier exemple de la figure 5, la composante (non représentée) de projection correspondante est en opposition de phase avec l'échantillon $\vec{p}_a(\tau, \omega)$ prédit. Cet exemple correspond dès lors à une atténuation totale, entre l'itération précédente et l'itération courante, de la composante fréquentielle, dite composante préexistante, de l'échantillon $\vec{m}(\tau-1, \omega)$ de mesure
15 précédent, l'échantillon $\vec{m}(\tau, \omega)$ de mesure courant étant uniquement représentatif d'une composante apportée. Dans le deuxième exemple de la figure 5, la composante de projection (non représentée) n'est pas en opposition de phase avec l'échantillon $\vec{p}_a(\tau, \omega)$ prédit et présente une amplitude supérieure. Cet exemple correspond dès lors à une atténuation détectée nulle de la composante préexistante
20 entre l'itération précédente et l'itération courante, l'échantillon $\vec{p}_a(\tau, \omega)$ prédit étant alors représentatif de la composante maintenue correspondante. Dans le troisième exemple, la composante de projection n'est pas en opposition de phase avec l'échantillon $\vec{p}_a(\tau, \omega)$ prédit et présente un module inférieur. Cet exemple correspond dès lors à une atténuation partielle de la composante préexistante entre
25 l'itération précédente et l'itération courante.

Dès lors, le principe de détection précédemment décrit permet de détecter une atténuation partielle ou totale de la composante préexistante alors que l'intensité se trouve globalement amplifiée dans la bande de fréquence entre l'itération précédente et l'itération courante.

Le module 14 de détection d'atténuation de l'exemple est adapté pour produire les échantillons d'atténuation en outre à partir de données, dites données d'amortissement, préenregistrées dans une mémoire 210 du circuit 137 de détection, couplée au module 14 de détection d'atténuation. Les données d'amortissement de l'exemple sont représentatives de facteurs prédéterminés d'amortissement de la corde en vibration libre d'une fenêtre d'observation sur l'autre. Dès lors, le module 14 de détection d'atténuation de l'exemple est adapté pour produire des échantillons 15 d'atténuation particulièrement représentatifs de l'effet d'atténuation résultant de contacts impartis sur la corde par l'instrumentiste, sans souffrir de l'effet naturel d'amortissement de la corde, imputable aux frottements dans l'air, à la résistivité acoustique de l'instrument... De préférence, les données d'amortissement sont représentatives de facteurs d'amortissement propres à différentes bandes de fréquences, par exemple une valeur $\beta(\omega)$ d'amortissement propre à chaque indice ω de la représentation en fréquence.

En pratique, le module 14 de détection d'atténuation de l'exemple est adapté pour produire un échantillon fréquentiel numérique $G(\tau, \omega)$, dit échantillon de gain d'amplitude, représentatif d'une valeur de gain d'amplitude de la composante préexistante entre l'itération précédente et l'itération courante selon le principe de la formule suivante :

$$G(\tau, \omega) = \frac{\vec{p}_a(\tau, \omega) \cdot \vec{m}(\tau, \omega)}{\beta(\omega) \vec{p}_a(\tau, \omega) \vec{p}_a^*(\tau, \omega)}$$

Dans cette formule, $\beta(\omega)$ désigne le facteur d'amortissement en vibration libre correspondant à l'indice ω de la représentation en fréquence, le symbole \cdot désigne l'opérateur de produit scalaire et le symbole $*$ désigne le complexe conjugué.

Par ailleurs, le module 14 de détection d'atténuation de l'exemple est adapté pour produire lesdits échantillons d'atténuation à partir des échantillons de gains d'amplitude par seuillage, selon le principe de la formule suivante :

$$\alpha(\tau, \omega) = \begin{cases} 0 & G(\tau, \omega) \leq 0 \\ 1 & G(\tau, \omega) \geq 1 \\ G(\tau, \omega) & 0 < G(\tau, \omega) < 1 \end{cases}$$

Dans cette formule, $\alpha(\tau,\omega)$ désigne la valeur de l'échantillon d'atténuation détecté pour la bande de fréquences correspondant à l'indice ω de la représentation en fréquence.

Compte tenu de ce qui précède, les échantillons $\bar{p}_a(\tau,\omega)$ prédits et les données d'amortissement de l'exemple sont représentatifs d'une valeur de phase prédite et d'une valeur d'amplitude prédite pour chaque échantillon $\bar{m}(\tau,\omega)$ de mesure courant. Ladite valeur de phase et ladite valeur d'amplitude définissant une forme d'onde prédite de la composante préexistante pour la fenêtre d'observation courante, déterminée à partir de la forme d'onde de la composante préexistante pendant la fenêtre d'observation précédente. L'échantillon $\bar{m}(\tau,\omega)$ de mesure courant est représentatif d'une forme d'onde réelle extraite dans la bande de fréquence correspondante. En particulier, ladite valeur d'amplitude prédite correspond, dans l'exemple, à la valeur d'amplitude de l'échantillon $\bar{m}(\tau-1,\omega)$ de mesure précédent atténuée selon le facteur $\beta(\omega)$ d'amortissement de la bande de fréquence correspondante. En outre, ladite valeur de phase prédite est déterminée dans l'exemple, notamment selon une valeur détectée de variation de la phase dans la bande de fréquence entre une itération antérieure, précédant ladite itération précédente, et l'itération précédente, et selon la valeur de phase de l'échantillon $\bar{m}(\tau-1,\omega)$ fréquentiel précédent. Dans l'exemple, les échantillons d'atténuation correspondant à une atténuation partielle sont représentatifs chacun du rapport entre une valeur d'amplitude maintenue détectée selon ladite valeur de phase prédite, sur ladite valeur d'amplitude prédite.

La production d'échantillons d'atténuation conforme à l'exemple peut faire l'objet de nombreuses variantes de mise en œuvre. En particulier, une projection orthogonale des valeurs 22, 28, 29, d'échantillon fréquentiels numériques d'erreur de prédiction entre l'itération précédente et l'itération courante peut être effectuée. En outre, les échantillons $\bar{p}_a(\tau,\omega)$ prédits peuvent être produits à partir des données d'amortissement de sorte que chaque échantillon $\bar{p}_a(\tau,\omega)$ prédit est à la fois représentatif de ladite valeur de phase prédite et de ladite valeur d'amplitude prédite. Par ailleurs, le principe de détection

d'atténuation par projection peut être mis en œuvre par projection dans le domaine temporel, tel que décrit plus bas.

Par ailleurs, rien n'empêche de mettre en œuvre l'invention selon des modèles simplifiés de prédiction de phase et/ou d'intensité. En particulier, l'amortissement naturel de la corde peut être négligé, des échantillons de gains d'amplitudes représentatif du rapport des valeurs d'amplitude des échantillons $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courants sur des valeurs d'amplitude prédites correspondantes peuvent être produits...

En outre, rien n'empêche de mettre en œuvre une détection d'atténuation plus sophistiquée, par exemple selon une hauteur de note détectée en cours et à partir de données d'amortissement propres à différentes notes de guitare, représentatives pour chaque note, de valeurs d'amortissement déterminées pour différents rangs d'harmoniques de la note.

Dans l'exemple, le circuit 137 de détection comprend en outre un module 140 d'étalonnage, et le périphérique 136 synthétiseur est adapté pour fonctionner, suite à une commande correspondante transmise par l'unité 148 centrale informatique, dans un mode d'étalonnage de la guitare. Dans ce mode d'étalonnage, le module 14 de détection d'atténuation s'exécute au moyen de données d'amortissement réinitialisées de valeur nulles. Ledit module 140 d'étalonnage produit les données d'amortissement à partir des échantillons d'atténuation résultants, de sorte que lesdites données d'amortissement ainsi produites sont représentatives, pour chaque indice de la représentation en fréquence, d'une valeur moyenne d'atténuation de la corde en vibration libre dans la bande de fréquence correspondante.

En particulier, le module 140 d'étalonnage peut mettre en œuvre une méthode de détection de la stationnarité du signal 7 numérique de mesure entre deux fenêtre d'observation successives, en vue de ne tenir compte que des échantillons d'atténuation produits alors que le signal 7 numérique de mesure répond à des critères de stationnarité minimale. En outre, les données propres à chaque indice de la représentation en fréquence peuvent être produites selon un seuil minimal d'intensité de la composante fréquentielle correspondante, en dessous

duquel les échantillons fréquentiels d'atténuation correspondants sont ignorés. De préférence, le module 140 d'étalonnage peut en outre s'exécuter à partir du signal de fondamentale de sorte que les données d'amortissement produites sont représentatives de facteurs d'amortissement de composantes fréquentielles harmoniques du signal 7 numérique de mesure. Un tel étalonnage permet de déterminer données d'amortissement précises suite à l'exécution de différentes notes le long du manche de la guitare, en laissant résonner la corde en vibration libre de façon prolongée entre chaque note.

En combinaison ou en alternative, tout ou partie des données d'amortissement peuvent être saisies par l'intermédiaires des moyens 65 de saisie du dispositif. En outre, rien n'empêche d'utiliser des données d'amortissement prédéterminées par tout moyen indépendamment de l'instrument effectivement raccordé au dispositif, en particulier des données prédéterminées pour un modèle prédéfini d'instrument ou une gamme prédéfinie modèles d'instruments dont la résistivité acoustique varie de manière peu ou pas significative en fonction des conditions d'utilisation (température, humidité...) et d'un exemplaire l'autre.

Le circuit 137 de détection de l'exemple comprend en outre un module 30 de détection d'excitation adapté pour produire, à chaque itération pour chaque échantillon $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courant, un échantillon fréquentiel, dit échantillon d'excitation, représentatif de la composante 19, 22, 23, apportée entre l'itération courante et l'itération précédente. En particulier, chaque échantillon d'excitation peut être produit à partir de l'échantillon $\bar{m}(\tau, \omega)$ de mesure courant, de l'échantillon $\bar{p}_a(\tau, \omega)$ prédit correspondant, des données d'amortissement et de l'échantillon d'atténuation correspondant de l'itération courante. En pratique, le module 30 de détection d'excitation peut être mis en œuvre selon le principe de la formule suivante :

$$\bar{e}(\tau, \omega) = \bar{m}(\tau, \omega) - \frac{\alpha(\tau, \omega)}{\beta(\omega)} \bar{p}_a(\tau, \omega)$$

Dans cette formule, $\bar{e}(\tau, \omega)$ représente la valeur de l'échantillon d'excitation. De préférence, il peut être tenu compte de l'effet de l'amortissement en vibration libre. Pour ce faire, le module 30 de détection d'excitation selon le principe de la formule suivante :

$$\bar{e}(\tau, \omega) = \bar{m}(\tau, \omega) - \alpha(\tau, \omega) \bar{p}_a(\tau, \omega)$$

Rien n'empêche de produire les échantillons $\bar{e}(\tau, \omega)$ d'excitation selon une méthode de détection plus approximative de la composante apportée, par exemple de sorte que chaque échantillon est représentatif d'une
5 composante 22, 28, 29, de perturbation correspondant à la superposition de la composante 19, 22, 23, apportée et d'une composante 26, 27, retranchée.

Le circuit 137 de détection comprend en outre un module, dit module 47 de prédiction à moyen terme, de prédiction des valeurs d'échantillons
10 fréquentiels numériques de mesure correspondant à une fenêtre 48 d'observation ultérieure à la fenêtre 10 d'observation courante. Le module 47 de prédiction à moyen peut être réalisé de façon identique au module 12 de détection à court terme en vue de produire un échantillon $\bar{p}_b(\tau + \frac{W}{\Delta}, \omega)$ prédit pour chaque échantillon
fréquentiel de mesure de ladite fenêtre 48 d'observation ultérieure, à la différence que les échantillons $\bar{p}_b(\tau + \frac{W}{\Delta}, \omega)$ préliminaires correspondants sont produit selon le
15 principe de la formule suivante :

$$\bar{p}_b(\tau + \frac{W}{\Delta}, \omega) = \bar{m}(\tau, \omega) \cdot \left(\frac{\bar{m}(\tau, \omega)}{\bar{m}(\tau - 1, \omega)} \cdot \frac{|\bar{m}(\tau - 1, \omega)|}{|\bar{m}(\tau, \omega)|} \right)^{\frac{W}{\Delta}}$$

Le circuit 137 de détection comprend en outre un module, dit module 263 de transformée inverse adapté pour produire à chaque itération des
échantillons numériques représentatifs d'une forme 50 d'onde prédite pour la
20 fenêtre 48 d'observation ultérieure à partir des échantillons $\bar{p}_b(\tau + \frac{W}{\Delta}, \omega)$ prédits correspondants. En pratique, une méthode rapide de transformée de fourrier inverse peut être mise en oeuvre, avec troncature des derniers échantillons -dans le cas d'une mise en oeuvre de la méthode traditionnelle de concaténation avec des zéros-, puis pondération des valeurs des échantillons résultants selon la fonction de
25 fenêtrage et selon un facteur de normalisation d'amplitude déterminé selon la formule suivante :

$$d = \frac{28 \Delta}{\sum_n w(n)^2}$$

Dans cette formule, w désigne représente la fonction de fenêtrage et d représente ledit facteur de normalisation.

Le circuit 137 de détection module comprend en outre un module 264 de construction d'un signal numérique, dit signal 51 de prédiction, adapté pour produire, à chaque itération, une séquence d'échantillons numériques, dite séquence 52 prédite, du signal 51 de prédiction, correspondant à l'intervalle du pas de décalage vers la fenêtre 13 d'observation suivante, dit intervalle 49 suivant de décalage. Les valeurs d'échantillons des séquences 53, 54, 55, d'échantillons numériques des formes d'ondes 50, 56, 57, prédites de l'itération courante et des itérations précédentes, correspondant audit intervalle 49 suivant de décalage sont sommés deux à deux à cet effet. Les échantillons numériques de la forme d'onde 50 prédite de l'itération courante sont enregistrés dans une mémoire (non représentée) du module 264 de construction en vue des itérations suivantes.

Le circuit 137 de détection de l'exemple comprend en outre un module 58 de détection de perturbation à bref délai adapté pour produire, à chaque itération, une séquence d'échantillons numériques, dite séquence 59 de perturbation, d'un signal $s_\varepsilon(n)$ de perturbation détectée. Le module de détection de l'exemple est adapté pour produire ladite séquence 59 de perturbation à partir de la séquence 60 d'échantillons numérique du signal 7 numérique de mesure s'étendant dans l'intervalle, dit intervalle 61 courant de décalage, du pas de décalage entre la fenêtre 11 d'observation précédente et la fenêtre 10 d'observation courante, et à partir de la séquence 62 prédite déterminée lors de l'itération précédente, de sorte que ladite séquence 59 de perturbation est représentative de la différence entre la forme d'onde du signal 7 numérique de mesure et la forme d'onde du signal 51 de prédiction pendant l'intervalle 61 courant de décalage.

Le circuit 141 de prétraitement de l'exemple est adapté pour mettre en œuvre un filtre numérique de façon à produire un signal numérique filtré à partir des échantillons de source sonore, le signal numérique filtré étant représentatif de la forme d'onde sonore après filtrage du son préenregistré dans le

fichier numérique sélectionné. Le filtre du circuit 141 de l'exemple est conçu pour compenser au moins partiellement, lors du fonctionnement du périphérique 136 synthétiseur en mode interactif de synthèse sonore, un déséquilibre naturel des intensités relatives des composantes fréquentielles de la corde au profit des

5 fréquences graves par rapport aux fréquences aigues. À titre indicatif, la formule suivante définit l'intensité théorique relative en décibels pour différentes harmoniques d'une corde en résonance libre, suite à un pincement ponctuel idéal conférant un profil triangulaire à la corde avant le déclenchement de la vibration :

$$P_{dB}(r,\sigma) = 20 \log_{10} \left(\frac{|\sin(r\sigma\pi)|}{r^2} \right)$$

10 Dans cette formule, σ représente le rapport de la distance entre le sommet du profil triangulaire de la corde et le chevalet, sur la longueur de la corde.

