(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 3 620 867 A1**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
**11.03.2020 Bulletin 2020/11**

(51) Int Cl.:
***G04C 3/04*** *(2006.01)*

(21) Numéro de dépôt: **18192469.7**

(22) Date de dépôt: **04.09.2018**

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Etats d'extension désignés:
**BA ME**
Etats de validation désignés:
**KH MA MD TN**

(71) Demandeur: **The Swatch Group Research and Development Ltd**
**2074 Marin (CH)**

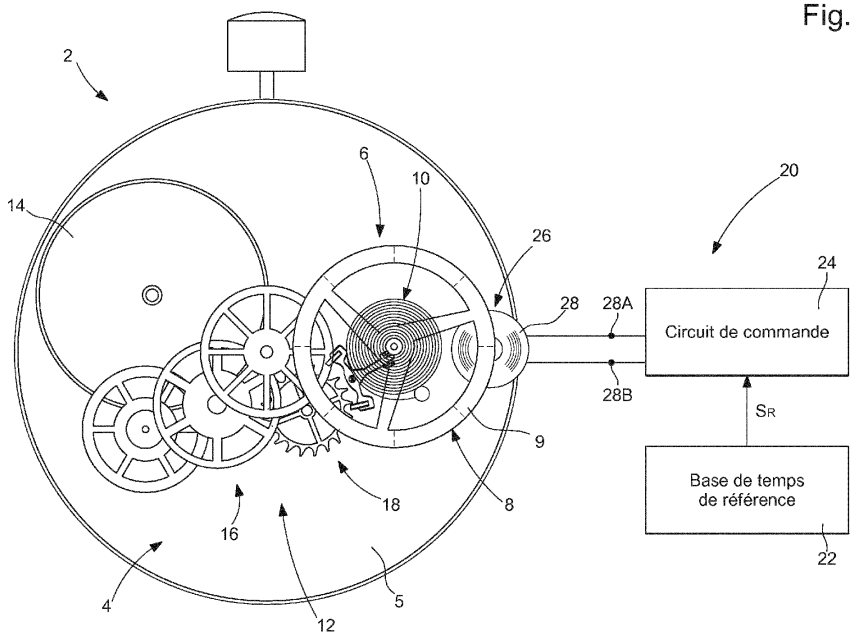
(72) Inventeur: **Tombez, Lionel**
**2022 Bevaix (CH)**

(74) Mandataire: **ICB SA**
**Faubourg de l'Hôpital, 3**
**2001 Neuchâtel (CH)**

(54) **PIÈCE D'HORLOGERIE COMPRENANT UN OSCILLATEUR MÉCANIQUE DONT LA FRÉQUENCE MOYENNE EST SYNCHRONISÉE SUR CELLE D'UN OSCILLATEUR ÉLECTRONIQUE DE RÉFÉRENCE**

(57) La pièce d'horlogerie comprend oscillateur mécanique, formé d'un résonateur mécanique (6) et d'un dispositif d'entretien de l'oscillation, et un oscillateur auxiliaire formant une base de temps de référence (22). Elle comprend un dispositif de synchronisation (20) agencé pour asservir la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique sur celle de l'oscillateur auxiliaire. Ce dispositif de synchronisation comprend un dispositif de freinage électromagnétique (26) qui est formé d'une bobine et d'au moins un aimant permanent et agencé de manière qu'une tension induite est générée entre les bornes de la bobine dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique. Le dispositif de synchronisation est agencé pour pouvoir diminuer momentanément l'impédance entre les bornes de la bobine au cours d'intervalles de temps distincts, deux intervalles de temps successifs quelconques présentant entre leurs débuts respectifs une distance temporelle sensiblement égale à un nombre entier positif multiplié par la moitié d'une période de consigne pour l'oscillateur mécanique.

Fig. 1




EP 3 620 867 A1

## Description

### Domaine technique

**[0001]** La présente invention concerne une pièce d'horlogerie comprenant un mouvement mécanique dont la marche est améliorée par un dispositif de correction d'une dérive temporelle éventuelle dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique qui cadence la marche du mouvement mécanique. La pièce d'horlogerie comprend un oscillateur mécanique dont la fréquence moyenne est synchronisée sur une fréquence de consigne déterminée par un oscillateur électronique auxiliaire.

**[0002]** En particulier, la pièce d'horlogerie est formée, d'une part, par un mouvement mécanique comprenant :

- un mécanisme indicateur d'au moins une donnée temporelle,
- un résonateur mécanique susceptible d'osciller le long d'un axe général d'oscillation autour d'une position neutre correspondant à son état d'énergie potentielle minimale,
- un dispositif d'entretien du résonateur mécanique formant avec ce dernier un oscillateur mécanique qui est agencé pour cadencer la marche du mécanisme indicateur,

et, d'autre part, par un dispositif de synchronisation agencé pour asservir la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de consigne déterminée par une base de temps de référence.

### Arrière-plan technologique

**[0003]** Des pièces d'horlogerie telles que définies dans le domaine de l'invention ont été proposées dans quelques documents antérieurs. Le brevet CH 597 636, publié en 1977, propose une telle pièce d'horlogerie en référence à sa figure 3. Le mouvement est équipé d'un résonateur formé par un balancier-spiral et d'un dispositif d'entretien classique comprenant une ancre et une roue d'échappement en liaison cinématique avec un barillet muni d'un ressort. Ce mouvement horloger comprend en outre un dispositif de régulation de la fréquence de son oscillateur mécanique. Ce dispositif de régulation comprend un circuit électronique et un dispositif de freinage électromagnétique formé d'une bobine plate, agencée sur un support sous la serge du balancier, et de deux aimants montés sur le balancier et agencés proches l'un de l'autre de manière à passer tous deux au-dessus de la bobine lorsque l'oscillateur est activé.

**[0004]** Le circuit électronique comprend une base de temps comprenant un résonateur à quartz et servant à générer un signal de fréquence de référence FR, cette fréquence de référence étant comparée avec la fréquence FG de l'oscillateur mécanique. La détection de la fréquence FG de l'oscillateur est réalisée via les signaux électriques générés dans la bobine par la paire d'aimants. La comparaison entre les deux fréquences FG et FR est effectuée par un compteur bidirectionnel recevant à ses deux entrées ces deux fréquences et fournissant en sortie un signal déterminant une différence de périodes comptabilisées pour les deux fréquences. Le circuit électronique comprend en outre un circuit logique qui analyse le signal de sortie du compteur pour commander un circuit d'application d'impulsions de freinage en fonction de ce signal de sortie, de manière à freiner le balancier lorsque le circuit logique a détecté une dérive temporelle correspondant à une valeur de la fréquence FG de l'oscillateur supérieure à la fréquence de référence FR. Le circuit d'application d'impulsions de freinage est agencé pour pouvoir engendrer un couple de freinage momentané sur le balancier via une interaction électromagnétique aimant-bobine et une charge commutable reliée à la bobine.

### Résumé de l'invention

**[0005]** Un but de la présente invention est de simplifier au maximum le circuit électronique d'un dispositif de synchronisation agencé pour asservir la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique d'un mouvement mécanique sur une fréquence de consigne déterminée par un oscillateur électronique auxiliaire, sans pour autant perdre en précision dans la marche de la pièce d'horlogerie équipée d'un tel dispositif de synchronisation.

**[0006]** Dans le cadre de la présente invention, on cherche de manière générale à améliorer la précision de la marche d'un mouvement horloger mécanique, c'est-à-dire de diminuer l'erreur journalière maximale de ce mouvement mécanique et plus globalement de diminuer de manière très significative une dérive temporelle possible sur une plus longue période (par exemple une année). En particulier, la présente invention cherche à atteindre un tel but pour un mouvement horloger mécanique dont la marche est réglée initialement au mieux. En effet, un but général de l'invention est de trouver un dispositif de correction de la marche d'un mouvement mécanique pour le cas où le fonctionnement naturel de ce mouvement mécanique conduirait à une certaine erreur journalière et par conséquent à une dérive temporelle croissante (erreur cumulée croissante), sans pour autant renoncer à ce qu'il puisse fonctionner de manière autonome avec la meilleure précision qu'il lui est possible d'avoir grâce à ses propres caractéristiques, c'est-à-dire en l'absence du dispositif de correction ou lorsque ce dernier est inactif.

**[0007]** A cet effet, la présente invention concerne une pièce d'horlogerie telle que définie dans le domaine de l'invention et dans laquelle le dispositif de synchronisation comprend un dispositif de freinage électromagnétique du résonateur mécanique, ce dispositif de freinage électromagnétique étant formé d'au moins une bobine et d'au moins un aimant permanent qui sont agencés de manière qu'une tension induite est générée entre les deux bornes de la bobine dans chaque alternance de

l'oscillation du résonateur mécanique pour une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, le dispositif de synchronisation étant agencé pour pouvoir diminuer momentanément l'impédance entre les deux bornes de la bobine. La pièce d'horlogerie est remarquable car le dispositif de synchronisation est agencé de manière à diminuer l'impédance entre les deux bornes de la bobine au cours d'intervalles de temps distincts $T_P$ et de manière que les débuts de deux intervalles de temps successifs quelconques, parmi les intervalles de temps distincts, présentent entre eux une distance temporelle $D_T$ égale à un nombre entier positif N multiplié par la moitié d'une période de consigne T0c pour l'oscillateur mécanique, soit $D_T$ = N.T0c/2. En particulier, le dispositif de synchronisation est agencé pour déterminer au moyen de la base de temps de référence le début de chacun des intervalles de temps distincts de manière à satisfaire la relation mathématique susmentionnée entre la distance temporelle $D_T$ et la période de consigne T0c.

**[0008]** Grâce aux caractéristiques de l'invention, de manière surprenante, l'oscillateur mécanique du mouvement horloger est asservi à l'oscillateur auxiliaire d'une manière efficace et rapide, comme ceci ressortira clairement de la description détaillée de l'invention qui suivra. La fréquence d'oscillation de l'oscillateur mécanique (oscillateur mécanique esclave) est synchronisée sur la fréquence de consigne déterminée par l'oscillateur auxiliaire (oscillateur maître), et ceci sans asservissement à boucle fermée et sans nécessiter de capteur de mesure du mouvement d'oscillation de l'oscillateur mécanique. Le dispositif de synchronisation fonctionne donc à boucle ouverte et il permet de corriger aussi bien une avance qu'un retard dans la marche naturelle du mouvement mécanique, comme ceci sera exposé par la suite. Ce résultat est tout-à-fait remarquable.

**[0009]** On comprend par 'synchronisation sur un oscillateur maître' un asservissement (à boucle ouverte, donc sans rétroaction) de l'oscillateur mécanique esclave à l'oscillateur maître. Le fonctionnement du dispositif de synchronisation est tel que la fréquence à laquelle interviennent les intervalles de temps, où l'impédance du circuit relié aux deux bornes de la bobine est diminuée, est imposée à l'oscillateur mécanique esclave qui cadence la marche du mécanisme indicateur d'une donnée temporelle. Plus généralement, il n'est même pas nécessaire que la succession de tels intervalles de temps distincts interviennent périodiquement à une fréquence donnée, car il suffit que les débuts (ou, de manière équivalente, les instants milieux) de deux intervalles de temps successifs quelconques parmi ces intervalles de temps distincts présentent entre eux une distance temporelle $D_T$ telle que définie précédemment, avec un nombre entier positif N qui peut varier au cours du temps. Nous ne sommes pas ici dans le cas standard d'un oscillateur forcé, ni même dans la situation d'oscillateurs couplés.

**[0010]** Dans la présente invention, les distances temporelles $D_T$ possibles, pour une période de consigne T0c prédéfinie, déterminent la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique et donc le cadencement de la marche du mécanisme. Comme les distances temporelles sont déterminées par un oscillateur auxiliaire précis, la fréquence moyenne est déterminée par cet oscillateur auxiliaire de sorte que la précision de la marche du mécanisme est en relation directe avec celle de l'oscillateur auxiliaire. On comprend par 'cadencer la marche d'un mécanisme' le fait de rythmer le mouvement des éléments mobiles de ce mécanisme lorsqu'il fonctionne, en particulier de déterminer les vitesses de rotation de ses roues et ainsi d'au moins un indicateur d'une donnée temporelle.

**[0011]** Dans un mode de réalisation principal, le résonateur mécanique est formé par un balancier oscillant autour d'un axe d'oscillation, et le dispositif de synchronisation est agencé de manière à déclencher périodiquement les intervalles de temps distincts $T_P$, lesquels présentent une même valeur, et de manière que la fréquence de déclenchement $F_D$ de ces intervalles de temps distincts vaut deux fois une fréquence de consigne F0c, égale par définition à l'inverse de la période de consigne T0c, divisée par un nombre entier positif M, soit $F_D$ = 2.F0c / M, la valeur des intervalles de temps distincts $T_P$ étant inférieure à la demi-période de consigne, soit $T_P$ < T0c/2. Dans une variante préférée, la valeur des intervalles de temps distincts $T_P$ est prévue inférieure au quart de la période de consigne T0c, soit $T_P$ < T0c/4.