Compte tenu de ce qui précède, le filtre du circuit 141 de prétraitement peut être conçu de façon à procurer un gain d'égalisation des

15 composantes fréquentielles harmoniques, dites harmoniques préenregistrées, du son préenregistré correspondant au carré du rang de chaque harmonique préenregistrée. De préférence, les valeurs de gains d'égalisation peuvent être plafonnées selon une valeur seuil de gain maximal prédéfinie en vue de prévenir l'émergence au-delà

d'un seuil auditif tolérable, d'éléments sonores nuisibles suscités par un bruit de

20 fond microphonique hautes fréquences et/ou par un bruit de fond hautes fréquences de l'enregistrement du son sélectionné. En pratique, ce seuil peut être ajusté par l'entremise des moyens 65 de saisie du dispositif 3. En alternative, ce seuil peut être

déterminé à selon des valeurs de mesure du rapport signal sur bruit du micro

hexaphonique et/ou des valeurs de mesure du rapport signal sur bruit du son

25 sélectionné.

En pratique, le filtre du circuit 141 de prétraitement peut être adapté pour déterminer les coefficients d'un filtre numérique à réponse

impulsionnelle finie, dit filtre FIR, et à phase linéaire, selon une méthode itérative

traditionnelle de conception de filtre numérique à partir d'un gabarit de filtre défini

30 selon les valeurs de gains d'égalisation et de données, dite données de hauteur de

note d'origine, représentatives de la fondamentale f_v du son sélectionné. En pratique, les données de hauteur de note d'origine peuvent être produites et préenregistrées par tout moyen sous forme de méta données dans le fichier numérique du son préenregistré sélectionné, et transmises au périphérique 136 synthétiseur avec les échantillons de source sonore. En alternative, les données de hauteur de note d'origine peuvent être saisies par l'entremise des moyens 65 de saisie. En alternative ou en combinaison, le circuit 141 de prétraitement peut être adapté pour mettre en œuvre une méthode de détection de hauteur de note en vue de produire lesdites données de hauteur de note d'origine à partir des échantillons de source sonore.

En outre, le circuit 141 de prétraitement de l'exemple est adapté pour mettre en œuvre une méthode de transformée de fourrier de fourrier à fenêtre glissante conforme au module 8 de transformée en fréquence du circuit 137 de détection de façon à produire des échantillons fréquentiels numériques, dits échantillons préenregistrés (représentés par le symbole \vec{V} dans la figure 4), selon une même longueur de fenêtre d'observation, une même fonction de fenêtrage, et un même pas de décalage, à partir du signal numérique filtré dont les valeurs d'échantillons numériques correspondant à une première partie 66 sont préalablement réduits à une valeur nulle. Dès lors, les échantillons préenregistrés sont descriptifs de représentations en fréquence de segments successifs, dits segments 69, 70, préenregistrés, d'une deuxième partie 67 du signal numérique filtré, se chevauchant décalés selon le pas de décalage.

Les données de hauteur de note d'origine, les échantillons préenregistrés et une séquence, dite séquence initiale, d'échantillons du signal numérique filtré correspondant à ladite première partie 66 forment les données de timbre transmises au circuit 68 de synthèse et enregistrées, tel que précédemment décrit, dans la mémoire 139 du circuit 68 de synthèse.

Le circuit 137 de détection de l'exemple est électriquement relié au circuit 68 de synthèse de façon à transmettre à la volée, le signal de fondamentale, les échantillons du signal de perturbation, les échantillons d'atténuation et les échantillons d'excitation produits à chaque itération.

Le circuit 68 de synthèse de l'exemple comprend plusieurs modules 142 générateurs, chacun adapté pour produire lors de chaque itération, des échantillons fréquentiels numériques modifiés, dits échantillons modifiés, à partir des échantillons préenregistrés correspondant à un segment 69, 70, préenregistré. En particulier, chaque module 142 générateur est adapté pour pouvoir produire, lors d'itérations successives, des échantillons modifiés issus de segments 69, 70, préenregistrés successifs. Pour ce faire, le sous module 142 générateur, peut être adapté pour incrémenter à chaque itération, un index enregistré dans un espace mémoire de la mémoire 139, propre audit module 142 générateur, ledit index étant représentatif du segment préenregistré courant pour le module 142 générateur.

Chaque module 142 générateur de l'exemple met en œuvre, à chaque itération, une étape 158 de modifications en fréquence en vue notamment de transposer en fréquence lesdites harmoniques préenregistrées selon le signal de fondamentale, et notamment de pondérer l'amplitude desdites harmoniques préenregistrées selon des échantillons d'atténuation produits pour l'itération courante. Compte tenu de ce qui précède, chaque module 142 générateur produit pendant plusieurs itérations successives, des échantillons modifiés correspondant à des segments 69, 70, préenregistrés successifs, lesdits échantillons modifiés étant descriptifs de représentations en fréquences de segments, dits segments modifiés, successifs d'un son modifié issu du son sélectionné.

Ladite étape 158 de modifications en fréquence comprend notamment une sous étape 143 d'interpolation et une sous étape 146 de translation exécutées pour chaque harmonique préenregistrée du son sélectionné. Ces sous étapes mettent en œuvre une transposition en fréquence de l'harmonique préenregistrée vers une fréquence harmonique, dite fréquence 39, 40, 41, de transposition, conforme à la valeur courante du signal de fondamentale. Dès lors, le son modifié est constitué de plusieurs composantes, dites contributions fréquentielles, chacune issue d'une harmonique préenregistrée, et chacune modulée en fréquence au fur et à mesure d'itérations successives, selon des valeurs de fréquences de transpositions correspondantes successivement en vigueur lors desdites itérations successives. La formule suivante exprime le décalage 71, 72, 73,

74, en fréquence de la transposition à mettre en œuvre à chaque itération et pour chaque harmonique préenregistrée en fonction d'un rang de transposition en vigueur pour cette harmonique préenregistrée :

$$\delta\omega_{\eta}(\tau,r) = \left(\rho_{\eta}(\tau,r) \cdot f_m(\tau) - r \cdot f_v \right) \cdot \frac{N}{f_s}$$

5 Dans cette formule :

- $\rho_{\eta}(\tau,r)$ désigne le rang de transposition de l'harmonique préenregistrée de rang r , en vigueur lors de l'itération τ et pour le module générateur η ,

- $\delta\omega_{\eta}(\tau,r)$ désigne ledit décalage en fréquence de la
10 transposition à mettre en œuvre, en termes d'échantillons fréquentiels.

Chaque module 142 générateur est adapté pour mettre en œuvre une étape 154 d'initialisation dans la mémoire 139, de données de rangs de transposition propres au module 142 générateur, et représentatives d'une valeur de rang de transposition en vigueur pour chaque harmonique préenregistrée. Cette
15 étape est exécutée lors de chaque itération correspondant, pour ce module, à une modification d'un premier segment 69 préenregistré. De préférence, les données de rangs de transposition peuvent être initialisées de façon à transposer, lors de l'étape 158 de modifications en fréquence exécutée pour le premier segment 69 préenregistré, chaque harmonique préenregistrée vers une fréquence harmonique de
20 rang correspondant.

Le circuit 68 de synthèse de l'exemple comprend en outre un module 75 de sélection adapté pour extraire de la mémoire 139, lors de chaque itération, un jeu de données de mise à jour représentatives d'une nouvelle valeur de rang de transposition pour chaque valeur précédemment en vigueur lors de
25 l'itération précédente. Le module 75 de sélection est adapté pour sélectionner ledit jeu de données de mise à jour parmi plusieurs jeux de données de mise à jour préenregistrés dans la mémoire 139 du circuit 68 de synthèse.

Le graphique de la figure 11 illustre un principe selon lequel produire chaque jeu de données de mise à jour. Ce graphique présente des droites

obliques correspondant chacune à une valeur de rang de transposition en vigueur lors de l'itération précédente, ladite droite représentant la fréquence de transposition correspondante, dite fréquence précédente, en fonction du taux (en abscisse) de variation de la fondamentale détectée courante par rapport à l'itération précédente.

5 Lesdites fréquences précédentes 76, 77, 78, 79, sont réparties dans des intervalles 80, 81, 82, de proximité fréquentiels s'étendant chacun autour d'une fréquence 39, 40, 84, harmonique par rapport à la valeur courante du signal de fondamentale. Cette répartition est constante à l'intérieur d'intervalles, dits sous domaines 87, 88, 89, d'un domaine 90 de détection du taux de variation.

10 Dans l'exemple, un jeu de données de mise à jour est prédéterminé pour chacun desdits sous domaines 87, 88, 89, de façon à définir, pour plusieurs valeurs de rangs de transpositions basses fréquences (au nombre de quatre dans l'exemple de la figure 11), une nouvelle valeur de rang de transposition en vigueur qui correspond à la fréquence 39, 40, 84, harmonique de l'intervalle de
15 proximité logeant la fréquence 76, 77, 78, 79, précédente correspondante. Dès lors, chaque contribution fréquentielle basse fréquence correspondante est modulée, lors de l'itération courante, vers la plus proche fréquence harmonique en vigueur selon l'échelle logarithmique. En outre chaque jeu de données de mise à jour est
20 prédéterminé dans l'exemple de façon à définir pour chaque valeur de rang de transposition supérieur aux rangs de transposition basses fréquences, une nouvelle valeur de rang de transposition en vigueur selon le principe de la formule suivante :

$$\rho_{\eta}(\tau, r) = \rho_{\eta}(\tau, R_{\rho}) + r - R_{\rho}, \quad r > R_{\rho}$$

Dans cette formule R_{ρ} désigne un nombre prédéfini de rangs de transposition basses fréquences selon lequel déterminer les jeux de mise à jour.

25 Dans l'exemple, le module 75 de sélection est adapté pour produire à chaque itération à partir d'un échantillon courant et d'un échantillon précédent du signal de fondamental, un échantillon courant d'un signal représentatif du taux de variation du signal de fondamentale. En outre, le module 75 de sélection est adapté pour s'exécuter à partir de données de seuil prédéterminées par tout
30 moyens et préenregistrées dans la mémoire 139 du circuit 68 de synthèse avec les jeux de données de mise à jour. Les données de seuil de l'exemple sont

représentatives de valeurs 91, 92, 93, seuils du taux de variation au-delà desquelles la fréquence 76, 77, 78, 79, précédente d'au moins une contribution fréquentielle basse fréquence bascule d'un sous domaine 87, 88, 89, à un autre. En particulier, les données de seuil et les jeux de données de mise à jour peuvent être prédéterminées par tout moyen en fonction du domaine de détection de hauteur de note du module 9 de détection de hauteur de note et du nombre de rangs de transposition basses fréquences souhaités. Les jeux de données de mise à jour extraite à chaque itération sont transmises à chaque module 142 générateur du circuit 68 de synthèse.

Chaque module 142 générateur de l'exemple est en outre adapté pour mettre en oeuvre une étape 155 de mise à jour des données de rangs de transposition. Cette étape est exécutée à partir du jeu de données de mise à jours reçues lors de chaque itération, dite itération de modifications subséquentes, correspondant pour ce module, à une modification d'un segment 70 préenregistré postérieur au premier segment 69 préenregistré. Lors de cette étape, les données de rangs de transposition sont enregistrées, une fois mises à jour, dans la mémoire 139 en vue de l'itération suivante.

La formule suivante illustre l'exécution des étapes d'initialisation et de mise à jour des données de rangs de transposition telles que mises en oeuvre dans l'exemple :

$$\rho_{\eta}(\tau, r) = \begin{cases} r & \tau = \tau_0(\eta) \\ \Psi(\tau, \rho_{\eta}(\tau-1, r)) & \tau > \tau_0(\eta) \end{cases}$$

Dans cette formule :

- $\Psi(\tau, \rho_{\eta}(\tau-1, r))$ désigne une valeur de mise à jour de rang de transposition définie par le jeu de données de mise à jour en vigueur pour l'itération courante,
- $\rho_{\eta}(\tau-1, r)$ désigne le rang de transposition de l'harmonique préenregistrée de rang r , en vigueur lors d'une itération précédente $\tau-1$ pour le module générateur η ,

- $\tau_0(\eta)$ désigne la plus récente itération, dite itération de déclenchement, de modifications en fréquence du premier segment 69 préenregistré pour le module générateur η .

Les figures 12 et 13 représentent les trajectoires en fréquence de contributions fréquentielles basses fréquences d'un exemple de son modifié produit à partir d'une itération 94 de déclenchement du son modifié et au fur et à mesures des itérations suivantes. Dans ces figures, les fréquences harmoniques en vigueur lors de chaque itération sont représentées par des cercles espacés selon l'axe 95 de la fréquence (en Hertz) en fonction de la valeur 134, 135, courante du signal de fondamentale. La trajectoire fréquentielle de chaque contribution fréquentielle est représentée par une séquence de flèches, chacune s'étendant depuis une valeur de fréquence harmonique correspondant à la fréquence de transposition en vigueur lors de l'itération précédente, jusqu'à une valeur de fréquence harmonique correspondant à la fréquence de transposition en vigueur lors d'une itération courante.

La figure 12 représente un exemple dans lequel la fondamentale détectée varie progressivement de sorte que le taux de variation de la fondamentale détectée est logé à chaque itération dans le sous domaine, dit sous domaine 88 de variation progressive, de variation correspondant aux plus faibles valeurs du domaine de variation en valeur absolue. Dès lors, chaque contribution fréquentielle est modulée selon la fréquence d'un même rang d'harmonique au fur et à mesure des itérations. Le dispositif de l'exemple est dès lors adapté pour pouvoir produire un signal de séquence sonore restituant le timbre du son sélectionné de manière particulièrement fidèle et tout à fait représentatif de modulation de la hauteur de note de la corde par modification progressive de sa tension. Il est à noter que le graphique de la figure 11 et les figures 12 et 13 portent sur des exemples différents. En effet, la figure 11 porte sur un exemple donné pour quatre rangs d'harmoniques basses fréquences, tandis que les figures 12 et 13 portent sur des exemples donnés pour neuf rangs d'harmoniques basses fréquence.

Le sous domaine 88 de variation progressive qui s'applique pour les exemples des

figure 12 et 13 est donc en réalité plus étroit que celui illustré dans la figure 11, toutes choses étant égales par ailleurs.

La figure 13 représente un exemple dans lequel la fondamentale détectée varie brusquement de sorte que le taux de variation de la fondamentale est logé en dehors dudit sous domaine 88 de variation progressive lors d'une itération 131. Une telle variation se produit notamment lors d'un changement de hauteur de note exécuté par l'instrumentiste. Dans ce cas, les valeurs des rangs de transposition des contributions fréquentielles sont ajustées lors de cette itération 131 par rapport à l'itération 130 précédente. Tel qu'illustré dans cette figure la modulation en fréquence des contributions fréquentielles qui en résulte est relativement progressive, malgré la variation brusque de la fondamentale détectée.