## Brève description des figures

**[0012]** L'invention sera décrite ci-après en détails à l'aide des dessins annexés, donnés à titre d'exemples nullement limitatifs, dans lesquels :

- La Figure 1 montre un premier mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie selon l'invention,
- La Figure 2 est une vue partielle du premier mode de réalisation selon la Figure 1,
- La Figure 3 montre le schéma électronique d'une première variante du circuit de commande du dispositif de freinage électromagnétique selon l'invention,
- La Figure 4 montre le schéma électronique d'une deuxième variante du circuit de commande du dispositif de freinage électromagnétique selon l'invention,
- Les Figures 5A, 5B et 5C sont des graphes donnant l'évolution temporelle de divers paramètres physiques de l'oscillateur mécanique et du dispositif de synchronisation du premier mode de réalisation pour diverses relations entre la fréquence de consigne F0c et la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique, respectivement F0 > F0c, F0 < F0c, F0 = F0c,
- La Figure 6 montre l'application d'une première impulsion de freinage à un résonateur mécanique dans une certaine alternance de son oscillation avant qu'il passe par sa position neutre, ainsi que la vitesse angulaire du balancier de ce résonateur mécanique

et sa position angulaire dans un intervalle temporel au cours duquel intervient la première impulsion de freinage,

- La Figure 7 est une figure similaire à la Figure 6 mais pour l'application d'une deuxième impulsion de freinage dans une certaine alternance de l'oscillation d'un oscillateur mécanique après qu'il a passé par sa position neutre,
- Les Figures 8A, 8B et 8C montrent respectivement la position angulaire d'un balancier-spiral au cours d'une période d'oscillation, la variation de la marche du mouvement horloger obtenue pour une impulsion de freinage de durée fixe, pour trois valeurs d'un couple de freinage constant, en fonction de la position angulaire du balancier spiral, et la puissance de freinage correspondante,
- Les Figures 9, 10 et 11 montrent respectivement trois situations différentes pouvant intervenir dans une phase initiale suite à l'enclenchement du dispositif de correction dans une pièce d'horlogerie selon l'invention,
- La Figure 12 est un graphe explicatif du processus physique intervenant suite à l'enclenchement du dispositif de correction dans la pièce d'horlogerie selon l'invention et conduisant à la synchronisation voulue pour le cas où la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique esclave est supérieure à la fréquence de consigne,
- La Figure 13 représente, dans le cas de la Figure 12, une oscillation de l'oscillateur mécanique esclave et les impulsions de freinage dans une phase synchrone stable pour une variante où une impulsion de freinage intervient dans chaque alternance,
- La Figure 14 est un graphe explicatif du processus physique intervenant suite à l'enclenchement du dispositif de correction dans la pièce d'horlogerie selon l'invention et conduisant à la synchronisation voulue pour le cas où la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique esclave est inférieure à la fréquence de consigne,
- La Figure 15 représente, dans le cas de la Figure 14, une oscillation de l'oscillateur mécanique esclave et les impulsions de freinage dans une phase synchrone stable pour une variante où une impulsion de freinage intervient dans chaque alternance,
- Les Figures 16 et 17 donnent, respectivement pour les deux cas des Figures 12 et 14, le graphe de la position angulaire d'un oscillateur mécanique et les périodes d'oscillation correspondantes pour un mode de fonctionnement du dispositif de correction où une impulsion de freinage intervient toutes les quatre périodes d'oscillation,
- Les Figures 18 et 19 sont respectivement des agrandissements partiels des Figures 16 et 17,
- La Figure 20 représente, de manière similaire aux deux figures précédentes, une situation spécifique dans laquelle la fréquence d'un oscillateur mécanique est égale à la fréquence de freinage,
- La Figure 21 montre schématiquement l'oscillateur mécanique et le dispositif électromagnétique d'un deuxième mode de réalisation,
- La Figure 22 donne, dans le cadre du deuxième mode de réalisation, des graphes de l'évolution temporelle de la position angulaire de l'oscillateur mécanique, de la tension induite dans une bobine du dispositif électromagnétique en fonction d'un signal de commande de ce dispositif électromagnétique en régime stationnaire,
- La Figure 23 montre schématiquement l'oscillateur mécanique et le dispositif électromagnétique d'un troisième mode de réalisation,
- La Figure 24 donne, dans le cadre du troisième mode de réalisation, des graphes de l'évolution temporelle de la position angulaire de l'oscillateur mécanique, de la tension induite dans une bobine du dispositif électromagnétique en fonction d'un signal de commande de ce dispositif électromagnétique en régime stationnaire,
- La Figure 25 est similaire à la Figure 24 pour une variante de commande du dispositif électromagnétique dans le cadre du troisième mode de réalisation,
- La Figure 26 est une vue en coupe de l'oscillateur mécanique et du dispositif électromagnétique d'un quatrième mode de réalisation,
- La Figure 27 est coupe transversale, selon la ligne A-A de l'oscillateur mécanique et du dispositif électromagnétique de la Figure 26, et
- Les Figures 28A, 28B et 28C sont des graphes donnant l'évolution temporelle de divers paramètres physiques de l'oscillateur mécanique et du dispositif de synchronisation du quatrième mode de réalisation pour diverses relations entre la fréquence de consigne F0c et la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique, respectivement F0 > F0c, F0 < F0c, F0 = F0c.

## Description détaillée de l'invention

**[0013]** Un premier mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie selon l'invention sera décrit en référence aux Figures 1 à 4 et 5A à 5C. A la Figure 1 est représentée, en partie schématiquement, une pièce d'horlogerie 2 comprenant un mouvement mécanique 4 qui comporte au moins un mécanisme 12 indicateur d'une donnée temporelle. Le mécanisme 12 comprend un rouage 16 entraîné par un barillet 14 (le mécanisme est représenté partiellement à la Figure 1). Le mouvement mécanique comprend encore un résonateur mécanique 6, formé par un balancier 8 et un spiral 10, qui est agencé sur une platine 5 définissant un support du résonateur mécanique, et un dispositif d'entretien de ce résonateur mécanique qui est formé par un échappement 18, ce dispositif d'entretien formant avec le résonateur mécanique un oscillateur mécanique qui cadence la marche du mécanisme indicateur. L'échappement 18 comprend classiquement une ancre et une roue d'échappement, cette der-

nière étant reliée cinématiquement au barillet par l'intermédiaire du rouage 16. Le résonateur mécanique est susceptible d'osciller, autour d'une position neutre (position de repos / position angulaire zéro) correspondant à son état d'énergie potentielle minimale, le long d'un axe circulaire (le rayon de cet axe est sans importance puisque la position du balancier le long de cet axe est donnée par un angle). L'axe circulaire définit un axe général d'oscillation qui indique la nature du mouvement du résonateur mécanique, lequel peut être par exemple linéaire dans un autre mode de réalisation.

**[0014]** Chaque oscillation du résonateur mécanique définit une période d'oscillation qui est formée de deux alternances, chacune entre deux positions angulaires extrêmes de l'oscillation et avec une rotation en sens inverse de l'autre. Lorsque le résonateur mécanique atteint une position angulaire extrême, définissant l'amplitude d'oscillation, sa vitesse de rotation est nulle et le sens de rotation s'inverse. Chaque alternance présente deux demi-alternances (dont la durée peut être différente en fonction d'événements perturbateurs), soit une première demi-alternance intervenant avant le passage du résonateur mécanique par sa position neutre et une seconde demi-alternance intervenant après ce passage par la position neutre.

**[0015]** La pièce d'horlogerie 2 comprend un dispositif de synchronisation 20 de l'oscillateur mécanique, formé du résonateur mécanique 6 et de l'échappement 18, sur une base de temps de référence 22 constituée par un oscillateur auxiliaire qui comprend un résonateur à quartz 35 et un circuit d'horloge 36 entretenant le résonateur à quartz et délivrant un signal de fréquence de référence $S_R$. L'oscillateur à quartz définit un oscillateur maître. La base de temps de référence est associée au dispositif de commande 24 du dispositif de synchronisation auquel elle fournit le signal $S_R$. On notera que d'autres types d'oscillateurs auxiliaires peuvent être prévus, notamment un oscillateur intégré entièrement dans un circuit électronique avec le circuit de commande. Généralement, l'oscillateur auxiliaire est par nature ou par construction plus précis que l'oscillateur mécanique agencé dans le mouvement horloger, cet oscillateur mécanique définissant un oscillateur esclave dans le cadre de l'invention. De manière générale, comme on le comprendra par la suite, le dispositif de synchronisation 20 est agencé pour asservir la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de consigne déterminée par l'oscillateur auxiliaire.

**[0016]** Ensuite, le dispositif de synchronisation 20 comprend un dispositif de freinage électromagnétique 26 du résonateur mécanique 6. Par 'freinage électromagnétique' on comprend un freinage du résonateur mécanique engendré via une interaction électromagnétique entre au moins un aimant permanent, porté par le résonateur mécanique ou un support de ce résonateur mécanique, et au moins une bobine portée respectivement par le support ou le résonateur mécanique et associée à un circuit électronique dans lequel un courant induit dans la bobine par l'aimant peut être engendré. De manière générale, le dispositif de freinage électromagnétique est ainsi formé d'au moins une bobine 28 et d'au moins un aimant permanent qui sont agencés de manière qu'une tension induite est générée entre les deux bornes 28A, 28B de la bobine 28 dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique pour une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique. La bobine 28 est du type galette (disque ayant une hauteur inférieure à son diamètre), sans noyau ferromagnétique. Dans le premier mode de réalisation, il est prévu une pluralité d'aimants bipolaires 30, 32 qui sont agencés de manière juxtaposée sur la serge 9 du balancier avec une alternance des polarités magnétiques selon la direction de l'axe d'oscillation 34. Dans une variante équivalente, il est prévu un aimant annulaire ayant une aimantation axiale avec des secteurs successifs correspondant aux aimants bipolaires 30, 32, ces secteurs successifs présentant des polarités alternées et définissant chacun un angle au centre (une 'ouverture' angulaire) ayant sensiblement une même valeur. Dans la variante représentée, les aimants bipolaires 30, 32 définissent huit secteurs annulaires aimantés présentant chacun une distance angulaire de 45° avec des polarités magnétiques alternées. Dans le cas du premier mode de réalisation, on a un nombre pair 2N de secteurs annulaires aimantés, N étant un nombre entier positif, ces secteurs étant agencés de manière circulaire, notamment sur la serge 9 du balancier 8 formant le résonateur mécanique 6.

**[0017]** La bobine 28 est agencée sur la platine 5 de manière à être traversée par le flux magnétique des aimants bipolaires / secteurs annulaires aimantés lorsque le balancier oscille. Avantageusement, le diamètre de la bobine 28 est prévu de manière qu'elle soit substantiellement comprise dans une ouverture angulaire, relativement à l'axe d'oscillation, qui soit sensiblement égale à celle définie par chaque aimant bipolaire / secteur annulaire aimanté. Cependant, dans d'autres variantes, le diamètre de la bobine 28 peut être prévu plus grand et présenter par exemple une ouverture angulaire correspondant sensiblement au double de celle d'un secteur annulaire aimanté. De plus, dans une autre variante, il est prévu une pluralité de bobines galette présentant entre elles, prises deux à deux, un décalage angulaire correspondant à un nombre entier de périodes magnétiques (une période magnétique étant donnée par la distance angulaire de deux secteurs annulaires aimantés adjacents). Ces bobines ne présentant ainsi pas de déphasage électromagnétique (c'est-à-dire que les déphasages sont des multiples entiers de 360°), les tensions induites dans ces bobines présentent chacune une variation temporelle identique et simultanée aux autres, de sorte que ces tensions induites s'additionnent. La pluralité des bobines peuvent être agencées en série ou en parallèle. Le nombre de secteurs annulaires aimantés, le nombre de bobines et leurs dimensions caractéristiques sont sélectionnés en fonction de la force de l'interaction électromagnétique souhaitée pour permettre l'as-

servissement voulu de l'oscillateur mécanique.

**[0018]** Selon l'invention, le dispositif de synchronisation est agencé pour pouvoir diminuer momentanément l'impédance entre les deux bornes de la bobine. Selon un mode de synchronisation général implémenté dans le dispositif de synchronisation de l'invention, ce dernier est agencé de manière à diminuer l'impédance entre les deux bornes de la bobine au cours d'intervalles de temps distincts $T_P$ et de manière que les débuts respectifs de deux intervalles de temps successifs quelconques, parmi ces intervalles de temps distincts, présentent entre eux une distance temporelle $D_T$ égale à un nombre entier positif N multiplié par la moitié d'une période de consigne T0c (c'est-à-dire par une demi-période de consigne) pour l'oscillateur mécanique, soit $D_T$ = N.T0c/2. Le dispositif de synchronisation est agencé pour déterminer au moyen de la base de temps de référence 22 le début de chacun des intervalles de temps distincts de manière à satisfaire la relation mathématique susmentionnée entre la distance temporelle $D_T$ et la période de consigne T0c.

**[0019]** Dans les modes de réalisation décrits, le résonateur mécanique est formé par un balancier tournant autour d'un axe d'oscillation. Dans les modes de synchronisation implémentés dans les dispositifs de synchronisation qui sont représentés aux Figures 5A à 5C et 28A à 28C, il est prévu de déclencher périodiquement les intervalles de temps distincts $T_P$ au cours desquels l'impédance entre les bornes de la bobine est diminuée, c'est-à-dire que ces intervalles de temps sont prévus avec une distance temporelle $T_D$ entre eux qui est constante. La fréquence de déclenchement $F_D$ de ces intervalles de temps distincts vaut deux fois la fréquence de consigne F0c, égale par définition à l'inverse de la période de consigne T0c, divisée par un nombre entier positif M, soit $F_D$ = 2.F0c / M. Ensuite, de préférence, les intervalles de temps distincts $T_P$ ont une même valeur qui est prévue inférieure à la demi-période de consigne, soit $T_P$ < T0c/2. Finalement, le dispositif de synchronisation est agencé de manière à engendrer un court-circuit entre les deux bornes 28A et 28B de la bobine 28 durant les intervalles de temps distincts $T_P$ pour diminuer l'impédance entre les deux bornes de cette bobine.

**[0020]** Dans la variante du premier mode de réalisation décrite à l'aide des Figures 5A à 5C, le nombre entier M vaut deux (M=2), de sorte que la fréquence de déclenchement $F_D$ est égale à la fréquence de consigne F0c et les distances temporelles $T_D$ successives sont égales à la période de consigne T0c. Ensuite, la valeur des intervalles de temps distincts $T_P$ est avantageusement inférieure au quart de la période de consigne T0c, soit $T_P$ < T0c/4. Dans ce premier mode de réalisation, comme on peut le voir aux Figures 5A à 5C, le dispositif de freinage électromagnétique 26 est agencé de manière qu'une tension induite est engendrée dans la bobine 28 sensiblement sans interruption pour toute oscillation du résonateur mécanique 6 dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique formé par ce résonateur mécanique.