Le principe illustré à la figure 11 peut faire l'objet de nombreuses variantes de mise en œuvre. En particulier, une minimisation de la modulation en fréquence peut être réalisée selon d'autres échelles de fréquence, en particulier une échelle rendant plus finement compte que l'échelle logarithmique, de la sensibilité de l'oreille humaine aux écarts de fréquences.

Dans la sous étape 143 d'interpolation, un faisceau d'échantillons fréquentiels numériques, dit faisceau d'harmonique, est produit à partir d'échantillons préenregistrés, dits échantillons d'origine, situés dans et autour de la bande 96, 97, 98, 99, de fréquences du lobe principal de la fonction de fenêtrage centré autour de la fréquence 100, 101, 102, 103, de l'harmonique préenregistré, de sorte que les échantillons dudit faisceau d'harmonique sont représentatifs de valeurs interpolées d'échantillons fréquentiels selon à des indices de la représentation en fréquence décalés selon une valeur de reliquat d'arrondi de la valeur de décalage 71, 72, 73, 74, de transposition en fréquence. Des exemples de valeurs (en traits plein) d'amplitudes d'échantillons d'origine et de valeurs (en pointillés) d'amplitudes interpolées correspondantes sont représentées dans la figure 14. En particulier, la sous étape d'interpolation peut être mise en œuvre selon une méthode d'interpolation linéaire. Cette étape d'interpolation permet de compenser en partie l'erreur d'approximation se produisant en raison d'un décalage de transposition en nombre entier d'échantillons fréquentiels, tels que mis en œuvre

lors de la sous étape 146 de translation décrite ci-après. La formule suivante illustre le principe de la sous étape 143 d'interpolation :

$$\omega_l(r) = N \frac{r \cdot f_v}{f_s} - \frac{L-1}{2} + l - \left(\delta\omega_\eta(\tau, r) - \overline{\delta\omega_\eta(\tau, r)} \right) \quad l = 0..L-1$$

Dans cette formule :

- 5 - $\omega_l(r)$ désigne l'indice dans la représentation en fréquence correspondant à l'échantillon d'indice l du faisceau d'harmonique,
- L désigne un nombre d'échantillons numériques dont chaque faisceau est constitué, cette valeur dépendant de la largeur du lobe principal de la fonction de fenêtrage,
- 10 - $\overline{\delta\omega_\eta(\tau, r)}$ désigne la valeur arrondie du décalage de transposition en fréquence en nombre d'échantillons fréquentiels.

L'étape 158 de modifications en fréquence comprend en outre une sous étape 144 de pondération exécutée pour chaque faisceau d'harmonique produit suite à la sous étape 143 d'interpolation, dans laquelle un faisceau d'échantillons fréquentiels numériques, dit faisceau de contribution, est produit à partir du faisceau d'harmonique, de données d'ajustement de la phase et d'un faisceau, dit faisceau de modulation, d'échantillons numériques à valeurs complexes.

Lors de chaque itération de modifications du premier segment

20 69 préenregistré, le module 142 générateur est adapté pour mettre en œuvre, suite à l'étape 154 d'initialisation des données de rangs de transposition et préalablement à l'étape 158 de modifications en fréquence, une étape 156 d'initialisation des faisceaux de modulation. Dans cette étape, les échantillons des faisceaux de modulation correspondants aux différentes harmoniques préenregistrées sont

25 initialisés et enregistrés dans la mémoire 139. Dans l'exemple, chaque faisceau de modulation est initialisé à partir d'un faisceau, dit faisceau d'excitation, d'échantillons d'excitation courants logés dans la bande 35, 36, 37, de fréquences du lobe principal de la fonction de fenêtrage centrée autour de la fréquence 39, 40, 41, de transposition en vigueur pour l'harmonique préenregistrée compte tenu des

30 données de rangs de transposition et de la valeur courante du signal de

fondamentale détectée. De préférence, les valeurs 104, 105, 106, d'amplitudes des échantillons de chaque faisceau d'excitation peuvent être égalisés, lors de l'étape 156 d'initialisation des faisceaux de modulation de sorte que des valeurs d'amplitude du faisceau de modulation résultant présente un profil plat en

5 fréquence. Pour ce faire, chaque valeur d'échantillon du faisceau d'échantillons d'excitation peut être pondérée selon la valeur du rapport de la valeur 104, 106, d'amplitude maximale du faisceau d'échantillons d'excitation sur la valeur d'amplitude de l'échantillon.

Lors de chaque itération de modifications d'un segment 70

10 préenregistré postérieur, le module 142 générateur est adapté pour exécuter, suite à l'étape 155 de mise à jour des données de rangs de transposition et préalablement à l'étape 158 de modifications en fréquence, une étape 157 d'atténuation. Dans cette étape, les faisceaux de modulation enregistrés en mémoire lors de l'itération précédente sont mis à jour selon des échantillons d'atténuation produits lors de

15 l'itération courante.

A cet égard, le circuit 68 synthétiseur comprend en outre un module 159 de contrôle d'atténuation adapté pour produire à chaque itération, des données, dites données d'atténuation d'harmoniques, à partir du signal de fondamentale et des échantillons d'atténuation courants et fournir lesdites données

20 d'atténuation d'harmoniques aux modules 142 de générateurs.

En particulier, les données d'atténuation d'harmoniques de l'exemple comprennent des données d'atténuation basses fréquences représentatives, pour chaque rang d'un nombre prédéfini de rangs de transposition basses fréquences (ce nombre étant éventuellement différent de celui prédéfini pour

25 la production des jeux de données de mise à jour), de la valeur 32, 33, 34 d'échantillon d'atténuation correspondant à la plus faible atténuation dans la bande 35, 36, 37, de fréquences du lobe principal de la fonction de fenêtrage centrée autour de la fréquence 39, 40, 41, de transposition correspondante (compte tenu de la valeur de fondamentale détectée courante).

30 En outre, les données d'atténuation d'harmonique de l'exemple comprennent des données d'atténuation hautes fréquences, produites à

partir des données d'atténuation basses fréquences. En particulier, les données d'atténuation basses fréquences de l'exemple sont représentatives de facteurs d'atténuation des rangs hautes fréquences correspondent avantageusement à la moyenne des facteurs d'atténuation des rangs basses fréquences :

$$5 \quad \gamma(\tau, \rho) = \frac{1}{R_\gamma} \sum_{\chi=1}^{R_\gamma} \gamma(\tau, \chi) \quad (\rho > R_\gamma)$$

Dans cette formule $\gamma(\tau, \rho)$ représente le facteur d'atténuation s'appliquant pour les harmoniques préenregistrées correspondant au rang de transposition ρ , et R_γ désigne un nombre prédéfini de rangs de transposition basses fréquences (R_γ peut être différent de R_ρ).

10 Les échantillons des faisceaux de modulation mis à jour lors de l'étape 157 d'atténuation sont enregistrés dans la mémoire 139 en vue de l'itération suivante. La formule suivante illustre le principe d'atténuation des valeurs d'amplitude des faisceaux de modulation tel que mis en oeuvre dans l'exemple :

$$15 \quad \bar{z}_\eta(\tau, r, l) = \bar{z}_\eta(\tau - 1, r, l) \cdot \gamma(\tau, \rho_\eta(\tau, r)), \quad (\tau > \tau_0(\eta))$$

Dans cette formule, $\bar{z}_\eta(\tau, r, l)$ désigne la valeur de l'échantillon numérique d'indice l du faisceau de modulation correspondant à l'harmonique préenregistrée de rang r pour le module générateur η .

En outre, lors de chaque itération de modifications du premier
 20 segment 69 préenregistré, le module 142 générateur est adapté pour exécuter, suite à l'étape 154 d'initialisation des données de rangs de transposition et préalablement à l'étape 158 de modifications en fréquence, une étape 160 d'initialisation des données d'ajustement de la phase. Par ailleurs, lors de chaque itération de modifications d'un segment 70 préenregistré postérieur, le module 142 générateur
 25 est adapté pour exécuter, suite à l'étape 155 de mise à jour des données de rang de transposition et préalablement à l'étape 158 de modifications en fréquence, une étape 161 de mise à jour des données d'ajustement de la phase.

Les données d'ajustement de la phase de l'exemple sont représentatives d'un coefficient complexe permettant d'assurer une continuité de phase entre les échantillons modifiés produits lors de l'itération courante et ceux produits lors de l'itération précédente. Ces données sont enregistrées dans la mémoire 139 lors de chaque exécution de l'étape 160 d'initialisation ou de l'étape 161 de mise à jour, en vue de l'itération suivante. La formule suivante illustre les principes d'initialisation et de mise à jour des coefficients complexes d'ajustement de la phase mis en œuvre dans les étapes correspondantes :

$$\bar{\Phi}_{\eta}(\tau, r) = \begin{cases} e^{\frac{i2\pi \cdot \delta\omega_{\eta}(\tau, r) \cdot \Delta}{N}} & \tau = \tau_0(\eta) \\ \bar{\Phi}_{\eta}(\tau-1, r) \cdot e^{\frac{i2\pi \cdot \delta\omega_{\eta}(\tau, r) \cdot \Delta}{N}} & \tau > \tau_0(\eta) \end{cases}$$

Dans cette formule $\bar{\Phi}_{\eta}(\tau, r)$ désigne le coefficient d'ajustement de la phase.

Dans la sous étape 144 de pondération, les valeurs d'échantillons numériques du faisceau d'harmonique sont multipliés deux à deux avec les valeurs d'échantillons du faisceau de modulation en vigueur pour cette itération de façon à moduler les valeurs d'amplitude et de phase des échantillons numériques dudit faisceau d'harmonique. En outre les valeurs d'échantillons numériques du faisceau d'harmonique sont multipliées selon le coefficient complexe d'ajustement de la phase correspondant. La formule suivante illustre le principe de la sous étape 144 de pondération :

$$\bar{c}_{\eta}(\tau, r, l) = \bar{v}_{\eta}(\tau, r, l) \cdot \bar{z}_{\eta}(\tau, r, l) \cdot \bar{\Phi}_{\eta}(\tau, r)$$

Dans cette formule, $\bar{c}_{\eta}(\tau, r, l)$ désigne l'échantillon d'indice l du faisceau de contribution et $\bar{v}_{\eta}(\tau, r, l)$ désigne le faisceau d'harmonique produit suite à la sous étape 143 d'interpolation. La figure 14, représente les amplitudes des échantillons fréquentiels d'exemples de faisceaux de contribution correspondant aux premiers rangs d'harmoniques préenregistrées.

Dans la sous étape 146 de translation, les échantillons modifiés, correspondant, dans la représentation en fréquence, aux indices fréquentiels décalés selon une valeur 71, 72, 73, 74, arrondie du décalage de transposition par rapport aux indices des échantillons d'origine correspondant à l'harmonique préenregistrée sont produits à partir des échantillons du faisceau de contribution correspondant. En particulier, d'une exécution de la sous étape de translation sur l'autre, les valeurs d'échantillons de deux faisceaux de contributions correspondant aux mêmes indices de la transformée en fréquence sont additionnées dans l'exemple. Par ailleurs, les valeurs d'échantillons de faisceaux de contribution débordant la fréquence de Schannon-Nyquist sont ignorés dans l'exemple. En outre, les valeurs d'échantillons de faisceaux de contribution débordant vers les fréquences négatives de la représentation en fréquence sont repliés vers les fréquences positives dans l'exemple. De préférence, les échantillons modifiés correspondant aux fréquences négatives de la représentation en fréquence sont produits à partir des échantillons modifiés des fréquences positives, par symétrie par rapport à l'origine. La figure 14 représente des exemples de valeurs 108 d'amplitudes d'échantillons modifiés correspondant à une partie basses fréquences de la représentation en fréquence.

En outre, lors de l'étape 157 d'atténuation et lors de l'étape 156 d'initialisation des faisceaux de modulation, des données, dites données d'énergie subsistante, représentatives d'une valeur d'énergie globale d'amplitude subsistant pour les échantillons des faisceaux de modulation suite à leur initialisation ou à leur atténuation, sont produites à partir des échantillons correspondants, et transmises à un module, dit module 147 de commande de déclenchement, du circuit 68 de synthèse. Ledit module 147 de commande de déclenchement est adapté pour transmettre à chaque itération à partir des données correspondantes d'énergie subsistante transmises par les modules 142 générateurs, un signal de commande de déclenchement au module 142 générateur correspondant à la plus faible valeur d'énergie globale d'amplitude subsistante. Chaque module 142 générateur de l'exemple exécute en outre, lors de chaque itération préalablement à toute autre étape, une étape 145 de mise à jour de l'index du

segment préenregistré courant. Dans cette étape, l'index est réinitialisé de sorte qu'il désigne le premier segment 69 préenregistré dans le cas où le module 142 générateur a reçu le signal de commande de déclenchement lors de l'itération précédente, l'index étant incrémenté dans le cas contraire. Dès lors, les sons
5 modifiés susceptibles de présenter la plus forte intensité sonore sont maintenus d'une itération sur l'autre tandis qu'un son modifié susceptible de présenter la plus faible intensité sonore est interrompu à chaque itération en vue de libérer un module générateur pour la production d'un nouveau son modifié selon les échantillons d'excitation de l'itération.

10 Le module 68 synthétiseur comprend en outre un module 162 de superposition adapté pour mixer les échantillons fréquentiels modifiés produits par les modules 142 de modifications en fréquence lors de chaque itération, de façon à produire des échantillons descriptifs d'une représentation en fréquence courante d'un signal numérique, dit signal 110 de synthèse tonale, dans laquelle les
15 contributions fréquentielles des sons modifiés en cours sont superposés.

Le circuit 68 de synthèse comprend en outre un module 163 de transformée inverse adapté pour produire à chaque itération, des échantillons numériques représentatifs d'une forme d'onde, dite forme d'onde 109 tonale, à partir desdits échantillons mixés. En pratique, une méthode rapide de transformée
20 de fourrier numérique inverse peut être utilisée, avec troncature des derniers échantillons -en cas d'une mise en œuvre de la méthode de concaténation avec des zéros-, puis pondération avec la fonction de fenêtrage et selon ledit facteur de normalisation d'amplitude.

Le circuit 68 de synthèse comprend en outre un module 164
25 de construction du signal 110 de synthèse tonale adapté pour produire à chaque itération une séquence d'échantillons numériques, dite séquence 116 tonale, du signal de synthèse tonale, correspondant à l'intervalle 61 courant de décalage. Les valeurs d'échantillons des séquences d'échantillons numériques 111, 112, 113, des formes d'ondes 109, 114, 115, tonales courantes et passées correspondant à cet
30 intervalle 61 sont superposées à cet effet. Le module 164 de construction est en outre adapté pour enregistrer la forme d'onde 109 tonale de l'itération courante dans

une mémoire (non représentée) du module 164 de construction en vue de son utilisation lors d'itérations suivantes.

Le circuit 68 de synthèse de l'exemple comprend en outre un module 117 de convolution adapté pour produire une séquence d'échantillons numériques, dite séquence 118 de convolution, d'échantillons par convolution à partir de la séquence 59 de perturbation de l'itération courante et de la séquence initiale des données de timbre. En particulier, la convolution peut être mise en œuvre selon une technique traditionnelle de convolution rapide (cf. *The digital signal processing handbook*, Vijay Madisetti, Douglas Bennett Williams, 1998, CRC Press LLC, pp. 8-1 à 8-4). Le module 117 de sélection et de déclenchement d'attaque est en outre adapté pour produire, à chaque itération, une séquence d'échantillons numériques, dite séquence 122 d'attaque correspondant à l'intervalle courant de décalage, par superposition des formes d'onde des séquences 118, 119, 120, 121, de convolution issues des plus récentes itérations, décalées les unes par rapport aux autres selon le pas de décalage conformément au principe de combinaison linéaire du produit de convolution. Ladite séquence 122 d'attaque est représentative d'un tronçon courant d'un signal numérique, dit signal 123 de synthèse inharmonique.

Le circuit de détection comprend en outre un module 124 de sortie adapté pour produire le signal de séquence sonore au fur et à mesure des itérations. En particulier, le circuit de détection de l'exemple est adapté pour mixer la séquence 122 d'échantillons d'attaque courante avec la séquence 116 tonale courante selon des facteurs respectifs de gains de superposition, de façon à produire une séquence d'échantillons correspondante, dite séquence de synthèse finale, du signal de séquence sonore. En particulier, lesdits gains de superposition peuvent être déterminés par l'utilisateur à partir des moyens 65 de saisie.

Les circuits 68 de synthèse des périphériques 136 sont électriquement reliés chacun à un port d'un circuit 170 de sortie du dispositif 3, ledit circuit 170 de sortie étant adapté pour produire un signal numérique de sortie par mixage des signaux de séquences sonores reçus, transmis par lesdits circuits 68 de synthèse. De préférence, ledit circuit 170 de sortie comprend un module (non

représenté de conversion numérique/analogique raccordé à une prise 125 analogique ménagée sur le boîtier 5 rigide de façon à pouvoir raccorder le dispositif sur un amplificateur 126 dotée d'une prise analogique d'entrée correspondante en vue d'une restitution audible du signal numérique de sortie en temps réel. Le circuit 170
5 de sortie peut en outre comprendre un module d'encodage adapté pour traduire le signal numérique de sortie dans tout autre format de transmission numérique ou analogique adéquat en vue de sa fourniture au niveau d'une prise 127 de sortie adaptée correspondante.

En pratique, le circuit 137 de détection, le circuit 141 de
10 prétraitement et le circuit 68 de synthèse de l'exemple peuvent être réalisés au moyen de composants d'électroniques numériques traditionnels, tels que des circuits logiques programmables -notamment de type dit FPGA-, des composants numériques dédiés -portes logiques, bascules, circuits intégrés spécialisés dits ASIC...-, des mémoires mortes, des mémoire flash, des microcontrôleurs... En
15 outre, chaque circuit peut être réalisé au moyen d'un ou plusieurs microprocesseurs, s'exécutant selon un programme chargé dans une mémoire vive associée, en particulier un ou plusieurs processeurs spécialisé dans le traitement des signaux numériques. L'architecture du circuit 68 de synthèse peut être notamment adaptée en fonction du nombre de modules 142 générateurs à mettre en oeuvre. A cet égard,
20 le déposant a pu constater par l'expérience que l'utilisation d'un nombre réduit de module générateur permet d'obtenir des résultats sonores satisfaisants en régime de vibration libre. En outre, le déposant a pu constater par l'expérience l'utilisation d'un nombre plus élevé, mais suffisamment modeste pour une mise en œuvre en temps réel, permet d'obtenir en tout temps des résultats sonores représentatifs du jeu
25 de l'instrumentiste, y compris en cours de régime forcé prolongé de la corde (frottement continue, introduction de composantes forcées inharmoniques, bruits, etc.).

Compte tenu de ce qui précède, les échantillons d'excitation produits par le circuit 137 de détection pour une ou plusieurs fenêtres d'observation,
30 dites fenêtres de contact d'excitation, s'étendant en partie au moins sur un intervalle de temps du signal 7 numérique de mesure pendant lequel un contact d'excitation

est imparti sur la corde, sont représentatifs de valeurs d'amplitudes d'excitation et de phases d'excitation dudit contact d'excitation. En particulier, chaque valeur d'amplitude d'excitation et chaque valeur de phase d'excitation est détectée dans la bande de fréquences de l'échantillon fréquentiel numérique de mesure
5 correspondant.

Le cas échéant, les échantillons d'excitation produits par le circuit 137 de détection sont représentatifs d'une séquence détectée de contacts d'excitation impartis sur l'organe vibrant, et forment à ce titre un signal de séquencement selon l'invention. Dans l'exemple, chaque contact d'excitation
10 détecté entraîne la production d'échantillons modifiés représentatifs d'un ou plusieurs sons modifiés, dits sons modifiés de contact, chacun déclenché suite à une fenêtre de contact d'excitation correspondante, dite fenêtre de déclenchement. Les échantillons modifiés de chaque son modifié de contact forment un signal audio de contact selon l'invention, produit en réponse au contact d'excitation correspondant.

15 Dans l'exemple du mode préféré de réalisation de l'invention, les échantillons modifiés de chaque son modifié de contact sont produits à partir des échantillons d'excitation de la fenêtre de déclenchement correspondante, et d'échantillons de source sonore issus du son sélectionné. En particulier, chaque contribution fréquentielle du son modifié de contact est initialement produite par
20 transposition de l'harmonique préenregistrée correspondante autour d'une fréquence de transposition initiale et par pondération de l'amplitude de l'harmonique préenregistrée correspondante selon une valeur d'amplitude d'excitation, dite valeur de gain initial, détectée dans une bande de fréquences logeant la fréquence de transposition initiale. Par ailleurs, chaque contribution fréquentielle est ensuite
25 produite par transposition de l'harmonique préenregistrée correspondante au fur et à mesure d'itérations suivantes, autour des fréquences de transposition successivement en vigueur pour la contribution fréquentielle lors de ces itérations. Lors desdites itérations suivantes, la contribution fréquentielle est produite en outre par pondération de l'harmonique préenregistré selon ladite valeur de gain initial
30 atténuée cumulativement selon des valeurs d'atténuation successives, chacune

détectée dans une bande de fréquences du signal 7 numérique de mesure logeant la fréquence de transposition en vigueur lors de l'itération correspondante.

En particulier, chaque son modifié de contact est atténué le cas échéant selon des données d'atténuation d'harmoniques représentatives d'une
5 atténuation partielle du son modifié, produites pour une ou plusieurs fenêtres d'observation ultérieures à la fenêtre de déclenchement du son modifié, s'étendant chacune au moins en partie sur un intervalle de temps du signal 7 numérique de mesure pendant lequel un contact d'excitation détecté, ultérieur au contact du son modifié, est imparti sur la corde.

10 Par ailleurs, compte tenu de ce qui précède, les échantillons modifiés des sons modifiés de contact correspondant à un contact d'excitation se prolongeant sur plusieurs fenêtre d'observation -frottement de la corde par exemple- se combinent de sorte que le signal de séquence sonore est représentatif d'un son composé résultant représentant de manière particulièrement fidèle et réaliste le
15 contact d'excitation prolongé. La modulation des phases des harmoniques préenregistrées selon des valeurs de phase d'excitation détectés autour des fréquences de transposition initiales correspondantes permet en effet d'assurer une continuité de phase entre chaque son modifié correspondant à un même contact d'excitation. En outre, les sons modifiés déclenchés hors contact de la corde
20 présentent une intensité proportionnelle aux composantes non stationnaires qui en sont à l'origine, de sorte que leur impact sonore est négligeable pour l'instrumentiste.

Par ailleurs, tout effet d'atténuation partielle produit par un contact partiel pendant plusieurs fenêtres d'observation est traduit à bref délai dès
25 l'itération correspondant à la première fenêtre d'observation dudit contact.

En outre, compte tenu de ce qui précède, le signal de séquence sonore du mode préféré de réalisation de l'invention présente en tout temps un contenu harmonique qui varie conformément au jeu de l'instrumentiste sans effets de changements intempestifs de hauteur de note ou rupture intempestive de
30 résonance malgré toute éventuelle variation du signal de fondamentale correspondant à un changement intempestif de hauteur de note détectée.

Dans le cas d'un impact du doigt, dit contact d'harmonique, au niveau d'un noeud de vibration d'un mode vibratoire basse fréquence de la corde, une variation du signal de fondamentale correspondant à un changement intempestif de hauteur de note risque de se produire. A titre d'exemple, la corde de mi grave, dite E1, de la guitare jouée à vide présente, après impact du doigt au dessus de la septième frette à partir du sillet du manche de la guitare, une signature fréquentielle tout à fait similaire au si, dit B2, de l'octave supérieur. Une valeur de fondamentale correspondant à la note de si, dit B1, de l'octave inférieur est donc éventuellement détecté par le module 9 de détection de hauteur de note de l'exemple. Dans ce cas, compte tenu de l'ajustement des rangs de transposition qui en résulte (cf. figure 13), chaque contribution fréquentielle basse fréquence dont le rang de transposition est trois avant le contact d'harmonique, est au pire atténuée et modulée de façon négligeable malgré un tel changement intempestif de hauteur de note. En conséquence, lesdites contributions fréquentielles basses fréquences se trouvent atténuées d'une manière similaire en présence ou en l'absence d'un changement intempestif de la hauteur de note détectée suite à la réalisation d'un contact d'harmonique dans le mode préféré de l'invention.

Le déposant a pu constater par expérience que le signal de séquence sonore du mode préféré de réalisation de l'invention représente de manière particulièrement fidèle le phrasé mélodique impartis sur la corde y compris en présence de contacts prolongées entraînant une vibration fortement bruitée. En outre, le signal de séquence sonore du dispositif 3 de l'exemple ne présente pas de dissonances sonores, autres que celles propres au son préenregistré le cas échéant, en période de vibration libre de la corde. Par ailleurs, la variation de l'enveloppe d'amplitude de chaque harmonique préenregistrée n'est ni accélérée ou ralentie par effet de la transposition telle que mise en œuvre dans l'exemple. Dès lors, le dispositif de l'exemple permet de restituer le timbre du son sélectionné de manière particulièrement fidèle.

Le signal 123 de synthèse inharmonique de l'exemple est produit par convolution du signal de perturbation avec la première partie du signal numérique filtré. Ladite première partie comprenant les composantes transitoires

d'attaque du son sélectionné, le signal 123 de synthèse inharmonique permet de traduire avec acuité l'effet percussif de chaque contact produit sur la corde. Dans l'exemple, ce signal 123 de synthèse inharmonique compense un phénomène d'émoussement des attaques des sons modifiés, résultant des modifications en fréquence réalisée par les module 142 générateurs, l'émoussement étant d'autant plus marqué que la fenêtre d'observation est longue.

Dans l'exemple du mode préféré de réalisation de l'invention, le signal $s_{\varepsilon}(n)$ de perturbation de l'exemple peut être produit à bref délai à partir du signal 7 numérique de mesure, de sorte que chaque contact impari est suivi d'une conséquence audible sans délai perceptible pour l'instrumentiste. En effet, le pas de décalage peut être défini pour toute corde de la guitare de façon à correspondre à un délai négligeable, y compris pour les corde graves nécessitant une fenêtre d'observation longue durée pour procurer une précision de détection d'atténuation souhaitée. Le circuit 141 de prétraitement pourrait être amélioré en vue d'extraire de manière plus précise les composantes transitoires du son sélectionné. Toute méthode traditionnelle adaptée pourrait être mise en œuvre à cet égard.

Le déposant a pu constater par l'expérience que de bons résultats peuvent être obtenus pour un nombre modeste de rangs de transposition basses fréquences et un nombre modeste de module 142 générateur, une mise en œuvre en temps réel s'avérant dès lors possible sans délai rédhibitoire.

Le dispositif du mode préféré de réalisation de l'invention, peut faire l'objet de variantes diverses. En particulier, chaque module générateur peut être adapté pour exécuter une étape de sélection, parmi plusieurs jeux de données de timbre issus de différents fichiers numériques de sons préenregistrés, d'un jeu de données de timbre à partir duquel produire le son modifié. La sélection peut être réalisée selon des critères prédéfinis, par exemple selon une échelle d'intensité d'excitation de sorte qu'une restitution plus fidèle de la variation dynamique du timbre d'un instrument de musique dont la sonorité est à reproduire peut être obtenue, par exemple un piano acoustique.

Selon une autre variante du mode préféré de réalisation, le circuit de prétraitement peut être adapté pour produire des données de timbre

comprenant en outre des données de fréquence d'origine pour chaque harmonique préenregistrée, représentatives d'une valeur affinée de fréquence centrale de l'harmonique préenregistrée en fréquence. Dès lors, les échantillons d'origine à partir desquels produire chaque contribution fréquentielle peuvent être sélectionnés
 5 précisément, même pour des sons sélectionnés présentant une inharmonicité marquée. En outre, le dispositif de l'exemple peut être adapté en vue de tenir compte de phénomènes d'inharmonicité de vibration de la corde, tel que par exemple lorsque la corde est très fortement pincée, par effet de l'utilisation de cordes de diamètres élevés... En pratique, le sous module d'affinage par vocodeur
 10 de phase du module 9 de détection de hauteur de note peut être adapté pour déterminer, pour chaque rang d'harmonique, une valeur de mesure affinée de la fréquence à partir d'un échantillon fréquentiel numérique de mesure correspondant à un maximum local d'amplitude logé à proximité d'une valeur préliminaire de fréquence du rang d'harmonique définie par la valeur préliminaire de fondamentale
 15 détectée. La formule suivante représente le décalage en fréquence de la transposition à mettre en œuvre dans cette variante du mode préféré de réalisation de l'invention :

$$\delta\omega_{\eta}(\tau,r) = \left(\frac{f_m(\tau,\rho_{\eta}(\tau,r))}{r \cdot f_v(1)} - 1 \right) \cdot \frac{N \cdot f_v(r)}{f_s}$$

Dans cette formule :

- 20 - $f_m(\tau,\rho_{\eta}(\tau,r))$ désigne la valeur de mesure affinée de la fréquence de transposition de l'harmonique préenregistrée de rang r ,
 $f_v(r)$ désigne la valeur affinée de fréquence centrale de l'harmonique préenregistrée de rang r .

En outre, d'autres techniques de synthèse peuvent être mise en
 25 œuvre en alternative ou en combinaison des modules générateurs décrit pour l'exemple du mode préféré de réalisation de l'invention , tel que par exemple des techniques de synthèse additive, des techniques de synthèse soustractive, des techniques de synthèse par modélisation physique...

En variante, le circuit 137 de détection, le circuit 141 de prétraitement et le circuit 68 de synthèse peut être réalisé au moyen d'un circuit unique équipé d'un processeur s'exécutant selon un programme adapté pour mettre en œuvre des fonctionnalités des modules desdits circuits, chargé dans une mémoire vive associée au processeur. En particulier, le programme peut être préenregistré dans la mémoire de masse 152 et transmis par l'unité centrale informatique au périphérique 136 synthétiseur par l'intermédiaire du bus 149 de données correspondant, suite à la mise sous tension du dispositif 3. En pratique, ledit programme peut être préenregistré dans la mémoire de masse 152 en usine, ou par l'utilisateur au moyen d'un support de mémoire amovible, par téléchargement au moyen d'un périphérique de communication du dispositif 3 (non représenté)...