**[0021]** Avant de considérer plus en détails les Figures 5A à 5C, le comportement d'un oscillateur mécanique soumis à des impulsions de freinage de courte durée sera premièrement résumé ici, bien qu'un exposé plus détaillé à ce sujet soit donné par la suite. On a observé que, lorsque l'impulsion de freinage est générée entre le début d'une alternance et le passage du résonateur par sa position neutre dans cette alternance, une telle impulsion de freinage induit un déphasage temporel négatif dans l'oscillation du résonateur. Ainsi, la durée de l'alternance concernée est augmentée relativement à la durée T0/2 d'une alternance lors de l'oscillation naturelle de l'oscillateur mécanique. Ceci engendre donc une diminution ponctuelle de la fréquence de l'oscillateur mécanique et permet d'engendrer un certain retard dans la marche de la pièce d'horlogerie pour corriger, le cas échéant, une avance prise par cet oscillateur mécanique. Par contre, lorsque l'impulsion de freinage est générée entre le passage du résonateur par sa position neutre dans une alternance et la fin de cette alternance, une telle impulsion de freinage induit un déphasage temporel positif dans l'oscillation du résonateur. Ainsi, la durée de l'alternance concernée est diminuée relativement à la durée T0/2 d'une alternance lors de l'oscillation naturelle de l'oscillateur mécanique. Ceci engendre donc une augmentation ponctuelle de la fréquence de l'oscillateur mécanique et permet d'engendrer une certaine avance dans la marche de la pièce d'horlogerie pour corriger, le cas échéant, un retard pris par cet oscillateur mécanique.

**[0022]** Aux Figures 5A à 5C sont représentées, dans une phase stable de la synchronisation obtenue par le dispositif de synchronisation selon l'invention, les courbes de la position angulaire et de la vitesse angulaire du balancier-spiral 6 ainsi qu'un signal digital de commande $S_C$ engendré dans le circuit de commande 24 et fourni à un interrupteur 40 agencé pour court-circuiter les deux bornes 28A, 28B de la bobine 28 (voir Figures 3 et 4) durant des impulsions 58 qui définissent les intervalles de temps distincts $T_P$. De plus, sur ces figures sont représentés un signal de la tension induite dans la bobine 28, résultant de l'oscillation du résonateur mécanique 6 et des impulsions de court-circuit 58, et un signal du couple de freinage appliqué au résonateur mécanique durant les impulsions de court-circuit. On notera que la phase stable représentée ici intervient suite à une phase transitoire (phase initiale) qui sera décrite par la suite. De manière remarquable, au cours de la phase stable, aussi nommée phase synchrone, la fréquence d'oscillation du résonateur mécanique est asservie à la fréquence de consigne F0c et les première et deuxième parties $T_B$ et $T_A$ des impulsions de court-circuit 58 présentent un rapport sensiblement constant et défini. Dans cette phase stable, le dispositif de synchronisation stabilise de manière automatique, sans capteur mesurant un paramètre de l'oscillation du résonateur mécanique 6 et sans boucle de rétroaction, la fréquence d'oscillation de ce résonateur mécanique à la fréquence de consigne F0c.

**[0023]** La Figure 5A correspond à une situation où la

fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique de la pièce d'horlogerie est supérieure à la fréquence de consigne F0c, de sorte que cette pièce d'horlogerie sans le dispositif de synchronisation présenterait une dérive temporelle positive correspondant à une avance dans la marche de la pièce d'horlogerie. On observe que les impulsions de court-circuit 58 interviennent autour d'une position angulaire extrême, c'est-à-dire que les intervalles de temps distincts $T_P$ englobent une inversion du sens du mouvement d'oscillation qui intervient entre une alternance A2 et une alternance A1 de l'oscillation alors que la vitesse de rotation (vitesse angulaire) est nulle. Les périodes d'oscillation sont égales à la période de consigne T0c, mais on remarque que les deux alternances A1 et A2 qui constituent chaque période d'oscillation ne sont pas égales. En effet, l'alternance A1 dure ici plus longtemps que l'alternance A2, car un freinage plus important intervient dans l'alternance A1, avant le passage du résonateur mécanique par sa position neutre (angle 0°), que dans l'alternance A2 après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre. On notera qu'aucun couple de freinage n'est appliqué au résonateur mécanique ni après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans l'alternance A1, ni avant le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans l'alternance A2.

**[0024]** L'impulsion de freinage est formée de deux petits lobes 50 situés respectivement de chaque côté de l'instant du passage du résonateur mécanique par la position angulaire extrême, en présentant une symétrie centrale relativement à cet instant (les signes mathématiques opposés des deux lobes 50 provient du changement de sens dans le mouvement d'oscillation), et d'un lobe 52 de plus grande amplitude qui intervient dans l'alternance A1 de chaque période d'oscillation, dans la première demi-alternance avant le passage du résonateur mécanique par sa position neutre. Les effets des deux lobes 50 se compensent et n'engendrent donc globalement aucun déphasage dans l'oscillation du résonateur mécanique, alors que le couple de freinage occasionné par le lobe 52 dans chaque alternance A1 engendre une augmentation de la durée de celle-ci, de sorte que la durée de la période d'oscillation concernée est égale à celle de la période de consigne T0c. La fréquence d'oscillation instantanée est ainsi égale à la fréquence de consigne F0c qui est, comme indiqué, inférieure à la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique. L'apparition du lobe 52 seulement dans les alternances A1 résulte du fait que les instants milieu des impulsions de court-circuit 58 interviennent avec un certain retard relativement aux passages du résonateur mécanique par une position angulaire extrême, ceci découlant du fait que la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique est supérieure à la fréquence de consigne F0c. En effet, la partie $T_B$ des impulsions 58 intervenant avant le passage du résonateur mécanique par une position extrême est inférieure à la partie $T_A$ des impulsions 58 intervenant après ce passage.

**[0025]** La Figure 5B correspond à une situation où la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique de la pièce d'horlogerie est inférieure à la fréquence de consigne F0c, de sorte que cette pièce d'horlogerie sans le dispositif de synchronisation présenterait une dérive temporelle négative correspondant à un retard dans la marche de la pièce d'horlogerie. On observe encore que les impulsions de court-circuit 58 interviennent autour d'une position angulaire extrême et que l'alternance A1 dure plus longtemps que l'alternance A2, car un freinage plus important intervient dans l'alternance A2, ici après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre (angle 0°), que dans l'alternance A1 avant le passage du résonateur mécanique par sa position neutre. Comme dans la situation précédente, aucun couple de freinage n'est appliqué au résonateur mécanique ni après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans l'alternance A1, ni avant le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans l'alternance A2. L'impulsion de freinage est ici formée des deux petits lobes 50 situés respectivement de chaque côté de la position angulaire extrême et d'un lobe 54 de plus grande amplitude qui intervient dans l'alternance A2 de chaque période d'oscillation, dans la seconde demi-alternance après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre.

**[0026]** Les effets des deux lobes 50 se compensent toujours, alors que le couple de freinage occasionné par le lobe 54 dans chaque alternance A2 engendre une diminution de la durée de celle-ci, de sorte que la durée de la période d'oscillation concernée est égale à celle de la période de consigne T0c. La fréquence d'oscillation instantanée est ainsi égale à la fréquence de consigne F0c qui est, comme indiqué, supérieure à la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique. L'apparition du lobe 54 seulement dans les alternances A2 résulte du fait que les instants milieu des impulsions de court-circuit 58 interviennent ici avec une certaine avance relativement aux passages du résonateur mécanique par une position angulaire extrême, ceci découlant du fait que la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique est inférieure à la fréquence de consigne F0c. En effet, la partie $T_A$ des impulsions 58 intervenant après le passage du résonateur mécanique par une position extrême est inférieure à la partie $T_B$ des impulsions 58 intervenant avant ce passage.

**[0027]** Pour être complet, on a représenté à la Figure 5C une situation où la fréquence naturelle F0 de l'oscillateur mécanique de la pièce d'horlogerie est égale à la fréquence de consigne F0c. Il résulte de cette situation que la partie $T_A$ des impulsions 58 intervenant après le passage du résonateur mécanique par une position angulaire extrême est égale à la partie $T_B$ des impulsions 58 intervenant avant ce passage, de sorte que les parties 50A des impulsions de freinage intervenant dans les alternances A2 juste avant le passage du résonateur mécanique par une position extrême ont un même profil, avec un signe mathématique opposé, que les parties 50B

des impulsions de freinage intervenant dans les alternances A1 juste après ce passage et présentent ainsi une symétrie centrale relativement à l'instant du passage par la position angulaire extrême concernée. Par conséquent, les effets des parties 50A et 50B des impulsions de freinage intervenant au court de chaque impulsion de court-circuit 58, et donc de chaque intervalle de temps distincts $T_P$, se compensent mutuellement de sorte que, dans ce cas particulier, le dispositif de synchronisation n'influence pas la marche de la pièce d'horlogerie, laquelle est précise dans la mesure où elle est naturellement synchrone avec la base de temps de référence 22.

**[0028]** La Figure 3 est un schéma qui montre une première variante de réalisation 24A du circuit de commande 24 du dispositif de synchronisation 20. Le circuit de commande 24A est relié d'une part au circuit d'horloge 36 et, d'autre part, à la bobine 28. Le circuit d'horloge entretient le résonateur à quartz 35 et génère en retour un signal d'horloge $S_R$ à une fréquence de référence, notamment égale à $2^{15}$ Hz. Le signal d'horloge $S_R$ est fourni successivement à deux diviseurs DIV1 et DIV2 (ces deux diviseurs pouvant former deux étages d'un même diviseur). Le Diviseur DIV2 fournit un signal périodique $S_D$ directement à un minuteur 38 ('Timer'). A chaque détection d'une transition caractéristique dans le signal périodique $S_D$, le minuteur rend passant l'interrupteur 40 durant un intervalle de temps $T_P$, pour court-circuiter la bobine 28, en lui fournissant un signal de commande $S_C$, ayant une fréquence de déclenchement $F_D$ identique à celle du signal périodique $S_D$, qui déclenche périodiquement le minuteur 38. Comme la durée des impulsions de freinage (correspondant à celle des impulsions de court-circuit) est prévue ici de préférence inférieure à $T0_C/4$ (par exemple $T0_C$ = 250 ms) et même bien inférieure à cette valeur dans le cas considéré, notamment entre 10 ms et 30 ms, le minuteur 38 reçoit un signal de cadencement du diviseur DIV1.

**[0029]** Par exemple, dans le cas d'une fréquence de consigne F0c = 4 Hz et d'une fréquence de déclenchement $F_D$ égale à cette fréquence de consigne, comme dans l'exemple donné aux Figures 5A à 5C, le diviseur DIV2 fournit directement des impulsions de déclenchement au minuteur à la fréquence $F_D$ = 4 Hz. Si il est prévu de fournir une impulsion de court-circuit chaque seconde, c'est-à-dire toutes les quatre périodes d'oscillation, et d'avoir ainsi une distance temporelle $D_T$ = 1 s entre les intervalles de temps distincts $T_P$ où l'impédance entre les bornes 28A et 28B de la bobine est diminuée, alors on peut utiliser la sortie terminale d'un circuit diviseur horloger classique qui fournit, à la sortie de l'étage terminal de sa chaîne de division par deux, un signal périodique à la fréquence de 1 Hz. Pour une fréquence de déclenchement $F_D$ = 4 Hz mentionnée ci-avant, on peut aussi utiliser un circuit diviseur horloger classique, mais en prenant en sortie le signal fourni deux étages avant la sortie terminale dans la chaîne de division. On remarquera que le circuit de commande 24A du dispositif de synchronisation est très simple. Il peut être miniaturisé aisément et sa consommation électrique est très faible. Aucun microcontrôleur n'est nécessaire.

**[0030]** On notera que dans un mode particulier de synchronisation, on peut prévoir de générer les impulsions de court-circuit par groupes, par exemple une succession de séquences avec quatre impulsions dans quatre périodes d'oscillation successives puis aucune impulsion pendant dix secondes, soit pendant quarante périodes pour une fréquence F0c = 4 Hz. Dans un autre mode de synchronisation, on peut prévoir de varier les intervalles de temps $T_P$ (donc la durée des impulsions de court-circuit), par exemple en prévoyant une durée plus longue dans une phase initiale, pour engendrer un couple de freinage plus important, que dans un régime nominal qui lui succède. On notera que procédé de synchronisation est robuste. Par exemple, il n'est pas nécessaire que les intervalles de temps $T_P$ soient mesurés précisément, c'est-à-dire avec autant de précision que les distances temporelles $D_T$ entre les débuts de ces intervalles de temps. Ainsi, on pourrait prévoir un minuteur avec son propre circuit de cadencement, moins précis que la base de temps de référence 22.

**[0031]** Dans une deuxième variante de réalisation 24B, montrée à la Figure 4, du circuit de commande 24 du dispositif de synchronisation 20, les diviseurs DIV1 et DIV2 forment ensemble un circuit diviseur horloger classique qui fournit donc en sortie un signal périodique $S_D$ ayant une fréquence égale à 1Hz. Ce signal $S_D$ est fourni à un compteur à N qui définit un diviseur additionnel, lequel génère le signal périodique $S_P$ qu'il fournit au minuteur 38. Le signal de commande $S_C$ fourni par le minuteur à l'interrupteur 40 présente une fréquence de déclenchement $F_D$ égale à celle du signal périodique $S_P$. Ainsi, dans un exemple où la fréquence de consigne $F0_C$ de l'oscillateur mécanique est égal à 4 Hz ($F0_C$ = 4 Hz) et le nombre N est égal à huit, la fréquence de déclenchement $F_D$ des signaux périodiques $S_P$ et $S_C$ est alors de 1/8 Hz, ce qui veut dire qu'il est prévu une impulsion de freinage (impulsion de court-circuit) par 32 périodes de consigne T0c, soit environ une impulsion après 32 périodes de l'oscillateur mécanique dans la mesure où sa fréquence naturelle F0 est prévue proche de la fréquence de consigne $F0_C$.