Rien n'empêche de mettre en œuvre un dispositif de synthèse selon l'invention comprenant une unité de traitement unique adaptée pour traiter, selon le procédé de l'invention, un ou plusieurs signaux de vibration propres à différents organes vibrants d'un instrument de musique. En particulier, l'invention peut être mise en œuvre au moyen d'un microordinateur générique équipé d'un microprocesseur et d'une mémoire vive associée, s'exécutant selon un logiciel d'exploitation chargé en mémoire vive suite à la mise sous tension du microordinateur, et selon un programme chargé en mémoire vive depuis une mémoire de masse du micro ordinateur, ledit programme étant adapté pour que le microordinateur mette en œuvre un procédé de synthèse d'un signal audio selon l'invention suite au chargement dudit programme, de sorte qu'au moins un signal de vibration selon l'invention, dont l'acquisition est effectuée par une carte son équipant le microordinateur, est traité par l'unité centrale en vue de produire un signal audio synthétisé selon l'invention en sortie de ladite carte son.

Rien n'empêche de mettre en œuvre tout ou partie du procédé de l'invention par voie de traitement analogique.

Dans l'exemple, le signal microphonique est transmis en entrée du dispositif 3 par voie analogique. Rien n'empêche, de mettre en œuvre un dispositif selon l'invention traitant un ou plusieurs signaux représentatifs de la vibration d'un organe vibrant reçus par voie numérique. En particulier, une

numérisation de chaque signal peut être mise en œuvre au moyen d'un circuit de numérisation embarqué sur l'instrument de musique. En outre, rien n'empêche de coupler le circuit de numérisation de l'instrument de musique avec un circuit embarqué de transformée en fréquence de sorte qu'un signal représentatif de la vibration de l'organe vibrant est fourni en entrée d'un dispositif selon l'invention, selon une représentation en fréquence dudit signal.

En outre rien n'empêche réaliser l'invention selon un mode de réalisation simplifié à partir d'un signal de séquençement conforme à la norme MIDI. Par ailleurs, rien n'empêche, de mettre en œuvre un dispositif selon l'invention adapté pour pouvoir produire un signal audio synthétisé selon l'invention à partir d'un signal de séquençement selon l'invention et d'un signal de note selon l'invention produit à partir d'un circuit de détection interposé entre l'instrument et le dispositif selon l'invention.

Rien n'empêche de mettre en œuvre un dispositif de conception simplifié dépourvu de module 58 de détection de perturbation à bref délai et de module 117 de convolution.

REVENDICATIONS

1/ - Procédé de synthèse d'un signal audio, dit signal audio synthétisé, à partir d'un signal, dit signal de note, représentatif d'une séquence de hauteurs de notes selon lequel l'organe vibrant est mis en vibration, et d'un signal
5 de séquençement représentatif d'une séquence de contacts impartis sur un organe (2) vibrant, ladite séquence de contacts comprenant des contacts d'excitation aptes à mettre l'organe (2) vibrant en vibration, procédé dans lequel :

- au moins un signal audio de contact est produit pour chacun desdits contacts d'excitation,
10 - plusieurs composantes fréquentielles, dites composantes modulées, d'au moins un signal audio de contact, dit signal tonal de contact, sont modulées chacune successivement autour de fréquences, dites fréquences (132, 133) de synthèse, propres chacune à un rang d'harmonique d'une hauteur de note (134 ; 135) de la séquence,

15 caractérisé en ce que :

- pour au moins un contact d'excitation, dit contact d'excitation et de changement de note, entraînant une variation du signal de note vers une nouvelle hauteur de note (135) dans la séquence, au moins une composante modulée, dite composante canalisée, d'un signal tonal de contact, dit signal tonal
20 harmonisé, résultant d'un contact d'excitation antérieur audit contact d'excitation et de changement de note, est modulée autour d'une fréquence harmonique, dite nouvelle fréquence (133) de synthèse, de la nouvelle hauteur de note (135), correspondant à un rang d'harmonique différent du rang d'harmonique d'une précédente fréquence (132) de synthèse de la composante canalisée,

25 - le signal audio synthétisé après ledit contact d'excitation et de changement de note est produit par mixage de chaque signal tonal harmonisé et du signal audio de contact dudit contact d'excitation et de changement de note.

2/ - Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la nouvelle fréquence (133) de synthèse est choisie de sorte qu'elle se trouve, parmi
30 les fréquences harmoniques de la nouvelle hauteur de note (135), directement voisine de ladite précédente fréquence (132) de synthèse.

3/ - Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que plusieurs composantes modulées du signal tonal harmonisé, dites composantes de bas rangs, dont les fréquences de synthèse, dites fréquences (132) de synthèses précédentes, en vigueur pour une hauteur de note (134) précédant la nouvelle hauteur de note (135) dans la séquence, sont inférieures à la fréquence de synthèse, en vigueur pour ladite précédente hauteur de note (134), d'une autre composante modulée du signal tonal harmonisé, dite composante de haut rang, sont modulées chacune vers une fréquence (133) harmonique de ladite nouvelle hauteur de note (135), choisie de façon à se trouver, parmi les fréquences harmoniques de la nouvelle hauteur de note (135), directement voisine de la fréquence (132) de synthèse précédente de la composante de bas rang.

4/ - Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'au moins une composante de haut rang est modulée vers une fréquence harmonique de la nouvelle hauteur de note (135) choisie de façon à maintenir constant l'écart entre les rangs d'harmoniques des fréquences de synthèse de la composante de haut rang et d'une composante de bas rang associée.

5/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'un signal, dit signal de variation de note, représentatif d'un taux de variation de hauteur de note est produit à partir du signal de note, et la nouvelle fréquence (133) de synthèse est choisie parmi les fréquences harmoniques de la nouvelle hauteur de note (135) selon le signal de variation de note.

6/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que plusieurs composantes modulées du signal tonal harmonisé sont modulées chacune :

- selon des données, dites données de rang de synthèse, représentatives d'un précédent rang d'harmonique, dit rang de synthèse, auquel correspond une précédente fréquence (132) de synthèse de la composante modulée,
- et selon des données préenregistrées comprenant, pour une pluralité d'intervalles (87, 88, 89) prédéfinis de taux de variation de hauteur de note, des données représentatives de valeurs de mise à jour de rangs de synthèse.

7/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le signal de séquençement est produit à partir d'un signal, dit signal (7) source de détection d'excitation, représentatif de la vibration de l'organe (2) vibrant, de sorte que le signal de séquençement est représentatif, pour différentes bandes de fréquences, dites bandes d'excitation, du signal (7) source de détection d'excitation, d'au moins une valeur (104, 105, 106) d'intensité d'excitation de chaque contact d'excitation dans chacune desdites bandes d'excitation.

8/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le signal de note est produit à partir d'un signal (7) représentatif de la vibration de l'organe vibrant selon un octave de détection de hauteur de note.

9/ - Dispositif de synthèse comprenant au moins une unité (136) de traitement adapté pour synthétiser un signal audio, dit signal audio synthétisé, à partir d'un signal, dit signal de note, représentatif d'une séquence de hauteurs de notes selon lequel l'organe vibrant est mis en vibration, et d'un signal de séquençement représentatif d'une séquence de contacts impartis sur un organe (2) vibrant, ladite séquence de contacts comprenant des contacts d'excitation aptes à mettre l'organe (2) vibrant en vibration, caractérisé en ce que l'unité (136) de traitement est adaptée pour :

- produire au moins un signal audio de contact, pour chacun desdits contacts d'excitation,

- moduler plusieurs composantes fréquentielles, dites composantes modulées, d'au moins un signal audio de contact, dit signal tonal de contact, chacune successivement autour de fréquences, dites fréquences (132, 133) de synthèse, propres chacune à un rang d'harmonique d'une hauteur de note (134 ; 135) de la séquence,

caractérisé en ce que :

- pour au moins un contact d'excitation, dit contact d'excitation et de changement de note, entraînant une variation du signal de note vers une nouvelle hauteur de note (135) dans la séquence, l'unité de traitement est adapté pour pouvoir moduler au moins une composante modulée, dite composante canalisée, d'un signal tonal de contact, dit signal tonal harmonisé, résultant d'un

contact d'excitation antérieur audit contact d'excitation et de changement de note, autour d'une fréquence harmonique, dite nouvelle fréquence (133) de synthèse, de la nouvelle hauteur de note (135), correspondant à un rang d'harmonique différent du rang d'harmonique d'une précédente fréquence (132) de synthèse de la

5 composante canalisée,

- l'unité de traitement est adapté pour produire, après tout contact d'excitation et de changement de note, le signal audio synthétisé par mixage de chaque signal tonal harmonisé correspondant et du signal audio de contact dudit contact d'excitation et de changement de note.

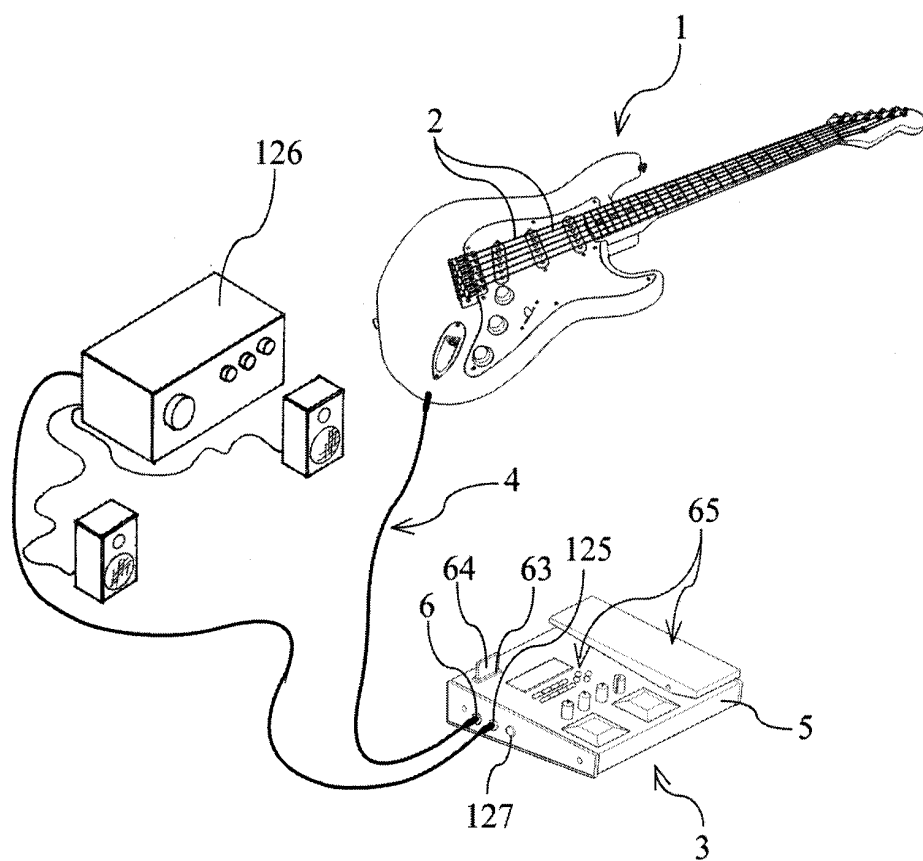
10 10/ - Support d'enregistrement -notamment du type amovible (CD-ROM, DVD, Clé USB, disque dur électronique externe)- adapté pour pouvoir être lu dans un lecteur d'un dispositif informatique, et sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur adapté pour pouvoir être chargé en mémoire vive du dispositif informatique lorsque le support d'enregistrement est chargé dans ledit

15 lecteur, caractérisé en ce que le programme d'ordinateur comprend des portions de code de programme pour l'exécution des étapes d'un procédé de synthèse d'un signal audio selon l'une des revendications 1 à 8 lorsque le programme d'ordinateur est chargé en mémoire vive du dispositif informatique.

20 11/ - Programme d'ordinateur comprenant des portions de code de programme pour l'exécution des étapes d'un procédé de synthèse d'un signal audio selon l'une des revendications 1 à 8 lorsque ledit programme est exécuté sur un dispositif informatique.