**[0032]** A la Figure 4, le dispositif de synchronisation comprend en outre un dispositif d'alimentation 44 formé par un circuit redresseur 46 (du type simple ou double alternance) et par une capacité de stockage $C_{AL}$ reliée à la masse (potentiel de référence du dispositif de synchronisation). Le circuit redresseur est constamment relié en entrée à une borne de la bobine de sorte qu'en dehors des impulsions de court-circuit il peut redresser une tension induite dans la bobine 28 par les aimants permanents 30,32. Cette tension induite redressée et accumulée dans la capacité de stockage sert à l'alimentation électrique du dispositif de synchronisation dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique. Le circuit de commande 24B du dispositif de synchronisation est très simple et autonome. Il consomme peu et

prend un minimum d'énergie à l'oscillateur mécanique pour effectuer efficacement la synchronisation selon l'invention.

**[0033]** On décrira ci-après, en référence aux Figures 6 et 7, un phénomène physique remarquable mis en lumière dans le cadre de développements ayant conduit à la présente invention et intervenant dans le procédé de synchronisation implémenté dans la pièce d'horlogerie selon l'invention. La compréhension de ce phénomène permettra de mieux comprendre la synchronisation obtenue par le dispositif de synchronisation régulant la marche du mouvement mécanique.

**[0034]** Aux Figures 6 et 7, le premier graphe indique l'instant $t_{P1}$ auquel une impulsion de freinage P1, respectivement P2 est appliquée au résonateur mécanique considéré pour effectuer une correction de la marche du mécanisme qui est cadencée par l'oscillateur mécanique formé par ce résonateur. Les deux derniers graphes montrent respectivement la vitesse angulaire (valeurs en radian par seconde : [rad/s]) et la position angulaire (valeurs en radian : [rad]) de l'organe oscillant (par la suite aussi 'le balancier') du résonateur mécanique au cours du temps. Les courbes 90 et 92 correspondent respectivement à la vitesse angulaire et à la position angulaire du balancier oscillant librement (oscillation à sa fréquence naturelle) avant l'intervention d'une impulsion de freinage. Après l'impulsion de freinage sont représentées les courbes de vitesse 90a et 90b correspondant au comportement du résonateur respectivement dans le cas perturbé par l'impulsion de freinage et le cas non perturbé. De même, les courbes de position 92a et 92b correspondent au comportement du résonateur respectivement dans le cas perturbé par l'impulsion de freinage et le cas non perturbé. Aux figures, les instants $t_{P1}$ et $t_{P2}$ auxquels interviennent les impulsions de freinage P1 et P2 correspondent aux positions temporelles du milieu de ces impulsions. Cependant, on considère le début de l'impulsion de freinage et sa durée comme les deux paramètres qui définissent temporellement une impulsion de freinage.

**[0035]** Par impulsion de freinage, on comprend l'application momentanée d'un couple de force au résonateur mécanique qui freine son organe oscillant (balancier), c'est-à-dire qui s'oppose au mouvement d'oscillation de cet organe oscillant. Dans le cas d'un couple non nul qui est variable, la durée de l'impulsion est définie généralement comme la partie de cette impulsion qui présente un couple de force significatif pour freiner le résonateur mécanique. On notera qu'une impulsion de freinage peut présenter une forte variation. Elle peut même être hachée et former une succession d'impulsions plus courtes.

**[0036]** Chaque période d'oscillation libre T0 de l'oscillateur mécanique définit une première alternance $A0^1$ suivie d'une deuxième alternance $A0^2$ intervenant chacune entre deux positions extrêmes définissant l'amplitude d'oscillation de cet oscillateur mécanique, chaque alternance ayant une durée identique T0/2 et présentant un passage du résonateur mécanique par sa position zéro à un instant médian. Les deux alternances successives d'une oscillation définissent deux demi-périodes au cours desquelles le balancier subit respectivement un mouvement d'oscillation dans un sens et ensuite un mouvement d'oscillation dans l'autre sens. En d'autres termes, une alternance correspond ici à un balancement du balancier dans un sens ou l'autre sens entre ses deux positions extrêmes définissant l'amplitude d'oscillation. De manière générale, on observe une variation de la période d'oscillation au cours de laquelle interviennent une impulsion de freinage et donc une variation ponctuelle de la fréquence de l'oscillateur mécanique. De fait, la variation temporelle concerne la seule alternance au cours de laquelle intervient l'impulsion de freinage. Par 'instant médian', on comprend un instant intervenant sensiblement au milieu des alternances. C'est précisément le cas lorsque l'oscillateur mécanique oscille librement. Par contre, pour les alternances où interviennent des impulsions de régulation, cet instant médian ne correspond plus exactement au milieu de la durée de chacune de ces alternances du fait de la perturbation de l'oscillateur mécanique engendrée par le dispositif de régulation.

**[0037]** On décrira premièrement le comportement de l'oscillateur mécanique dans un premier cas de correction de sa fréquence d'oscillation, qui correspond à celui montré à la Figure 6. Après une première période T0 commence alors une nouvelle période T1, respectivement une nouvelle alternance A1 au cours de laquelle intervient une impulsion de freinage P1. A l'instant initial $t_{D1}$ débute l'alternance A1, le résonateur 14 occupant une position angulaire positive maximale correspondant à une position extrême. Ensuite intervient l'impulsion de freinage P1 à l'instant $t_{P1}$ qui est situé avant l'instant médian $t_{N1}$ auquel le résonateur passe par sa position neutre et donc également avant l'instant médian correspondant $t_{N0}$ de l'oscillation non perturbée. Finalement l'alternance A1 se termine à l'instant final $t_{F1}$. L'impulsion de freinage est déclenchée après un intervalle de temps $T_{A1}$ suivant l'instant $t_{D1}$ marquant le début de l'alternance A1. La durée $T_{A1}$ est inférieure à une demi-alternance T0/4 diminuée de la durée de l'impulsion de freinage P1. Dans l'exemple donné, la durée de cette impulsion de freinage est bien inférieure à une demi-alternance T0/4.

**[0038]** Dans ce premier cas, l'impulsion de freinage est donc générée entre le début d'une alternance et le passage du résonateur par sa position neutre dans cette alternance. La vitesse angulaire en valeur absolue diminue au moment de l'impulsion de freinage P1. Une telle impulsion de freinage induit un déphasage temporel négatif $T_{C1}$ dans l'oscillation du résonateur, comme le montrent à la Figure 6 les deux courbes 90a et 90b de la vitesse angulaire et aussi les deux courbes 92a et 92b de la position angulaire, c'est-à-dire un retard relativement au signal théorique non perturbé (représenté en traits interrompus). Ainsi, la durée de l'alternance A1 est augmentée d'un intervalle de temps Tci. La période d'oscillation T1, comprenant l'alternance A1, est donc prolongée relativement à la valeur T0. Ceci engendre une

diminution ponctuelle de la fréquence de l'oscillateur mécanique et un ralentissement momentané du mécanisme associé dont la marche est cadencée par cet oscillateur mécanique.

**[0039]** En référence à la Figure 7, on décrira ci-après le comportement de l'oscillateur mécanique dans un deuxième cas de correction de sa fréquence d'oscillation. Après une première période T0 commence alors une nouvelle période d'oscillation T2, respectivement une alternance A2 au cours de laquelle intervient une impulsion de freinage P2. A l'instant initial $t_{D2}$ débute l'alternance A2, le résonateur mécanique étant alors dans une position extrême (position angulaire négative maximale). Après un quart de période T0/4 correspondant à une demi-alternance, le résonateur atteint sa position neutre à l'instant médian $t_{N2}$. Ensuite intervient l'impulsion de freinage P2 à l'instant $t_{P2}$ qui est situé dans l'alternance A2 après l'instant médian $t_{N2}$ auquel le résonateur passe par sa position neutre. Finalement, après l'impulsion freinage P2, cette alternance A2 se termine à l'instant final $t_{F2}$ auquel le résonateur occupe à nouveau une position extrême (position angulaire positive maximale dans la période T2) et donc également avant l'instant final correspondant $t_{F0}$ de l'oscillation non perturbée. L'impulsion de freinage est déclenchée après un intervalle de temps $T_{A2}$ suivant l'instant initial $t_{D2}$ de l'alternance A2. La durée $T_{A2}$ est supérieure à une demi-alternance T0/4 et inférieure à une alternance T0/2 diminuée de la durée de l'impulsion de freinage P2. Dans l'exemple donné, la durée de cette impulsion de freinage est bien inférieure à une demi-alternance.

**[0040]** Dans le deuxième cas considéré, l'impulsion de freinage est donc générée, dans une alternance, entre l'instant médian auquel le résonateur passe par sa position neutre (position zéro) et l'instant final auquel se termine cette alternance. La vitesse angulaire en valeur absolue diminue au moment de l'impulsion de freinage P2. De manière remarquable, l'impulsion de freinage induit ici un déphasage temporel positif $T_{C2}$ dans l'oscillation du résonateur, comme le montrent à la Figure 4 les deux courbes 90b et 90c de la vitesse angulaire et aussi les courbes 92b et 92c de la position angulaire, soit une avance relativement au signal théorique non perturbé (représenté en traits interrompus). Ainsi, la durée de l'alternance A2 est diminuée de l'intervalle de temps $T_{C2}$. La période d'oscillation T2 comprenant l'alternance A2 est donc plus courte que la valeur T0. Ceci engendre par conséquent une augmentation ponctuelle de la fréquence de l'oscillateur mécanique et une accélération momentanée du mécanisme associé dont la marche est cadencée par cet oscillateur mécanique. Ce phénomène est surprenant et non intuitif, raison pour laquelle l'homme du métier l'a ignoré par le passé. En effet, obtenir une accélération du mécanisme par une impulsion de freinage est a priori étonnant, mais tel est bien le cas lorsque cette marche est cadencée par un oscillateur mécanique et que l'impulsion de freinage est appliquée à son résonateur.

**[0041]** Le phénomène physique susmentionné pour des oscillateurs mécaniques intervient dans le procédé de synchronisation implémenté dans une pièce d'horlogerie selon l'invention. Contrairement à l'enseignement général dans le domaine horloger, il est possible non seulement de diminuer la fréquence d'un oscillateur mécanique par des impulsions de freinage, mais il est aussi possible d'augmenter la fréquence d'un tel oscillateur mécanique également par des impulsions de freinage. L'homme du métier s'attend à pouvoir pratiquement seulement réduire la fréquence d'un oscillateur mécanique par des impulsions de freinage et, comme corolaire, à pouvoir seulement augmenter la fréquence d'un tel oscillateur mécanique par l'application d'impulsions motrices lors d'un apport d'énergie à cet oscillateur. Une telle intuition, qui s'est imposée dans le domaine horloger et vient donc de prime à bord à l'esprit d'un homme du métier, s'avère fausse pour un oscillateur mécanique. Ainsi, comme cela sera exposé par la suite en détail, il est possible de synchroniser, via un oscillateur auxiliaire définissant un oscillateur maître, un oscillateur mécanique par ailleurs très précis, qu'il présente momentanément une fréquence légèrement trop haute ou trop basse. On peut donc corriger une fréquence trop haute ou une fréquence trop basse seulement au moyen d'impulsions de freinage. En résumé, l'application d'un couple de freinage pendant une alternance de l'oscillation d'un balancier-spiral provoque un déphasage négatif ou positif dans l'oscillation de ce balancier-spiral selon que ce couple de freinage est appliqué respectivement avant ou après le passage du balancier-spiral par sa position neutre.

**[0042]** Le procédé de synchronisation résultant du dispositif de correction incorporé dans une pièce d'horlogerie selon l'invention est décrit ci-après. A la Figure 8A est montrée la position angulaire (en degrés) d'un résonateur mécanique horloger oscillant avec une amplitude de 300° au cours d'une période d'oscillation de 250 ms. A la Figure 8B est montrée l'erreur journalière engendrée par des impulsions de freinage d'une milliseconde (1 ms) appliquées dans des périodes d'oscillation successives du résonateur mécanique en fonction de l'instant de leur application à l'intérieur de ces périodes et donc en fonction de la position angulaire du résonateur mécanique. Ici, on part du fait que l'oscillateur mécanique fonctionne librement à une fréquence propre de 4 Hz (cas non perturbé). Trois courbes sont données respectivement pour trois couples de force (100 nNm, 300 nNm et 500 nNm) appliqués par chaque impulsion de freinage. Le résultat confirme le phénomène physique exposé précédemment, à savoir qu'une impulsion de freinage intervenant dans le premier quart de période ou le troisième quart de période engendre un retard provenant d'une diminution de la fréquence de l'oscillateur mécanique, alors qu'une impulsion de freinage intervenant dans le deuxième quart de période ou le quatrième quart de période engendre une avance provenant d'une augmentation de la fréquence de l'oscillateur mécanique. Ensuite, on observe que, pour un couple de force donné, l'erreur jour-

nalière est égale à zéro pour une impulsion de freinage intervenant à la position neutre du résonateur, cette erreur journalière augmentant (en valeur absolue) à mesure qu'on s'approche d'une position extrême de l'oscillation. A cette position extrême où la vitesse du résonateur passe par zéro et où le sens du mouvement change, il y a une brusque inversion du signe de l'erreur journalière. Finalement, à la Figure 8C est donnée la puissance de freinage consommée pour les trois valeurs de couple de force susmentionnées en fonction de l'instant d'application de l'impulsion de freinage au cours d'une période d'oscillation. Comme la vitesse diminue en s'approchant des positions extrêmes du résonateur, la puissance de freinage diminue. Ainsi, alors que l'erreur journalière engendrée augmente en s'approchant des positions extrêmes, la puissance de freinage nécessaire (et donc l'énergie perdue par l'oscillateur) diminue de manière importante.

**[0043]** L'erreur engendrée à la Figure 8B peut correspondre de fait à une correction pour le cas où l'oscillateur mécanique présente une fréquence propre qui ne correspond pas à une fréquence de consigne. Ainsi, si l'oscillateur présente une fréquence propre trop basse, des impulsions de freinage intervenant dans le deuxième ou quatrième quart de la période d'oscillation peuvent permettre une correction du retard pris par l'oscillation libre (non perturbée), cette correction étant plus ou moins forte en fonction de l'instant des impulsions de freinage au sein de la période d'oscillation. Par contre, si l'oscillateur présente une fréquence propre trop haute, des impulsions de freinage intervenant dans le premier ou troisième quart de la période d'oscillation peuvent permettre une correction de l'avance prise par l'oscillation libre, cette correction étant plus ou moins forte en fonction de l'instant des impulsions de freinage dans la période d'oscillation.

**[0044]** L'enseignement donné précédemment permet de comprendre le phénomène remarquable de la synchronisation d'un oscillateur mécanique principal (oscillateur esclave) sur un oscillateur auxiliaire, formant un oscillateur maître, par la seule application périodique d'impulsions de freinage sur le résonateur mécanique esclave à une fréquence de freinage $F_{FR}$ correspondant avantageusement au double de la fréquence de consigne $F0_C$ divisée par un nombre entier positif N, soit $F_{FR} = 2.F0_C / N$. La fréquence de freinage est ainsi proportionnelle à la fréquence de consigne pour l'oscillateur maître et dépend seulement de cette fréquence de consigne dès que le nombre entier positif N est donné. Comme la fréquence de consigne est prévue égale à un nombre fractionnaire multiplié par la fréquence de référence, la fréquence de freinage est donc proportionnelle à la fréquence de référence et déterminée par cette fréquence de référence, laquelle est fournie par l'oscillateur auxiliaire qui est par nature ou par construction plus précis que l'oscillateur mécanique principal.

**[0045]** La synchronisation susmentionnée obtenue par le dispositif de correction incorporé dans la pièce d'horlogerie de l'invention sera maintenant décrite plus en détails à l'aide des Figures 9 à 22.

**[0046]** A la Figure 9 est représentée sur le graphe du haut la position angulaire du résonateur mécanique esclave, notamment du balancier-spiral d'un résonateur horloger, oscillant librement (courbe 100) et oscillant avec freinage (courbe 102). La fréquence de l'oscillation libre est supérieure à la fréquence de consigne $F0_C = 4$ Hz. Les premières impulsions de freinage 104 (ci-après aussi nommées 'impulsions') interviennent ici une fois par période d'oscillation dans une demi-alternance entre le passage par une position extrême et le passage par zéro. Ce choix est arbitraire car le système prévu ne détecte pas la position angulaire du résonateur mécanique ; c'est donc juste une hypothèse possible parmi d'autres qui seront analysées par la suite. On est donc ici dans le cas d'un ralentissement de l'oscillateur mécanique. Le couple de freinage pour la première impulsion de freinage est prévu ici supérieur à un couple de freinage minimum pour compenser l'avance que prend l'oscillateur libre sur une période d'oscillation. Ceci a pour conséquence que la seconde impulsion de freinage a lieu un peu avant la première à l'intérieur du quart de période où interviennent ces impulsions. La courbe 106, qui donne la fréquence instantanée de l'oscillateur mécanique, indique en effet que la fréquence instantanée diminue en-dessous de la fréquence de consigne dès la première impulsion. Ainsi, la seconde impulsion de freinage est plus proche de la position extrême qui précède, de sorte que l'effet du freinage augmente et ainsi de suite avec les impulsions suivantes. Dans une phase transitoire, la fréquence instantanée de l'oscillateur diminue donc progressivement et les impulsions se rapprochent progressivement d'une position extrême de l'oscillation. Après un certain temps, les impulsions de freinage comprennent le passage par la position extrême où la vitesse du résonateur mécanique change de sens et la fréquence instantanée commence alors à augmenter.

**[0047]** Le freinage a ceci de particulier qu'il s'oppose au mouvement du résonateur quel que soit le sens de son mouvement. Ainsi, lorsque le résonateur passe par une inversion du sens de son oscillation au cours d'une impulsion de freinage, le couple de freinage change automatiquement de signe à l'instant de cette inversion. On a alors des impulsions de freinage 104a qui présentent, pour le couple de freinage, une première partie avec un premier signe et une seconde partie avec un deuxième signe opposé au premier signe. Dans cette situation, on a donc la première partie du signal qui intervient avant la position extrême et qui s'oppose à l'effet de la seconde partie qui intervient après cette position extrême. Si la seconde partie diminue la fréquence instantanée de l'oscillateur mécanique, la première partie l'augmente. La correction diminue alors pour se stabiliser finalement et relativement rapidement à une valeur pour laquelle la fréquence instantanée de l'oscillateur est égale à la fréquence de consigne (correspondant ici à la fréquence de freinage). Ainsi, à la phase transitoire succède une

phase stable, aussi nommée phase synchrone, où la fréquence d'oscillation est sensiblement égale à la fréquence de consigne et où les première et deuxième parties des impulsions de freinage présente un rapport sensiblement constant et défini.

**[0048]** Les graphes de la Figure 10 sont analogues à ceux de la Figure 9. La différence majeure est la valeur de la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique libre qui est inférieure à la fréquence de consigne $F0_C$ = 4 Hz. Les premières impulsions 104 interviennent dans la même demi-alternance qu'à la Figure 9. On observe comme attendu une diminution de la fréquence instantanée donnée par la courbe 110. L'oscillation avec freinage 108 prend donc momentanément encore plus de retard dans la phase transitoire, ceci jusqu'à ce que les impulsions 104b commence à englober le passage du résonateur par une position extrême. A partir de ce moment, la fréquence instantanée commence à augmenter jusqu'à atteindre la fréquence de consigne, car la première partie des impulsions intervenant avant la position extrême augmente la fréquence instantanée. Ce phénomène est automatique. En effet, tant que la durée des périodes d'oscillation est supérieure à la durée de la période de consigne $T0_C$, la première partie de l'impulsion augmente alors que la seconde partie diminue et par conséquent la fréquence instantanée continue à augmenter jusqu'à une situation stable où la période de consigne est sensiblement égale à la période d'oscillation. On a donc la synchronisation voulue.

**[0049]** Les graphes de la Figure 11 sont analogues à ceux de la Figure 10. La différence majeure vient du fait que les premières impulsions de freinage 114 interviennent dans une autre demi-alternance qu'à la Figure 10, à savoir dans une demi-alternance entre le passage par zéro et le passage par une position extrême. Selon ce qui a été exposé précédemment, on observe ici dans une phase transitoire une augmentation de la fréquence instantanée donnée par la courbe 112. Le couple de freinage pour la première impulsion de freinage est prévu ici supérieur à un couple de freinage minimum pour compenser le retard que prend l'oscillateur mécanique libre sur une période d'oscillation. Ceci a pour conséquence que la seconde impulsion de freinage a lieu un peu après la première à l'intérieur du quart de période où interviennent ces impulsions. La courbe 112 indique en effet que la fréquence instantanée de l'oscillateur augmente audessus de la fréquence de consigne dès la première impulsion. Ainsi, la seconde impulsion de freinage est plus proche de la position extrême qui suit, de sorte que l'effet du freinage augmente et ainsi de suite avec les impulsions suivantes. Dans la phase transitoire, la fréquence instantanée de l'oscillation avec freinage 114 augmente donc et les impulsions de freinage se rapprochent progressivement d'une position extrême de l'oscillation. Après un certain temps, les impulsions de freinage comprennent le passage par la position extrême où la vitesse du résonateur mécanique change de sens. Dès ce moment-là, on a un phénomène similaire à celui exposé ci-avant. Les impulsions de freinage 114a présentent alors deux parties et la seconde partie diminue la fréquence instantanée. Cette diminution de la fréquence instantanée continue jusqu'à ce qu'elle ait une valeur égale à la valeur de consigne pour de mêmes raisons que données en référence aux Figures 9 et 10. La diminution de fréquence s'arrête automatiquement lorsque la fréquence instantanée est sensiblement égale à la fréquence de consigne. On obtient alors une stabilisation de la fréquence de l'oscillateur mécanique à la fréquence de consigne dans une phase synchrone.

**[0050]** A l'aide des Figures 12 à 15, on exposera le comportement de l'oscillateur mécanique dans la phase de transition pour n'importe quel instant où intervient une première impulsion de freinage au cours d'une période d'oscillation, ainsi que la situation finale correspondant à la phase synchrone où la fréquence d'oscillation est stabilisée sur la fréquence de consigne. La Figure 12 représente une période d'oscillation avec la courbe S1 des positions d'un résonateur mécanique. Dans le cas considéré ici, la fréquence d'oscillation naturelle F0 de l'oscillateur mécanique libre (sans impulsions de freinage) est supérieure à la fréquence de consigne $F0_C$ ($F0 > F0_C$). La période d'oscillation comprend classiquement une première alternance A1 suivie d'une deuxième alternance A2, chacune entre deux positions extrêmes ($t_{m-1}$, $A_{m-1}$ ; $t_m$, $A_m$ ; $t_{m+1}$, $A_{m+1}$) correspondant à l'amplitude d'oscillation. Ensuite, on a représenté, dans la première alternance, une impulsion de freinage 'Imp1' dont la position temporelle milieu intervient à un instant ti et, dans la seconde alternance, une autre impulsion de freinage 'Imp2' dont la position temporelle milieu intervient à un instant $t_2$. Les impulsions Imp1 et Imp2 présentent un déphasage de T0/2, et elles sont particulières car elles correspondent, pour un profil donné du couple de freinage, à des corrections engendrant deux équilibres instables du système. Comme ces impulsions interviennent respectivement dans le premier et le troisième quart de la période d'oscillation, elles freinent donc l'oscillateur mécanique dans une mesure qui permet exactement de corriger la fréquence naturelle trop élevée de l'oscillateur mécanique libre (avec la fréquence de freinage sélectionnée pour l'application des impulsions de freinage). On notera que les impulsions Imp1 et Imp2 sont toutes deux des premières impulsions, chacune étant considérée pour elle-même en l'absence de l'autre. On remarquera que les effets des impulsions Imp1 et Imp2 sont identiques.

**[0051]** Si une première impulsion intervient au temps $t_1$ ou $t_2$, on aura donc théoriquement une répétition de cette situation lors des prochaines périodes d'oscillation et une fréquence d'oscillation égale à la fréquence de consigne. Deux choses sont à relever pour un tel cas. Premièrement, la probabilité qu'une première impulsion intervienne exactement au temps $t_1$ ou $t_2$ est relativement faible bien que possible. Deuxièmement, au cas où une telle situation particulière se présente, elle ne pourra durer longtemps. En effet, la fréquence instantanée d'un

balancier-spiral dans une pièce d'horlogerie varie un peu au cours du temps pour diverses raisons (amplitude d'oscillation, température, changement d'orientation spatiale, etc.). Bien que ces raisons constituent des perturbations qu'on cherche généralement à minimiser en haute horlogerie, il n'en demeure pas moins qu'en pratique un tel équilibre instable ne va pas durer bien longtemps. On notera que plus le couple de freinage est élevé, plus les temps $t_1$ et $t_2$ se rapprochent des deux temps de passage du résonateur mécanique par sa position neutre qui les suivent respectivement. On notera encore que plus la différence entre la fréquence d'oscillation naturelle F0 et la fréquence de consigne $F0_C$ est petite, plus les temps $t_1$ et $t_2$ se rapprochent également des deux temps de passage du résonateur mécanique par sa position neutre qui les suivent respectivement.

**[0052]** Considérons maintenant ce qui se passe dès qu'on s'écarte un peu des positions temporelles $t_1$ ou $t_2$ lors de l'application des impulsions. Selon l'enseignement donné en référence à la Figure 8B, si une impulsion intervient à gauche (position temporelle antérieure) de l'impulsion Imp1 dans la zone Z1a, la correction augmente de sorte qu'au cours des périodes suivantes, la position extrême précédente $A_{m-1}$ va progressivement se rapprocher de l'impulsion de freinage. Par contre, si une impulsion intervient à droite (position temporelle postérieure) de l'impulsion Imp1, à gauche de la position zéro, la correction diminue de sorte qu'au cours des périodes suivantes les impulsions dérivent vers cette position zéro où la correction devient nulle. Ensuite, l'effet de l'impulsion change et une augmentation de la fréquence instantanée intervient. Comme la fréquence naturelle est déjà trop élevée, l'impulsion va rapidement dériver vers la position extrême $A_m$. Ainsi, si une impulsion a lieu à droite de l'impulsion Imp1 dans la zone Z1b, les impulsions suivantes vont progressivement se rapprocher de la position extrême suivante $A_m$. On observe un même comportement dans la seconde alternance A2. Si une impulsion a lieu à gauche de l'impulsion Imp2 dans la zone Z2a, les impulsions suivantes vont progressivement se rapprocher de la position extrême précédente $A_m$. Par contre, si une impulsion a lieu à droite de l'impulsion Imp2 dans la zone Z2b, les impulsions suivantes vont progressivement se rapprocher de la position extrême suivante $A_{m+1}$. On remarquera que cette formulation est relative car en réalité la fréquence d'application des impulsions de freinage est imposée par l'oscillateur maître (fréquence de freinage donnée), de sorte que ce sont les périodes d'oscillation qui varient et de fait c'est la position extrême en question qui se rapproche de l'instant d'application d'une impulsion de freinage. En conclusion, si une impulsion intervient dans la première alternance A1 à un autre instant que $t_1$, la fréquence d'oscillation instantanée évolue dans une phase transitoire au cours des périodes d'oscillation suivantes de manière qu'une des deux positions extrêmes de cette première alternance (positions d'inversion du sens du mouvement du résonateur mécanique) s'approche progressivement des impulsions de freinage. Il en va de même pour la seconde alternance A2.