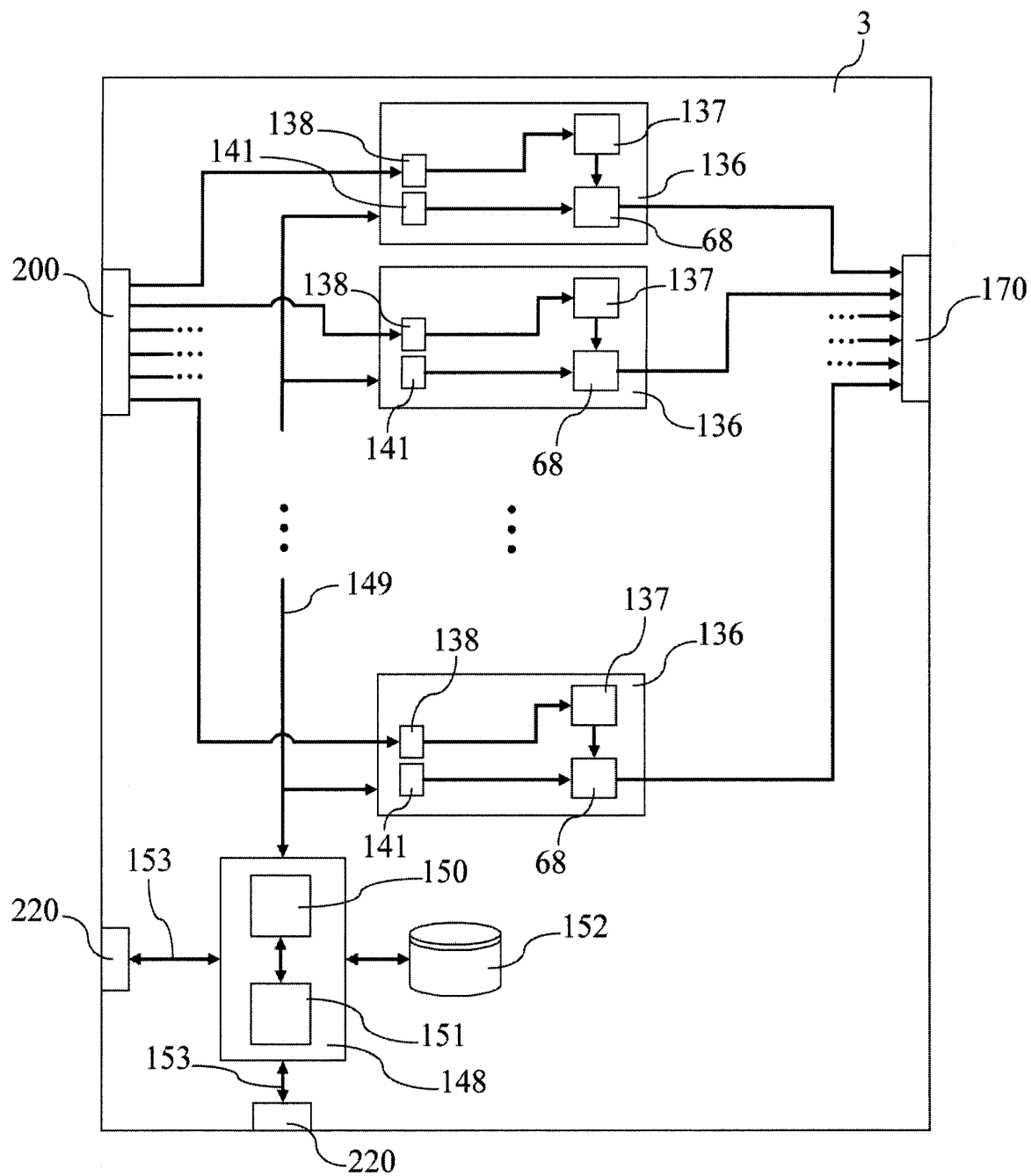
1/14

Fig. 1



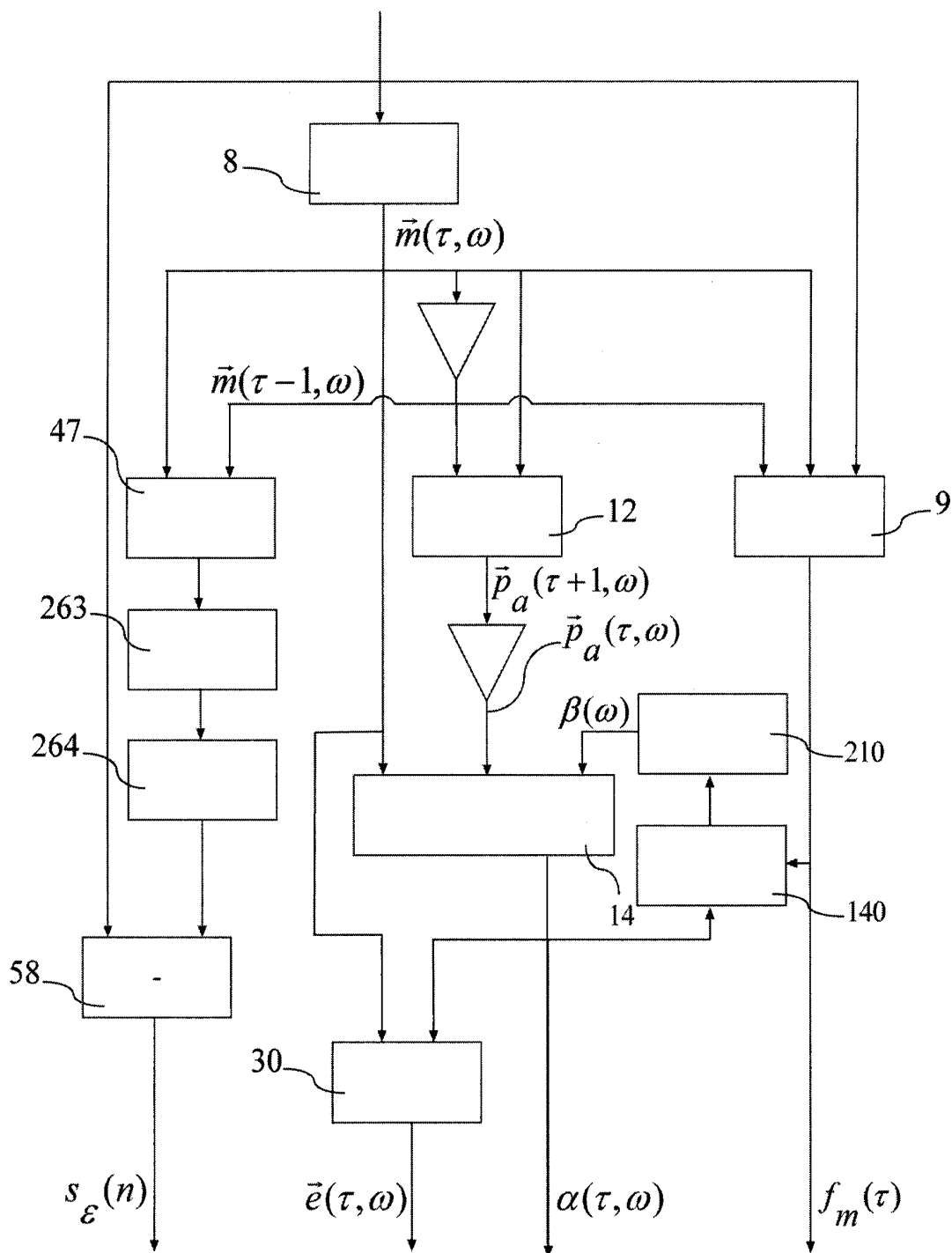
2/14

Fig. 2



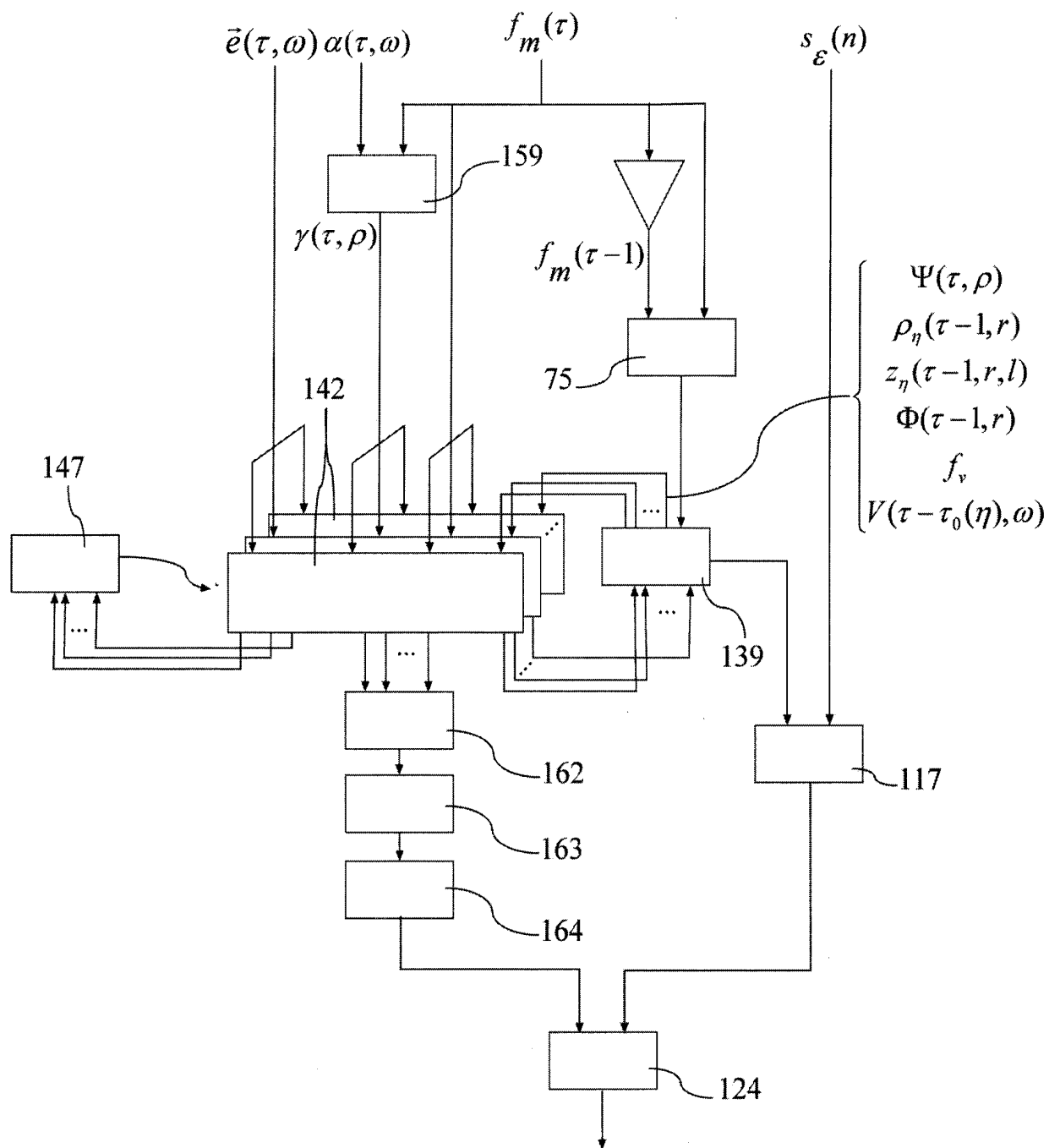
3/14

Fig. 3



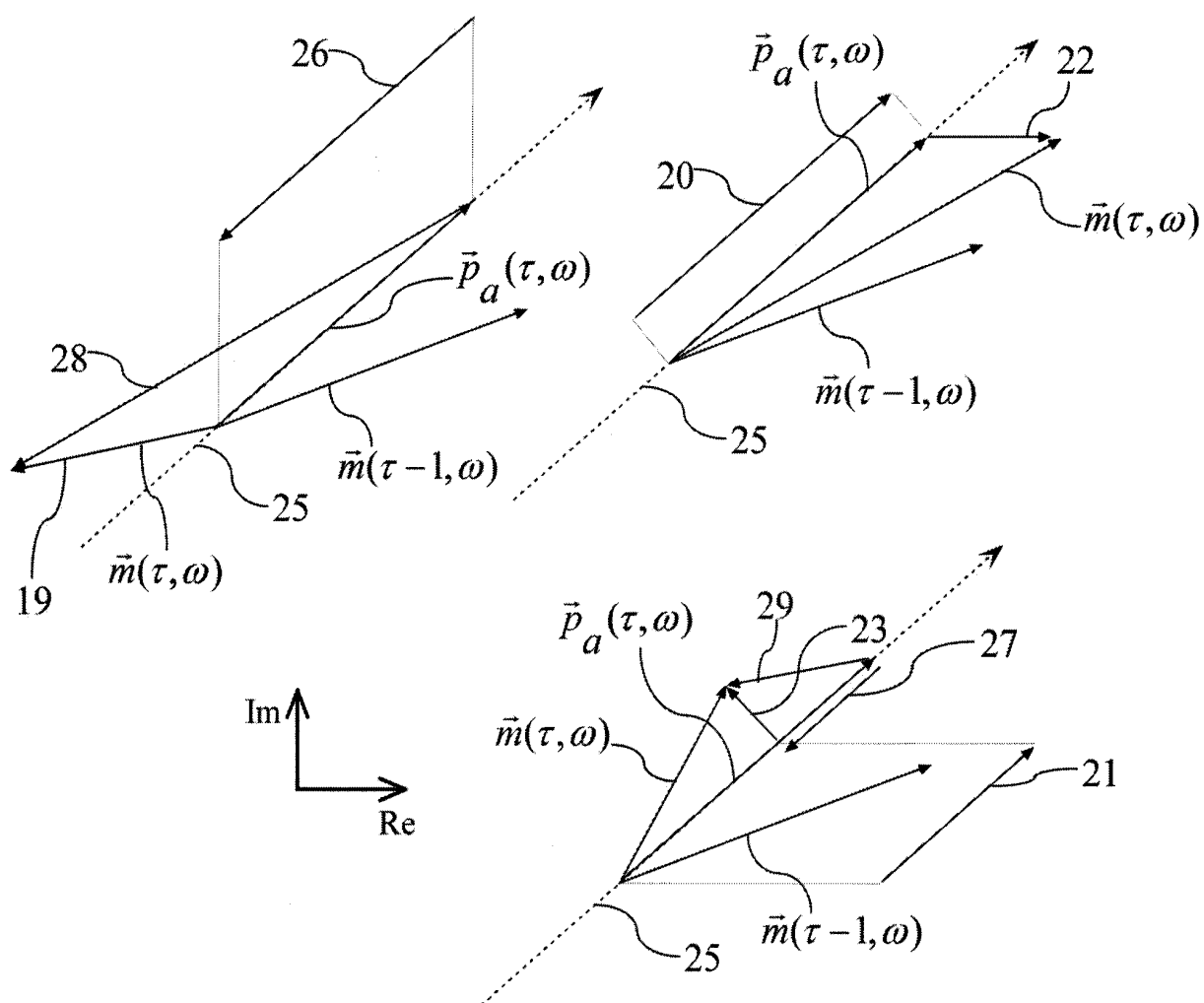
4/14

Fig. 4



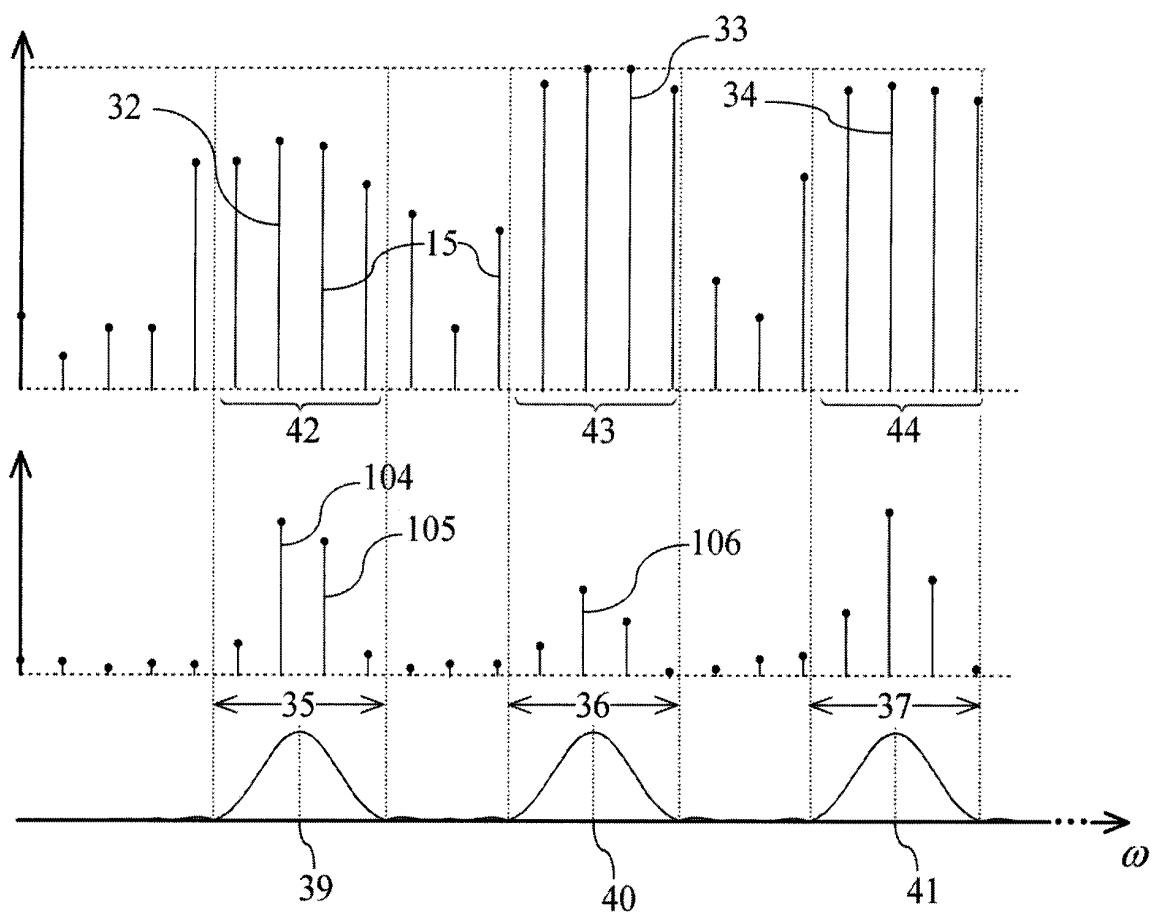
5/14

Fig. 5



6/14

Fig. 6



7/14

Fig. 7

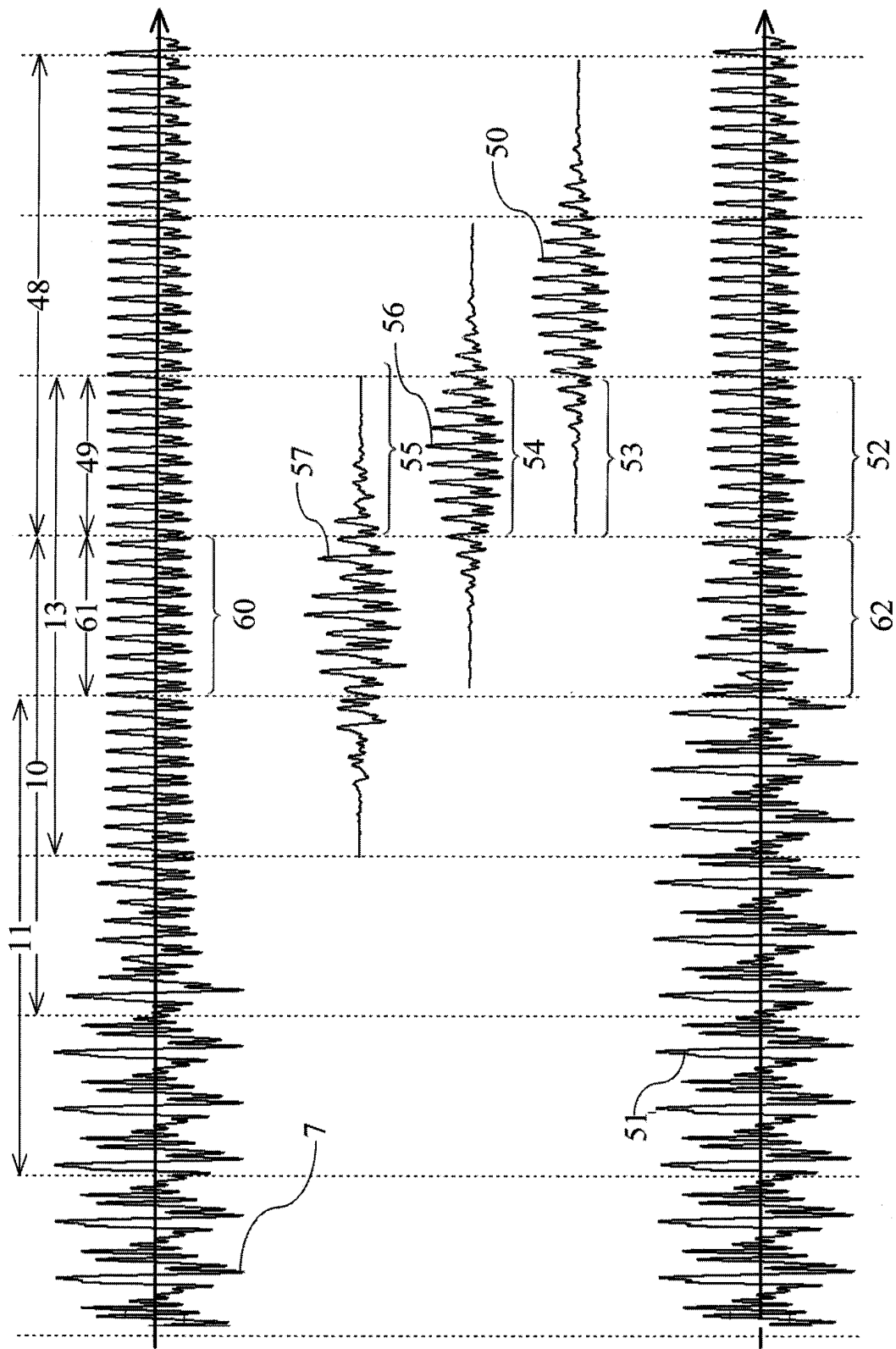