**[0053]** La Figure 13 montre la phase synchrone correspondant à une situation stable finale intervenant après la phase transitoire décrite ci-avant. Comme déjà exposé, dès que le passage par une position extrême intervient durant une impulsion de freinage, cette position extrême va se caler sur les impulsions de freinage pour autant que ces impulsions de freinage soient configurées (le couple de force et la durée) pour pouvoir corriger suffisamment la dérive temporelle de l'oscillateur mécanique libre au moins par une impulsion de freinage intervenant entièrement, selon le cas, juste avant ou juste après une position extrême. Ainsi, dans la phase synchrone, si une première impulsion intervient dans la première alternance A1, soit la position extrême $A_{m-1}$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp1a, soit la position extrême $A_m$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp1b. Dans le cas d'un couple sensiblement constant, les impulsions Imp1a et Imp1b présentent chacune une première partie dont la durée est plus courte que celle de leur seconde partie, de manière à corriger exactement la différence entre la fréquence naturelle trop élevée de l'oscillateur principal esclave et la fréquence de consigne imposée par l'oscillateur auxiliaire maître. De même, dans la phase synchrone, si une première impulsion intervient dans la seconde alternance A2, soit la position extrême $A_m$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp2a, soit la position extrême $A_{m+1}$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp2b.

**[0054]** On remarquera que les impulsions Imp1a, respectivement Imp1b, Imp2a et Imp2b occupent des positions temporelles relatives stables. En effet, une légère déviation à gauche ou à droite d'une de ces impulsions, dû à une perturbation externe, aura pour effet de ramener une impulsion suivante vers la position temporelle relative initiale. Ensuite, si la dérive temporelle de l'oscillateur mécanique varie durant la phase synchrone, l'oscillation va automatiquement subir un léger déphasage de sorte que le rapport entre la première partie et la seconde partie des impulsions Imp1a, respectivement Imp1b, Imp2a et Imp2b varie dans une mesure qui adapte la correction engendrée par les impulsions de freinage à la nouvelle différence de fréquence. Un tel comportement de la pièce d'horlogerie selon la présente invention est vraiment remarquable.

**[0055]** Les Figures 14 et 15 sont similaires aux Figures 12 et 13, mais pour une situation où la fréquence naturelle de l'oscillateur est inférieure à la fréquence de consigne. Par conséquent, les impulsions Imp3 et Imp4, correspondant à une situation d'équilibre instable dans la correction apportée par les impulsions de freinage, sont respectivement situées dans le deuxième et le quatrième quart de période (instants $t_3$ et $t_4$) où les impulsions engendrent une augmentation de la fréquence d'oscillation. On ne redonnera pas ici les explications en détails car le comportement du système découle des considérations précédentes. Dans la phase transitoire (Figure 14), si

une impulsion a lieu dans l'alternance A3 à gauche de l'impulsion Imp3 dans la zone Z3a, la position extrême précédente ($t_{m-1}$ , $A_{m-1}$) va progressivement se rapprocher des impulsions suivantes. Par contre, si une impulsion a lieu à droite de l'impulsion Imp3 dans la zone Z3b, la position extrême suivante ($t_m$, $A_m$) va progressivement se rapprocher des impulsions suivantes. De même, si une impulsion a lieu dans l'alternance A4 à gauche de l'impulsion Imp4 dans la zone Z4a, la position extrême précédente ($t_m$, $A_m$) va progressivement se rapprocher des impulsions suivantes. Finalement, si une impulsion a lieu à droite de l'impulsion Imp4 dans la zone Z4b, la position extrême suivante ($t_{m+1}$, $A_{m+1}$) va progressivement se rapprocher des impulsions suivantes durant la phase de transition.

**[0056]** Dans la phase synchrone (Figure 15), si une première impulsion intervient dans la première alternance A3, soit la position extrême $A_{m-1}$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp3a, soit la position extrême $A_m$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp3b. Dans le cas d'un couple sensiblement constant, les impulsions Imp3a et Imp3b présentent chacune une première partie dont la durée est plus longue que celle de leur seconde partie, de manière à corriger exactement la différence entre la fréquence naturelle trop faible de l'oscillateur principal esclave et la fréquence de consigne imposée par l'oscillateur auxiliaire maître. De même, dans la phase synchrone, si une première impulsion intervient dans la seconde alternance A4, soit la position extrême $A_m$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp4a, soit la position extrême $A_{m+1}$ de l'oscillation est calée sur les impulsions Imp4b. Les autres considérations faîtes dans le cadre du cas décrit précédemment en référence aux Figures 12 et 13 s'appliquent par analogie au cas des Figures 14 et 15. En conclusion, que la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique libre soit trop élevée ou trop basse et quel que soit l'instant de l'application d'une première impulsion de freinage à l'intérieur d'une période d'oscillation, le dispositif de correction de l'invention est efficace et synchronise rapidement la fréquence de l'oscillateur mécanique, cadençant la marche du mouvement mécanique, sur la fréquence de consigne qui est déterminée par la fréquence de référence de l'oscillateur auxiliaire maître, lequel pilote la fréquence de freinage à laquelle les impulsions de freinage sont appliquées au résonateur de l'oscillateur mécanique. Ceci reste vrai si la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique varie et même si elle est, dans certaines périodes de temps, supérieure à la fréquence de consigne, alors que dans d'autres périodes de temps elle est inférieure à cette fréquence de consigne.

**[0057]** L'enseignement donné ci-avant et la synchronisation obtenue grâce aux caractéristiques de la pièce d'horlogerie selon l'invention s'appliquent également au cas où la fréquence de freinage pour l'application des impulsions de freinage n'est pas égale à la fréquence de consigne. Dans le cas de l'application d'une impulsion par période d'oscillation, les impulsions ayant lieu aux positions instables ($t_1$, Imp1 ; $t_2$, Imp2 ; $t_3$, Imp3 ; $t_4$, Imp4) correspondent à des corrections pour compenser la dérive temporelle au cours d'une seule période d'oscillation. Par contre, si les impulsions de freinage prévues ont un effet suffisant pour corriger une dérive temporelle au cours de plusieurs périodes d'oscillation, il est alors possible d'appliquer une seule impulsion par intervalle de temps égal à ces plusieurs périodes d'oscillation. On observera alors le même comportement que pour le cas où une impulsion est engendrée par période d'oscillation. En considérant les périodes d'oscillation où interviennent les impulsions, on a les mêmes phases transitoires et les mêmes phases synchrones que dans le cas exposé précédemment. De plus, ces considérations sont aussi correctes s'il y a un nombre entier d'alternances entre chaque impulsion de freinage. Dans le cas d'un nombre impair d'alternances, on passe alternativement, selon le cas, de l'alternance A1 ou A3 à l'alternance A2 ou A4 sur les Figures 12 à 15. Comme l'effet de deux impulsions décalées d'une alternance est identique, on comprend que la synchronisation est réalisée comme pour un nombre pair d'alternances entre deux impulsions de freinage successives. En conclusion, comme déjà indiqué, le comportement du système décrit en référence aux Figures 12 à 15 est observé dès que la fréquence de freinage $F_{FR}$ est égale à $2F0_C/N$, $F0_C$ étant la fréquence de consigne pour la fréquence d'oscillation et N un nombre entier positif.

**[0058]** Bien que peu intéressant, on remarquera que la synchronisation est aussi obtenue pour une fréquence de freinage $F_{FR}$ supérieure au double de la fréquence de consigne (2F0), à savoir pour une valeur égale à N fois F0 avec N > 2. Dans une variante avec $F_{FR} = 4F0$, on ajuste une perte d'énergie dans le système sans effet dans la phase synchrone, car une impulsion sur deux intervient au point neutre du résonateur mécanique. Pour une fréquence de freinage $F_{FR}$ plus élevée, les impulsions dans la phase synchrone qui n'interviennent pas aux positions extrêmes annulent leurs effets deux à deux. On comprend donc qu'il s'agit de cas théoriques sans grand sens pratique.

**[0059]** Les Figures 16 et 17 montrent la phase synchrone pour une variante avec une fréquence de freinage $F_{FR}$ égale au quart de la fréquence de consigne, une impulsion de freinage intervenant donc toutes les quatre périodes d'oscillation. Les Figures 18 et 19 sont des agrandissements partiels respectivement des Figures 16 et 17. La Figure 16 concerne un cas où la fréquence naturelle de l'oscillateur principal est supérieure à la fréquence de consigne $F0_C$ = 4 Hz, alors que la Figure 17 concerne un cas où la fréquence naturelle de l'oscillateur principal est supérieure à cette fréquence de consigne. On observe que seules les périodes d'oscillation T1* et T2*, dans lesquelles interviennent des impulsions de freinage Imp1b ou Imp2a, respectivement Imp3b ou Imp4a, présentent une variation relativement à la période naturelle T0*. Les impulsions de freinage engendrent un déphasage seulement dans les périodes correspondantes.

Ainsi, les périodes instantanées oscillent ici autour d'une valeur moyenne qui est égale à celle de la période de consigne. On notera que, aux Figures 16 à 19, les périodes instantanées sont mesurées d'un passage par zéro sur un flanc montant du signal d'oscillation à un tel passage suivant. Ainsi, les impulsions synchrones qui interviennent aux positions extrêmes sont entièrement englobées dans des périodes d'oscillation. Pour être complet, la Figure 20 montre le cas spécifique où la fréquence naturelle est égale à la fréquence de consigne. Dans ce cas, les périodes d'oscillation T0* demeurent toutes égales, les impulsions de freinage Imp5 intervenant exactement à des positions extrêmes de l'oscillation libre avec des première et seconde parties de ces impulsions qui ont des durées identiques (cas d'un couple de freinage constant), de sorte que l'effet de la première partie est annulé par l'effet opposé de la deuxième partie.

**[0060]** Dans une variante perfectionnée, le dispositif de synchronisation est agencé de manière que la fréquence de freinage peut prendre plusieurs valeurs, de préférence une première valeur dans une phase initiale du fonctionnement du dispositif de synchronisation et une deuxième valeur, inférieure à la première valeur, dans une phase de fonctionnement normal succédant à la phase initiale. En particulier, on sélectionnera la durée de la phase initiale de manière que la phase de fonctionnement normal intervienne alors que la phase synchrone a vraisemblablement déjà commencée. Plus généralement, la phase initiale englobe au moins les premières impulsions de freinage, suite à l'enclenchement du dispositif de synchronisation, et de préférence la majeure partie de la phase transitoire. En augmentant la fréquence des d'impulsions de freinage, on diminue la durée de la phase transitoire. De plus, cette variante permet, d'une part, d'optimiser l'efficacité du freinage durant la phase initiale pour assurer le processus physique conduisant à la synchronisation et, d'autre part, de minimiser l'énergie de freinage et donc les pertes d'énergie pour l'oscillateur principal durant la phase synchrone qui perdure tant que le dispositif de synchronisation n'est pas désactivé et que le mouvement mécanique fonctionne. Les premières impulsions de freinage peuvent intervenir à proximité de la position neutre du résonateur où l'effet du freinage est moindre sur le déphasage temporel engendré pour l'oscillation de l'oscillateur principal. Par contre, une fois la synchronisation établie, les impulsions de freinage ont lieu à proximité des positions extrêmes de cette oscillation où l'effet du freinage est le plus important.

**[0061]** En référence aux Figures 21 et 22, on décrira une première variante d'un deuxième mode de réalisation de l'invention qui est surprenant par la simplicité de son dispositif de freinage électromagnétique. Ce deuxième mode de réalisation se distingue du premier mode essentiellement par le système magnétique du dispositif de freinage électromagnétique qui est constitué, dans la première variante, d'un seul aimant bipolaire 60 porté par le balancier 8A du résonateur mécanique 6A et, dans une deuxième variante, par une seule paire d'aimants bipolaires. Dans la première variante, lorsque le résonateur 6A est dans sa position neutre (situation représentée à la Figure 21), un demi-axe de référence 62 partant de l'axe d'oscillation 34 et passant par le centre de l'aimant 60 définit une position angulaire zéro ('0') dans un système de coordonnées polaires centré sur l'axe d'oscillation et fixe relativement à la platine du mouvement horloger. La bobine 28, qui complète le dispositif de freinage électromagnétique en sus du système magnétique, est solidaire de la platine et présente un décalage angulaire relativement à la position angulaire zéro. De préférence, le décalage angulaire de la bobine vaut sensiblement 180°, comme représenté à la Figure 21.

**[0062]** A la Figure 22 sont représentées la courbe 70 de la position angulaire du balancier 8A en fonction du temps, dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique considéré qui présente dans cette plage une amplitude supérieure à 180° et de préférence supérieure à 200° (cas représenté), et la courbe 72 de la tension induite dans une phase synchrone du fonctionnement du dispositif de synchronisation. Ainsi, dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique 6A on observe deux impulsions de tension induite $74_A$ et $74_B$ ayant sensiblement la forme d'une période d'un sinus. On remarque que les impulsions $74_A$ et $74_B$ sont séparées deux à deux par des zones temporelles sans tension induite dans la bobine 28. Dans une variante assurant une grande stabilité à la marche de la pièce d'horlogerie, les intervalles de temps distincts $T_P$, définis par les impulsions de court-circuit 58A générés à la fréquence de consigne F0c et intervenant ainsi dans chaque période d'oscillation, sont sensiblement égaux ou supérieurs (cas représenté) aux zones temporelles sans tension induite dans la bobine autour des deux positions extrêmes du résonateur mécanique dans la plage de fonctionnement utile. Cependant, comme on le verra par la suite, cette condition n'est pas nécessaire, les intervalles de temps $T_P$ pouvant être inférieurs à la durée de ces zones temporelles sans tension induite.

**[0063]** On observe que, pour autant que la dérive temporelle naturelle de la pièce d'horlogerie reste dans une plage nominale pour laquelle le dispositif de synchronisation a été dimensionné et généralement après une phase transitoire qui suit l'activation du dispositif de synchronisation, cette pièce d'horlogerie entre dans une phase stable et synchrone et où l'oscillateur mécanique présente la fréquence de consigne F0c à laquelle sont générées ici les impulsions de court-circuit 58A, et ceci quelle que soit la position angulaire du balancier 8A lors d'une première impulsion de court-circuit. La Figure 22 correspond à une situation où la fréquence d'oscillation naturelle F0 de l'oscillateur mécanique est un peu inférieure à la fréquence de consigne F0c. Il résulte de cette situation que, dans chaque période d'oscillation T0c, une première impulsion de freinage distincte, qui est engendrée dans la zone initiale de chaque impulsion de court-circuit par une impulsion de tension induite $74_A$ et qui intervient dans la seconde demi-alternance $A2_2$ de la se-

conde alternance A2 (au début des intervalles de temps distincts $T_P$), est plus forte qu'une deuxième impulsion de freinage distincte qui est engendrée dans la zone finale de chaque impulsion de court-circuit par une impulsion de tension induite $74_B$ et qui intervient dans la première demi-alternance $A1_1$ de la première alternance A1 (à la fin des intervalles de temps distincts $T_P$). Deux impulsions de freinage sont distinctes lorsqu'elles sont séparées par un intervalle de temps présentant une durée non nulle.

**[0064]** Ainsi, dans la phase synchrone, lors de chaque intervalle de temps $T_P$ où intervient un court-circuit de la bobine, le déphasage positif généré par l'impulsion de tension $74_B$ dans chaque demi-alternance $A2_2$ est supérieur au déphasage négatif généré par l'impulsion de tension $74_A$ dans chaque demi-alternance $A1_1$, de sorte qu'une correction de la marche de la pièce d'horlogerie intervient ici dans chaque période d'oscillation pour assurer la synchronisation de l'oscillateur mécanique sur la base de temps de référence. Comme indiqué précédemment, la génération des impulsions de court-circuit à la fréquence de consigne est un cas particulier. Dans une autre variante, des impulsions de court-circuit sont engendrées avec une fréquence inférieure correspondant à une fraction de la fréquence de consigne. Plus généralement, il est prévu que la distance temporelle $D_T$, séparant un même instant caractéristique de deux impulsions de court-circuit successives quelconques, satisfait la relation mathématique $D_T = M \cdot T0c/2$, M étant un nombre entier positif quelconque. Ainsi, dans le cas d'une génération périodique des impulsions de freinage, la fréquence de déclenchement $F_D$ de ces impulsions de freinage est sélectionnée pour satisfaire la relation mathématique $F_D = 2.F0c / M$ (à noter que les deux impulsions de freinage distinctes, engendrées dans chaque intervalle de temps $T_P$ respectivement lors de l'apparition des deux impulsions de tension induite $74_A$ et $74_B$, sont considérées ensemble comme une même impulsion de freinage pour la question des distances temporelles et de la fréquence de déclenchement). L'homme du métier saura sélectionner une fréquence suffisamment élevée, et donc une valeur de M pas trop élevée, pour assurer la synchronisation voulue.

**[0065]** Dans une deuxième variante du deuxième mode de réalisation, le dispositif de freinage électromagnétique comprend un système magnétique formé par une paire d'aimants permanents à aimantation axiale et de polarités opposées, ces deux aimants étant agencés symétriquement par rapport à un demi-axe de référence du balancier et suffisamment proches l'un de l'autre pour additionner deux lobes de tension induite qu'ils génèrent respectivement lorsque cette paire d'aimants passent en regard de la bobine. Le demi-axe de référence définit une position angulaire zéro lorsque le résonateur mécanique est dans sa position neutre. La bobine présente un décalage angulaire relativement à la position angulaire zéro de manière qu'une tension induite dans cette bobine intervienne, lorsque l'oscillateur mécanique oscille dans la plage de fonctionnement utile, au moins dans une alternance de chaque période d'oscillation substantiellement avant ou après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans cette alternance. Le décalage angulaire de la bobine est aussi de préférence égale à 180°. Les positions angulaires extrêmes du résonateur mécanique dans la plage de fonctionnement utile sont, en valeurs absolues, supérieures au décalage angulaire qui est défini comme la distance angulaire minimale entre la position angulaire zéro et la position angulaire du centre de la bobine. Cette deuxième variante correspond au dispositif électromagnétique représenté à la Figure 23, mais sans la deuxième paire d'aimants 66, 67 qui concerne le troisième mode de réalisation qui va être décrit ci-après.

**[0066]** Dans un troisième mode de réalisation, représenté aux Figures 23 à 25, le système magnétique du dispositif de freinage électromagnétique est constitué d'une première paire d'aimants bipolaires 64, 65 et d'une deuxième paire d'aimants bipolaires 66, 67 toutes deux portées par le balancier 8B du résonateur mécanique 6B, ainsi que d'une bobine 28. Chaque paire d'aimants présente une aimantation axiale de polarités opposées. Les deux aimants de la première paire sont agencés symétriquement relativement à un demi-axe de référence 62A du balancier 8B, ce demi-axe de référence définissant une position angulaire zéro lorsque le résonateur mécanique est dans sa position neutre. A la Figure 23, on notera que le balancier est dans une position angulaire $\theta$ égale à 90° ($\theta = 90°$). La bobine 28, comme dans le deuxième mode de réalisation, présente un décalage angulaire relativement à la position angulaire zéro, ce décalage étant de préférence sensiblement égal à 180 ; mais d'autres décalages angulaires peuvent être prévus dans d'autres variantes. La courbe de tension induite 76 générée dans la bobine lorsque le résonateur mécanique oscille est représentée à la Figure 24, en superposition de la courbe 70 donnant la position angulaire du balancier 8B.

**[0067]** Le positionnement de la bobine 28 à un angle de 180° (variante représentée à la Figure 23) est une variante préférée, car le système électromagnétique que la bobine forme avec la première paire d'aimants 64, 65 engendre dans chaque alternance deux impulsions de tension induite $78_A$ et $78_B$ présentant une symétrie relativement à l'instant du passage du résonateur 6B par sa position neutre. On a donc une impulsion $78_A$ dans chaque première demi-alternance $A1_1$, $A2_1$ et une impulsion $78_B$ dans chaque seconde demi-alternance $A1_2$, $A2_2$. Ainsi, les impulsions de tension induite $78_A$ et $78_B$ ont sensiblement une même amplitude et sont chacune situées à une même distance temporelle d'un passage du résonateur mécanique 6B par une position angulaire extrême, de sorte qu'elles sont toutes susceptibles d'engendrer, lors d'un court-circuit de la bobine, un couple de freinage de même intensité et un déphasage, positif ou négatif selon le cas, de même valeur dans l'oscillation du résonateur mécanique. Ensuite, comme ceci a été

exposé précédemment, on notera qu'un décalage angulaire de 180° présente en plus l'avantage d'une grande efficacité pour les impulsions de freinage engendrées. De plus, on notera que l'amplitude du balancier dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique est classiquement prévue supérieure à 180°, ce qui permet donc la génération des impulsions de tension induite et ainsi de pouvoir engendrer des impulsions de freinage, par une diminution de l'impédance entre les deux bornes de la bobine 28 pour corriger la marche de la pièce d'horlogerie.

**[0068]** Dans une première variante représentée à la Figure 24, la valeur des intervalles de temps distincts $T_P$ est sensiblement égale ou supérieure à la durée d'une zone temporelle sans tension induite dans la bobine 28 autour de chaque position angulaire extrême du résonateur mécanique dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique. Toutefois, cette valeur des intervalles de temps distincts $T_P$ est prévue inférieure à la demi-période de consigne, soit $T_P < T0c/2$. Dans la phase synchrone du procédé de synchronisation selon cette première variante, les impulsions de court-circuit 58B sont callées entre deux impulsions de tension induite $78_A$, $78_B$ entourant une position angulaire extrême et deux impulsions de freinage distinctes interviennent respectivement au début et à la fin de chaque intervalle de temps $T_P$, ces deux impulsions de freinage distinctes correspondant à deux quantités d'énergie prélevées au résonateur mécanique qui sont variables (la variation de l'une étant opposée à la variation de l'autre, de sorte que si une des deux quantités d'énergie augmente ou diminue l'autre respectivement diminue ou augmente), en fonction d'une dérive temporelle positive ou négative de l'oscillateur mécanique en question. On notera que la Figure 24 correspond au cas particulier où la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique est égale à la fréquence de consigne, de sorte que les deux quantités d'énergie susmentionnées sont ici identiques.

**[0069]** A la figure 25, similaire à la Figure 24, est représentée une deuxième variante dans laquelle la valeur des intervalles de temps distincts $T_P$ est inférieure à la durée d'une zone temporelle sans tension induite dans la bobine 28 autour de chaque position angulaire extrême du résonateur mécanique. La synchronisation voulue est également obtenue. En effet, dans la phase synchrone, les impulsions de court-circuit 58C demeurent aussi dans une fenêtre temporelle qui est cadrée par deux impulsions de tension induite $78_A$, $78_B$ entourant une position angulaire extrême. La position temporelle des intervalles de temps distincts $T_P$ peut varier à l'intérieur de cette fenêtre temporelle durant au moins une partie terminale de la phase transitoire (impulsion $58C_1$) ou dans la phase synchrone si la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique est très proche de la fréquence de la consigne, notamment si elle varie très légèrement autour de cette valeur. Généralement, on observe dans la phase synchrone, selon que la dérive temporelle de l'oscillateur mécanique est négative ou positive, des impulsions de court-circuit $58C_2$ ou $58C_3$ qui interviennent respectivement dans les demi-alternances $A1_2$ et $A2_1$ de périodes d'oscillation de manière partiellement simultanée respectivement avec les impulsions de tension induites $78_B$ et $78_A$, de sorte qu'elles engendrent dans les demi-alternances respectives des impulsions de freinage. Seul le système électromagnétique susmentionné, formé de la bobine et de la première paire d'aimants, intervient pour assurer la synchronisation voulue dans la phase synchrone du procédé de synchronisation, la seconde paire d'aimants étant alors sans influence pour ce procédé de synchronisation.

**[0070]** La seconde paire d'aimants bipolaires 66, 67, laquelle est couplée momentanément à la bobine 28 dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique, sert essentiellement à l'alimentation électrique du dispositif de synchronisation, bien qu'elle puisse intervenir dans une phase transitoire (phase initiale après activation du dispositif de synchronisation) du procédé de synchronisation. La pièce d'horlogerie comprend un circuit d'alimentation, formé par un circuit redresseur d'une tension induite dans la bobine et une capacité de stockage, et la deuxième paire d'aimants bipolaires présente un demi-axe milieu 68 entre ses deux aimants qui est décalé du décalage angulaire que présente la bobine 28 relativement au demi-axe de référence 62A, de sorte que cet axe milieu est aligné sur le centre de la bobine lorsque le résonateur mécanique est dans sa position de repos. Le circuit d'alimentation est relié, d'une part, à une borne de la bobine et, d'autre part, à un potentiel de référence du dispositif de synchronisation au moins périodiquement lors de passage du résonateur mécanique par sa position neutre, mais de préférence constamment. La deuxième paire d'aimants génère des impulsions de tension induite $80_A$ et $80_B$ lors des passages du balancier 8B par la position angulaire zéro, ces impulsions présentant une plus grande amplitude que les impulsions générées par la première paire d'aimants et servant à l'alimentation de la capacité de stockage dont la tension est représentée par la courbe 82 à la Figure 24.

**[0071]** En référence aux Figures 26, 27 et 28A-28C, on décrira ci-après un quatrième mode de réalisation de l'invention. Ce quatrième mode de réalisation se distingue des autres modes de réalisation essentiellement par l'agencement du système magnétique. L'arbre 82 du balancier 8C est pivoté entre la platine 5 et un pont de balancier 7 autour de l'axe d'oscillation 34. Un aimant bipolaire 84 à aimantation radiale est agencé sur l'arbre 82 et placé dans une ouverture 87 d'une plaque 86 en matériau à haute perméabilité magnétique, notamment en matériau ferromagnétique. La plaque 86 définit un circuit magnétique avec un noyau 89 autour duquel est agencée une bobine 28C, à la manière d'un moteur horloger classique. La plaque 86 présente deux isthmes 88 au niveau de l'ouverture 87 qui empêchent partiellement au flux magnétique de l'aimant de se refermer sur lui-même sans passer par le noyau de bobine. Toutefois, de préférence, ces isthmes sont prévus moins fins que

dans le cas d'un moteur horloger pour limiter la variation d'énergie potentielle magnétique de l'aimant permanent 84 en fonction de son angle de rotation.

**[0072]** Les Figures 28A à 28C sont similaires aux Figures 5A à 5C, mais pour le quatrième mode de réalisation. La courbe de tension induite aux Figures 28A et 28B correspond à un cas particulier où l'amplitude d'oscillation est sensiblement égale à 180°. Pour une amplitude supérieure, la courbe de tension induite dans la bobine 28C correspond à la courbe représentée à la Figure 28C. Cette dernière figure concerne un cas particulier où la fréquence d'oscillation naturelle F0 de l'oscillateur mécanique est égale à la fréquence de consigne. Comme le freinage généré par les impulsions de freinage 50C est faible, l'amplitude d'oscillation du résonateur 6C est un peu supérieure à celle intervenant aux Figures 28A et 28B où les impulsions de freinage 56, respectivement 57 engendrent un freinage plus conséquent. Les impulsions 50C n'engendrent pas de déphasage temporel dans l'oscillation du résonateur mécanique, étant donné qu'elles présentent une symétrie centrale relativement à l'instant du passage du résonateur 6C par une position angulaire extrême sur le graphe du couple de freinage. On notera que les deux parties $T_B$ et $T_A$ des intervalles de temps distincts $T_P$, intervenant respectivement des deux côtés de l'instant du passage du résonateur 6C par une position angulaire extrême, sont ici égales puisque la fréquence naturelle est égale à la fréquence de consigne. Ainsi les demi-alternances adjacentes $A2_2$ et $A1_1$ ont une même durée.

**[0073]** Pour mémoire, les intervalles de temps $T_P$ sont définis par les impulsions de court-circuit 58 qui présentent entre leurs débuts respectifs une distance temporelle $D_T$ déterminée par la base de temps de référence. Dans le présent exemple, les impulsions de court-circuit 58 sont générées avec une fréquence de déclenchement $F_D$ égale à la fréquence de consigne, de sorte que les distances temporelles $D_T$ sont ici égales à une période de consigne T0c.