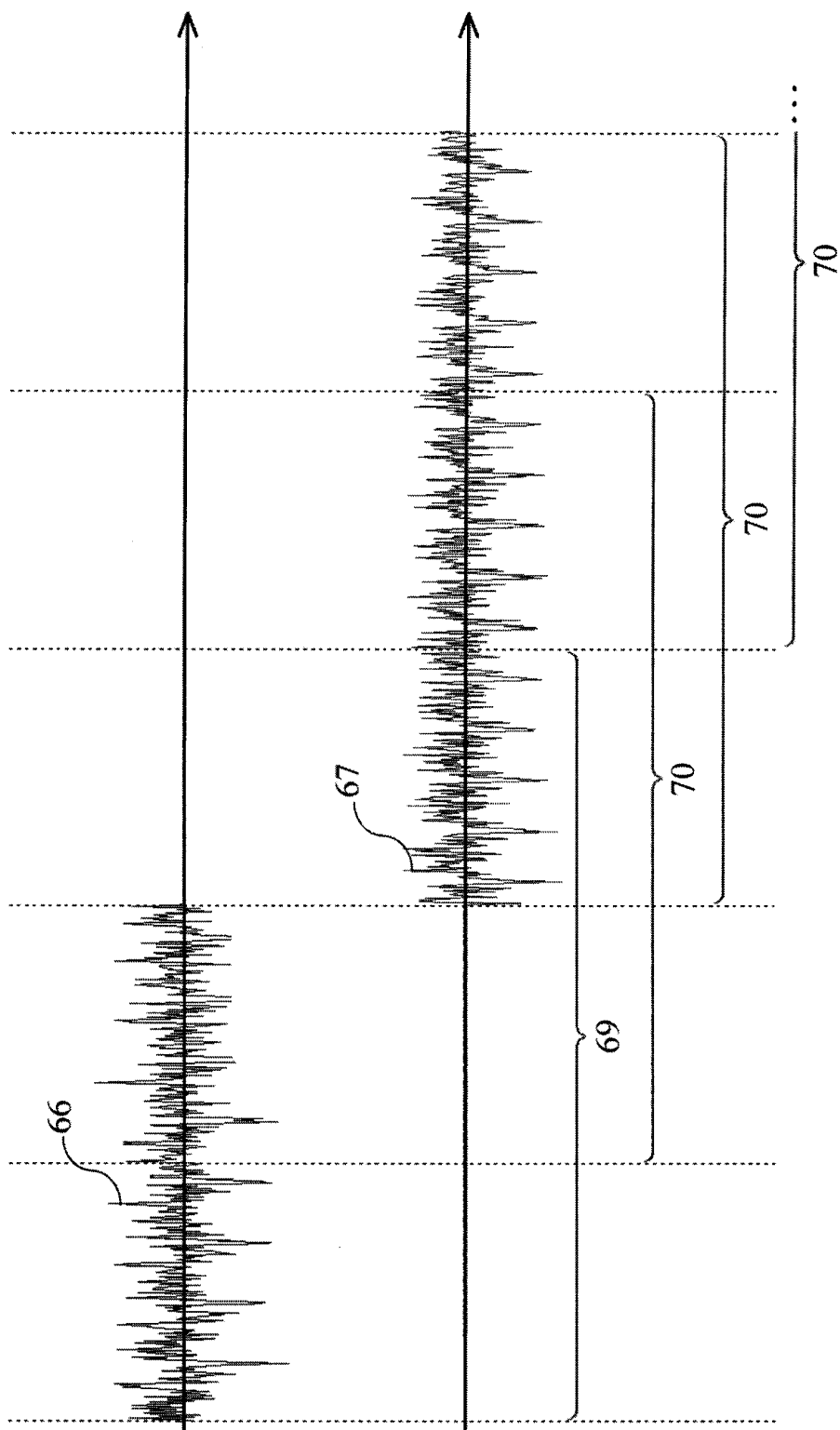


Fig. 8



9/14

Fig. 9

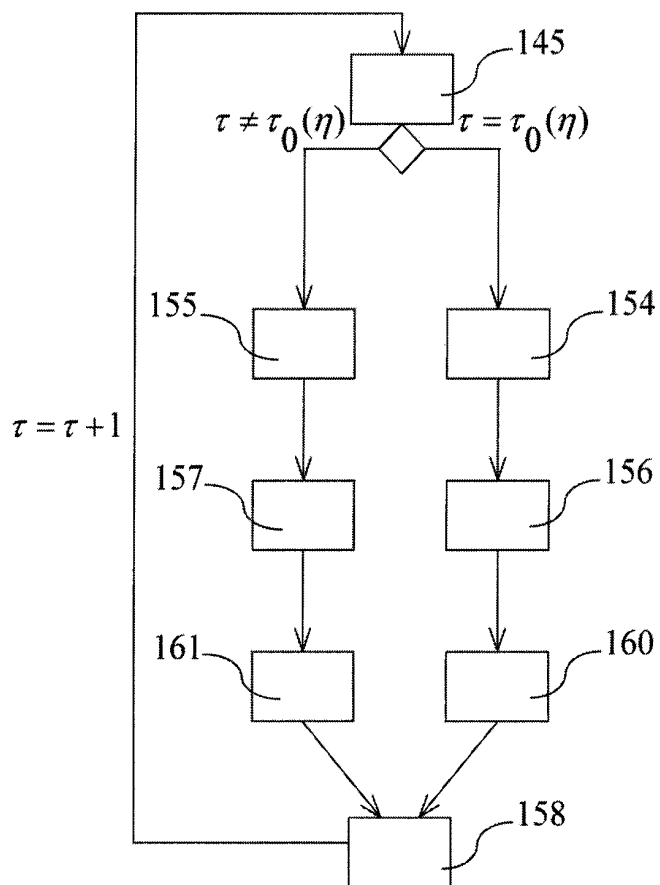
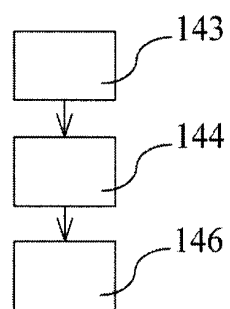
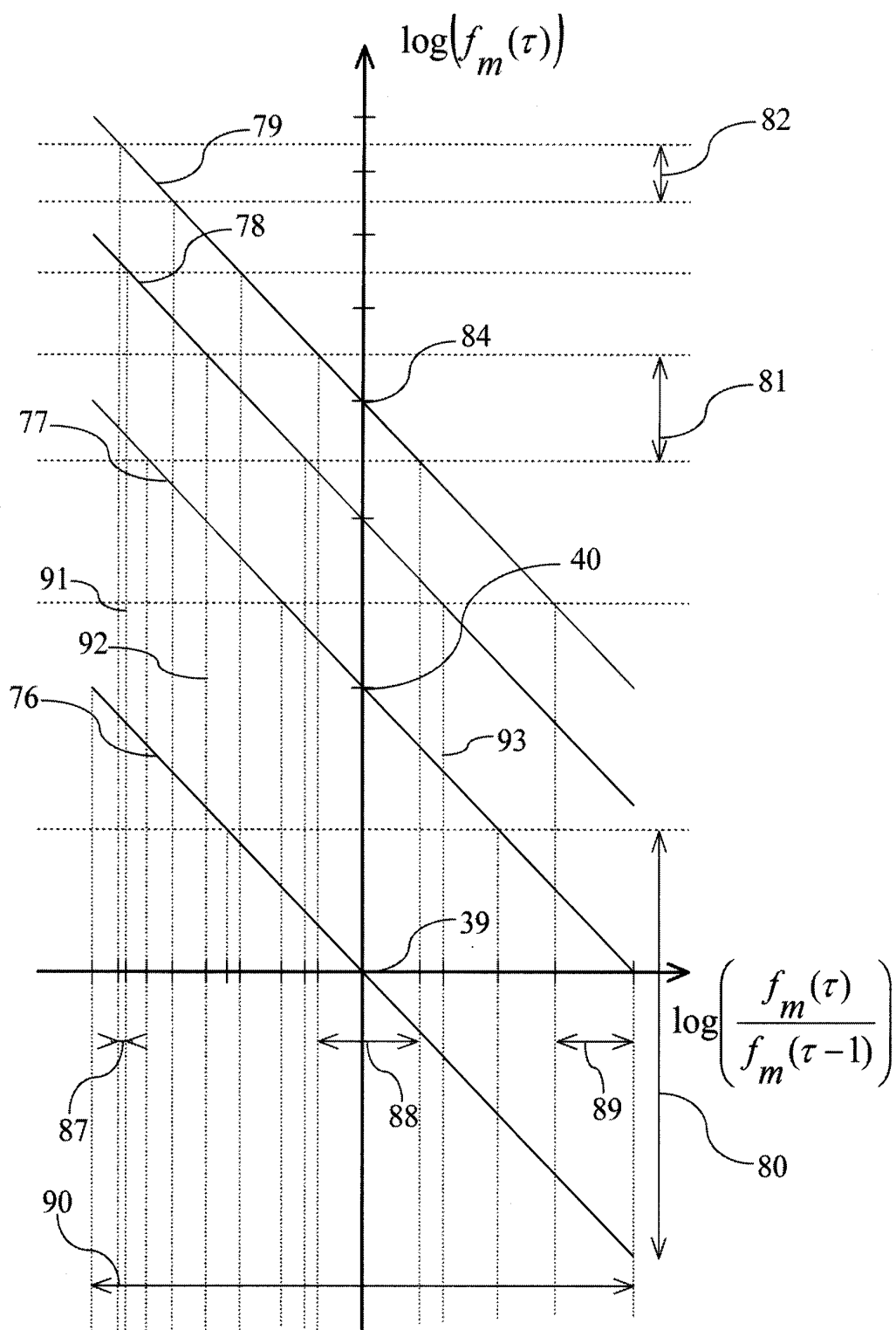


Fig. 10



10/14

Fig. 11



11/14

Fig. 12

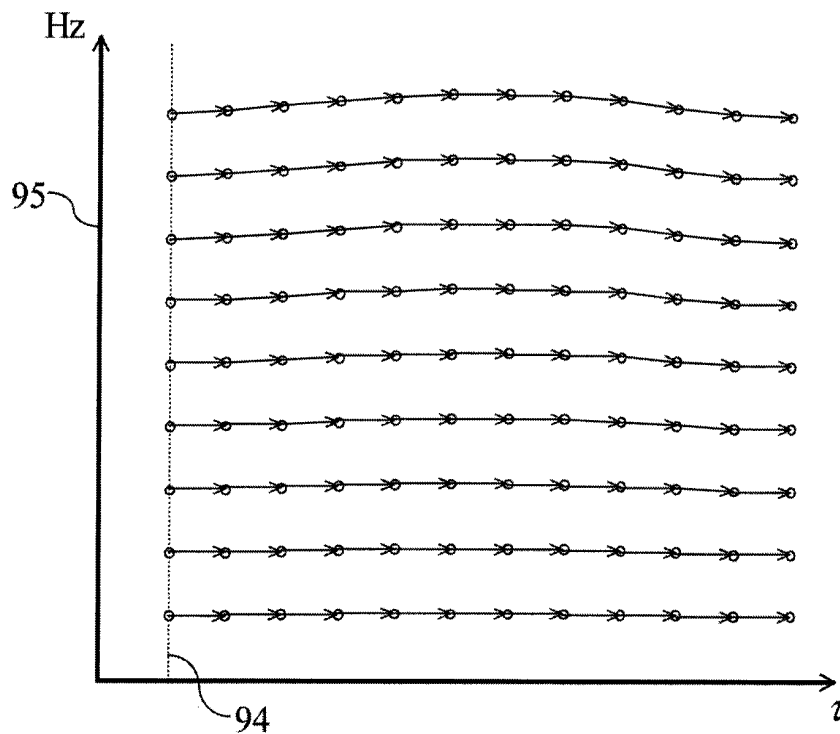
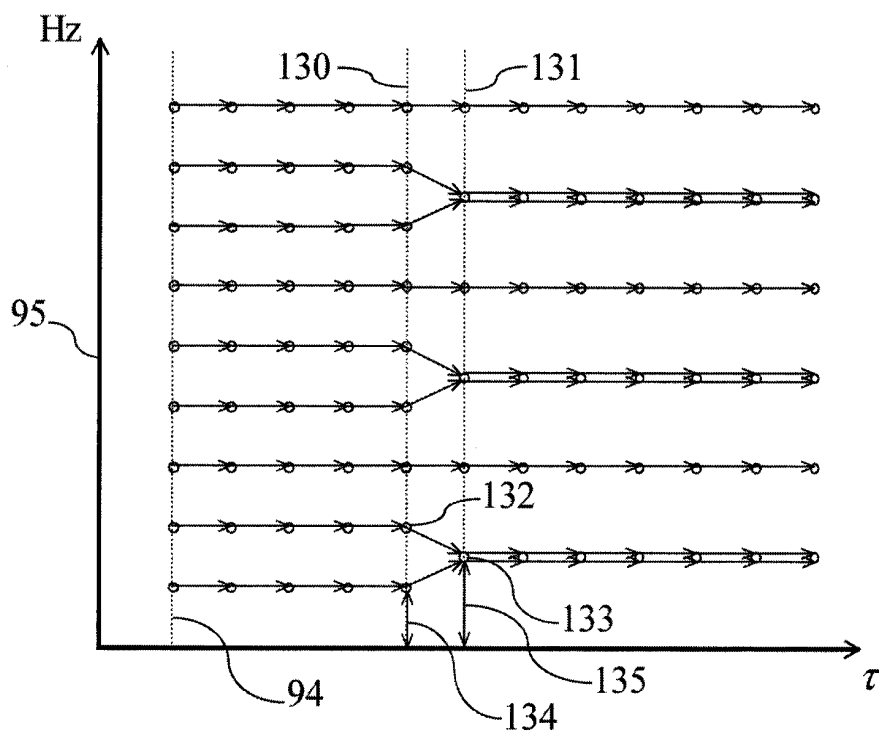


Fig. 13



12/14

Fig. 14

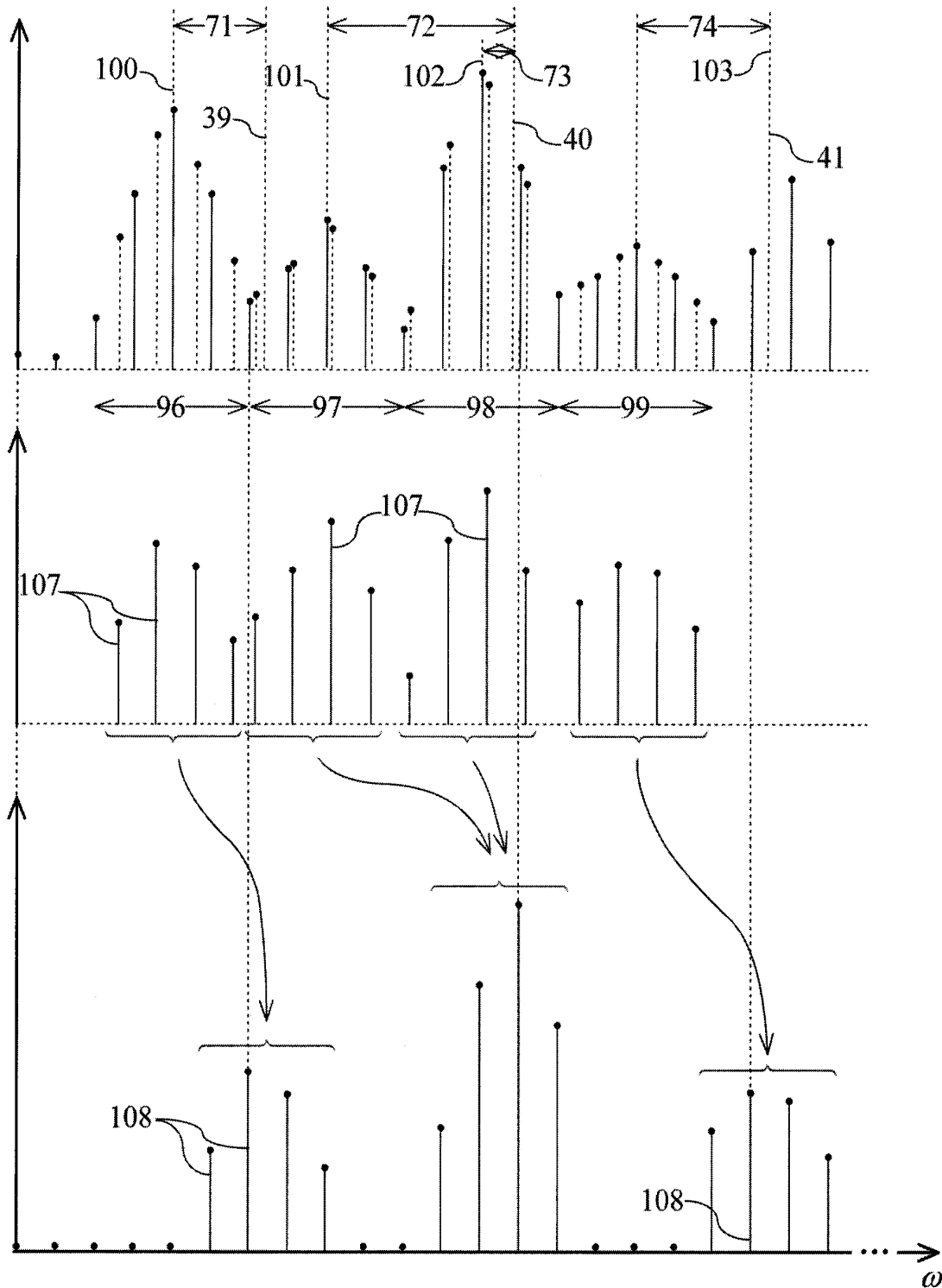
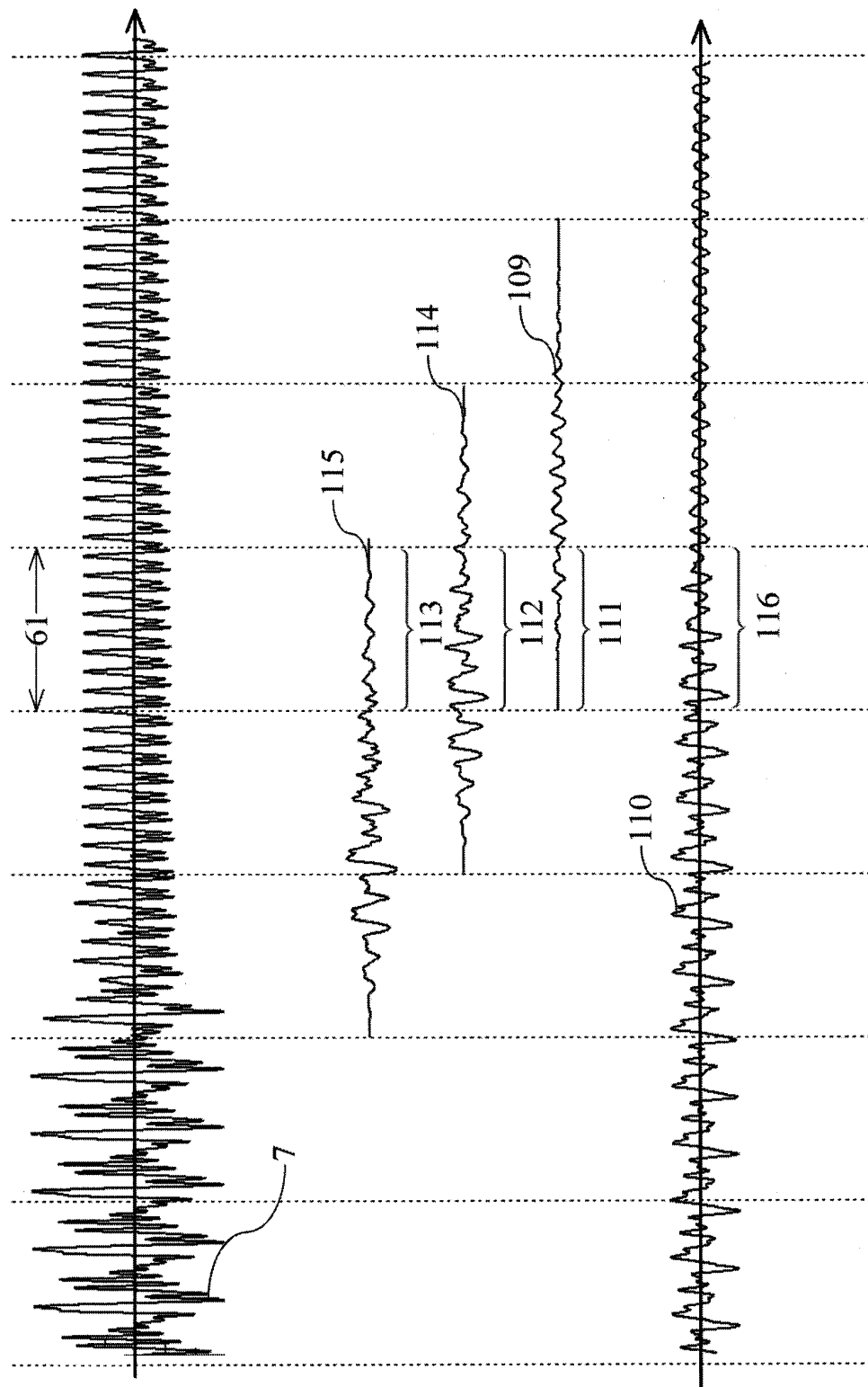
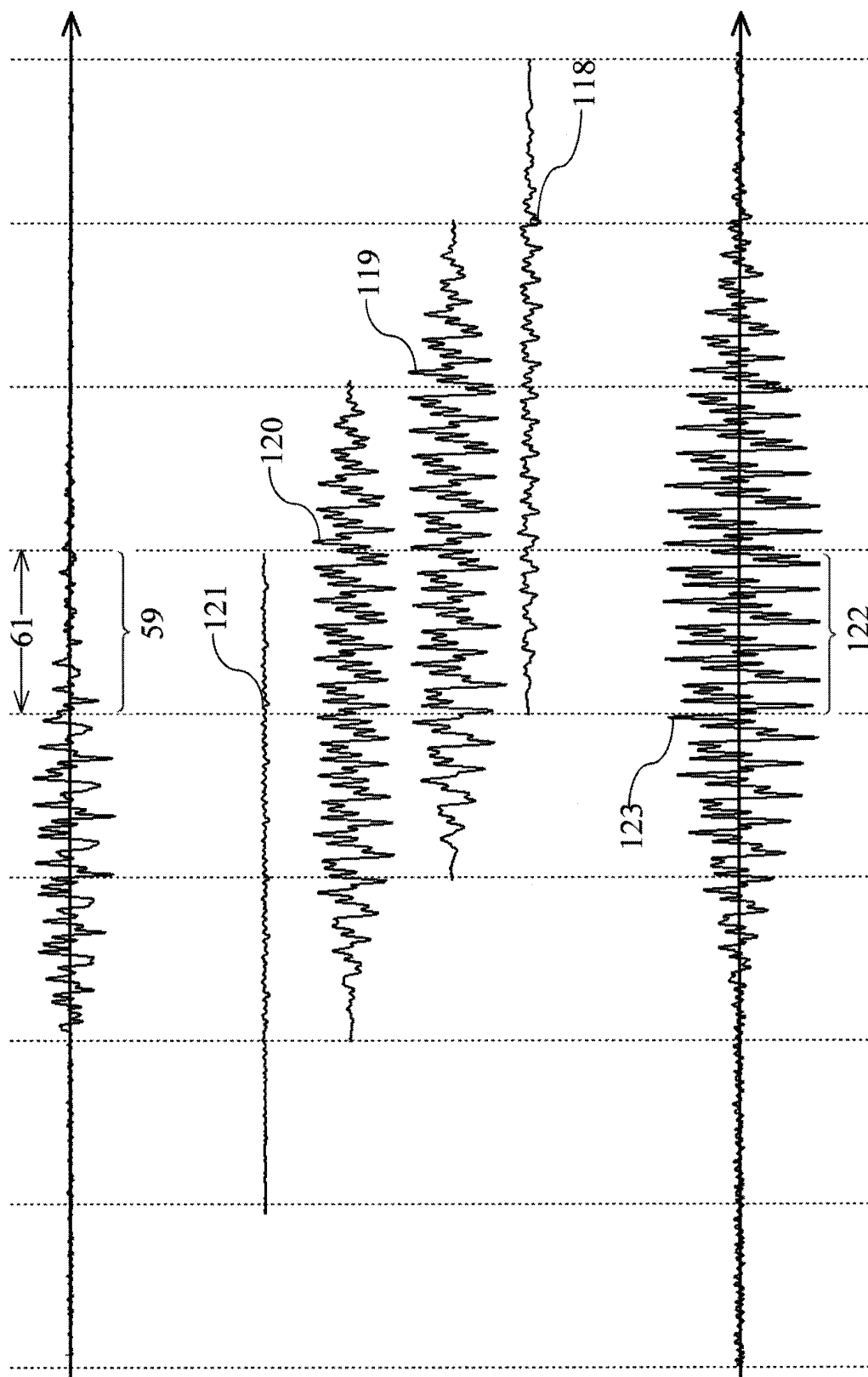


Fig. 15



14/14

Fig. 16





**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 734599
FR 1001154

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 5 218 160 A (GROB-DA VEIGA MATTHIAS [CH]) 8 juin 1993 (1993-06-08) * abrégé; figures 1-3 * * colonne 1, ligne 5 - ligne 65 * * colonne 2, ligne 25 - colonne 5, ligne 19 *	1,9-11	G10H1/14 G10H1/053 G10H3/22
A	EP 0 454 047 A2 (CASIO COMPUTER CO LTD [JP] CASIO COMPUTER CO LTD [DE]) 30 octobre 1991 (1991-10-30) * page 2 - page 5 * * abrégé *	1,9-11	
A	MARENTAKIS G ET AL: "Sinusoidal synthesis optimization" ICMC. INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE. PROCEEDINGS, XX, XX, 1 janvier 2002 (2002-01-01), pages 1-4, XP002392948 * Sections 2-3 *	1,9-11	
A	US 2003/221542 A1 (KENMOCHI HIDEKI [JP] ET AL) 4 décembre 2003 (2003-12-04) * alinéa [0018] - alinéa [0026] * * alinéa [0109] - alinéa [0124] * * abrégé; figures 8-20 *	1,9-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G10H
A	US 5 969 282 A (BERNERS DAVID P [US] ET AL) 19 octobre 1999 (1999-10-19) * abrégé; figures 1-7 * * colonne 1, ligne 5 - colonne 4, ligne 59 * * colonne 6, ligne 8 - colonne 7, ligne 67 *	1,9-11	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
16 septembre 2010		Lecoainte, Michael	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1001154 FA 734599**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **16-09-2010**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
US 5218160	A	08-06-1993	CH	682355 A5	31-08-1993
			DE	4204688 A1	03-09-1992

EP 0454047	A2	30-10-1991	DE	69130339 D1	19-11-1998
			DE	69130339 T2	10-06-1999
			HK	1013348 A1	12-05-2000
			SG	47543 A1	17-04-1998
			US	5340938 A	23-08-1994

US 2003221542	A1	04-12-2003	JP	3815347 B2	30-08-2006
			JP	2003255998 A	10-09-2003

US 5969282	A	19-10-1999	AUCUN		