**[0074]** Dans le cas d'une fréquence naturelle F0 trop élevée, la première partie $T_B$ des intervalles de temps distants $T_P$ est inférieure à la seconde partie $T_A$ et les impulsions de freinage 56 engendrées lors de ces intervalles de temps distants, par les impulsions de court-circuit correspondantes, interviennent substantiellement dans des premières demi-alternances $A1_1$ (quasi entièrement dans l'exemple spécifique représenté), de sorte qu'elles diminuent la fréquence de l'oscillateur mécanique pour le synchroniser sur l'oscillateur auxiliaire de la base de temps de référence et ainsi imposer à cet oscillateur mécanique la fréquence de consigne F0c. Dans le cas d'une fréquence naturelle F0 trop faible, la première partie $T_B$ des intervalles de temps distants $T_P$ est supérieure à la seconde partie $T_A$ et les impulsions de freinage 57 engendrées lors de ces intervalles de temps distants, par les impulsions de court-circuit correspondantes, interviennent substantiellement dans des secondes demi-alternances $A2_2$ (aussi quasi entièrement dans l'exemple spécifique représenté), de sorte qu'elles augmentent la fréquence de l'oscillateur mécanique pour le synchroniser sur l'oscillateur auxiliaire.

## Revendications

**1.** Pièce d'horlogerie (2) comprenant un mouvement mécanique (4) qui comprend :

- un mécanisme (12) indicateur d'au moins une donnée temporelle,
- un résonateur mécanique (6,6A,6B,6C) susceptible d'osciller le long d'un axe général d'oscillation autour d'une position neutre correspondant à son état d'énergie potentielle minimale,
- un dispositif d'entretien (18) du résonateur mécanique formant avec ce résonateur mécanique un oscillateur mécanique qui est agencé pour cadencer la marche du mécanisme indicateur,
- un oscillateur auxiliaire (35) formant une base de temps de référence (22);

la pièce d'horlogerie comprenant en outre un dispositif de synchronisation (20) agencé pour asservir la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de consigne déterminée par la base de temps de référence, le dispositif de synchronisation comprenant un dispositif de freinage électromagnétique du résonateur mécanique, ce dispositif de freinage électromagnétique étant formé d'au moins une bobine (28,28C) et d'au moins un aimant permanent (30,32; 60; 64,65; 84) qui sont agencés de manière que, dans une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, une tension induite est générée par l'oscillation du résonateur mécanique entre les deux bornes de la bobine dans chaque alternance de cette oscillation; le dispositif de synchronisation étant agencé pour pouvoir diminuer momentanément l'impédance entre les deux bornes de la bobine; **caractérisée en ce que** le dispositif de synchronisation est agencé de manière à diminuer l'impédance entre les deux bornes de la bobine au cours d'intervalles de temps distincts $T_P$ et de manière que les débuts de deux intervalles de temps distincts successifs quelconques, parmi lesdits intervalles de temps distincts, présentent entre eux une distance temporelle $D_T$ égale à un nombre entier positif N multiplié par la moitié d'une période de consigne T0c pour l'oscillateur mécanique, soit une relation mathématique $D_T = N \cdot T0c/2$, le dispositif de synchronisation étant agencé pour déterminer au moyen de la base de temps de référence le début de chacun desdits intervalles de temps distincts de manière à satisfaire ladite relation mathématique entre la distance temporelle $D_T$ et la période de consigne T0c.

2. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** le dispositif de synchronisation est agencé de manière à déclencher périodiquement lesdits intervalles de temps distincts $T_P$, lesquels présentent une même valeur, et de manière que la fréquence de déclenchement $F_D$ soit égale à deux fois une fréquence de consigne F0c, égale par définition à l'inverse de la période de consigne T0c, divisée par un nombre entier positif M, soit $F_D = 2 \cdot F0c/M$, la valeur des intervalles de temps distincts Tp étant inférieure à la demi-période de consigne, soit $T_P < T0c/2$.

3. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1 ou 2, **caractérisée en ce que** le résonateur mécanique est formé par un balancier (8,8A,8B,8C) oscillant autour d'un axe d'oscillation (34).

4. Pièce d'horlogerie selon la revendication 3, **caractérisée en ce que** le balancier porte ledit au moins un aimant permanent et un support (5) du résonateur mécanique porte ladite au moins une bobine.

5. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** le dispositif de freinage électromagnétique est agencé de manière qu'une tension induite est engendrée dans ladite au moins une bobine sensiblement sans interruption pour toute oscillation du résonateur mécanique dans ladite plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique.

6. Pièce d'horlogerie selon la revendication 5, **caractérisée en ce que** la valeur des intervalles de temps distincts $T_P$ est inférieure au quart de la période de consigne T0c, soit $T_P < T0c/4$.

7. Pièce d'horlogerie selon la revendication 4, **caractérisée en ce que** le dispositif de freinage électromagnétique comprend un système magnétique porté par le balancier et formé par une paire d'aimants bipolaires (64,65) à aimantation axiale et de polarités opposées, ces deux aimants bipolaires étant agencés symétriquement relativement à un demi-axe de référence (62A) du balancier, ce demi-axe de référence définissant une position angulaire zéro lorsque le résonateur mécanique est dans sa position neutre ; et **en ce que** ladite bobine présente un décalage angulaire relativement à la position angulaire zéro de manière qu'une tension induite dans cette bobine intervienne substantiellement, lorsque l'oscillateur mécanique oscille dans sa plage de fonctionnement utile, dans chaque alternance alternativement avant et après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans cette alternance, les positions angulaires extrêmes du résonateur mécanique dans ladite plage de fonctionnement utile étant, en valeurs absolues, supérieures audit décalage angulaire qui est défini comme la distance angulaire minimale entre la position angulaire zéro et la position angulaire du centre de la bobine.

8. Pièce d'horlogerie selon la revendication 7, **caractérisée en ce que**, dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, les intervalles de temps distincts $T_P$ sont sensiblement égaux ou supérieurs à des zones temporelles sans tension induite dans ladite bobine autour des deux positions angulaires extrêmes du résonateur mécanique.

9. Pièce d'horlogerie selon la revendication 7 ou 8, **caractérisée en ce que** ledit décalage angulaire est sensiblement égal à 180°.

10. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce qu'**elle comprend un circuit d'alimentation (44) formé par une capacité de stockage et par un circuit redresseur d'une tension induite dans la bobine par au moins un aimant permanent lorsque le résonateur mécanique oscille.

11. Pièce d'horlogerie selon la revendication 10, **caractérisée en ce que** le circuit d'alimentation est constamment relié, d'une part, à une borne de ladite bobine et, d'autre part, à un potentiel de référence du dispositif de synchronisation; et **en ce que** ledit au moins un aimant permanent générant la tension induite redressée par le circuit redresseur, la bobine et le circuit d'alimentation sont agencés de manière que, dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, l'énergie électrique accumulée dans la capacité de stockage est suffisante pour alimenter le dispositif de synchronisation.

12. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 7 à 9, **caractérisée en ce qu'**elle comprend un circuit d'alimentation (44) formé par une capacité de stockage et par un circuit redresseur d'une tension induite dans la bobine par une autre paire d'aimants permanents (66,67) lorsque le résonateur mécanique oscille, l'autre paire d'aimants permanents présentant un axe milieu (68) entre ses deux aimants permanents et étant momentanément couplée à la bobine dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique, ledit axe milieu étant sensiblement décalé dudit décalage angulaire relativement audit demi-axe de référence (62A) de sorte que cet axe milieu est sensiblement aligné sur le centre de la bobine lorsque le résonateur mécanique est dans sa position de repos; et **en ce que** le circuit d'alimentation est relié, d'une part, à une borne de ladite bobine et, d'autre part, à un potentiel de référence du dispositif de synchronisation au moins périodiquement lors de passages du résonateur mécanique par sa position neutre.

**13.** Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** le dispositif de synchronisation est agencé de manière à engendrer un court-circuit entre les deux bornes de ladite bobine durant lesdits intervalles de temps distincts.

Fig. 1

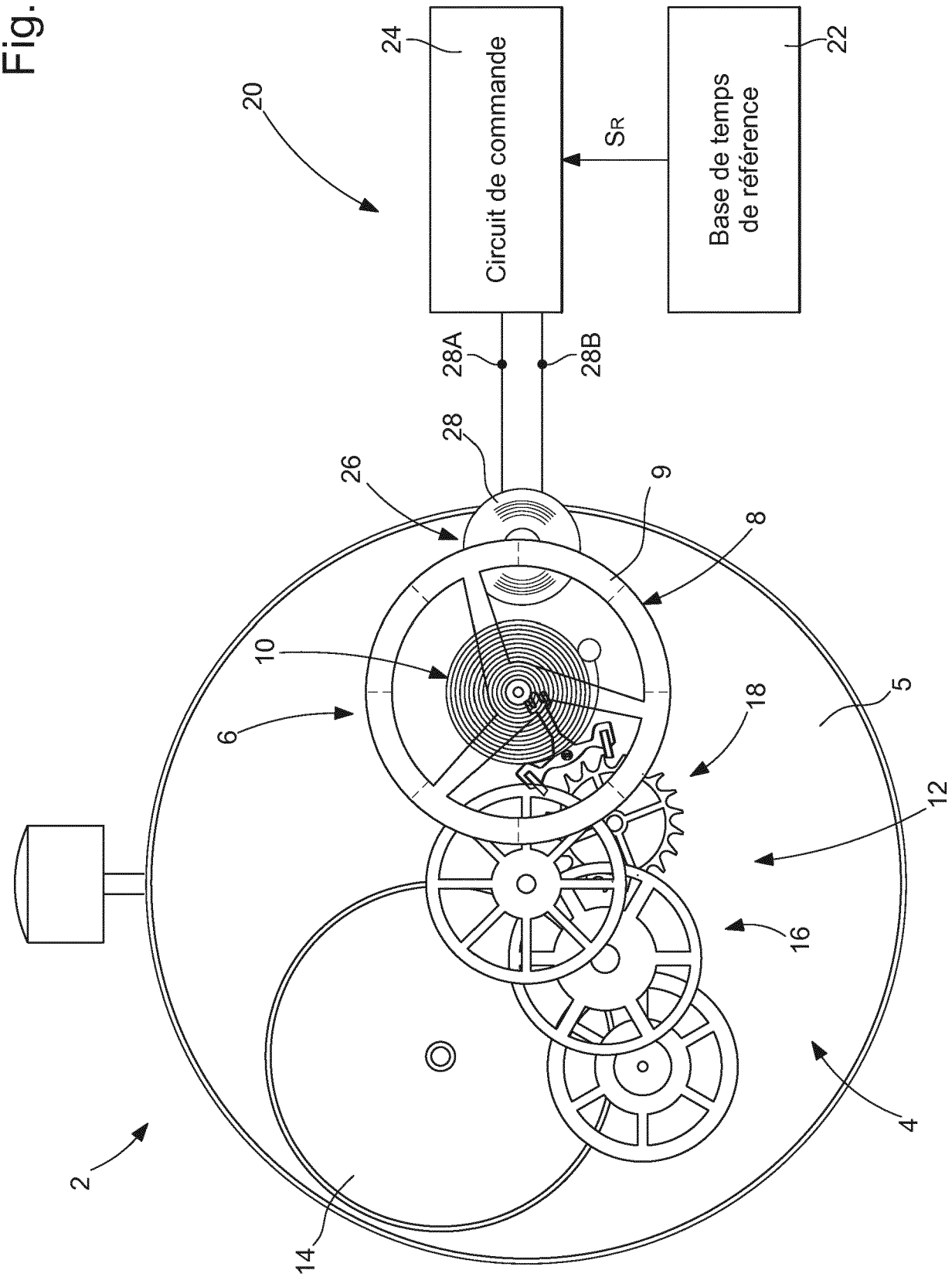

20
24
Circuit de commande
$S_R$
Base de temps de référence
22
28A
28B
28
26
9
8
10
6
18
5
12
16
4
2
14

Fig. 2

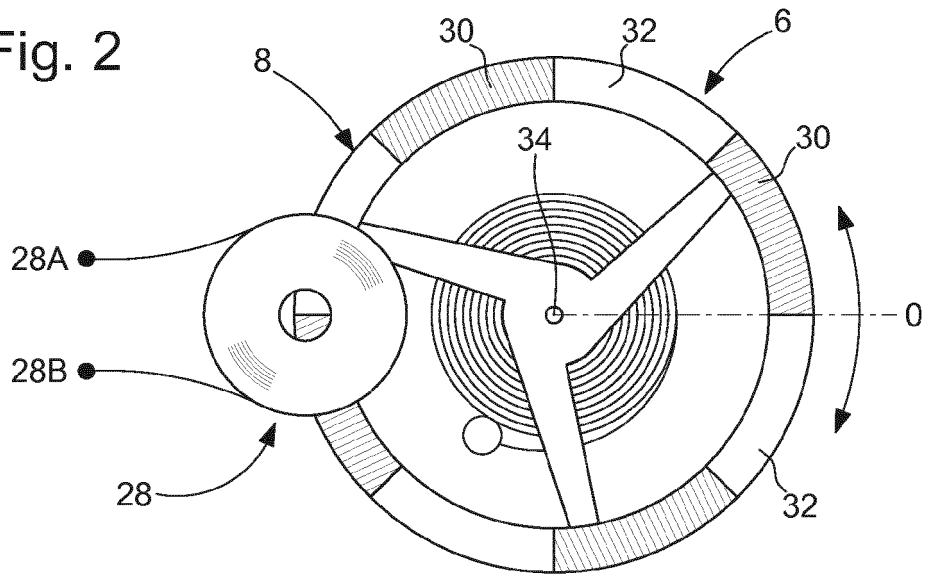

30
32
6
8
34
30
28A
0
28B
28
32

Fig. 3

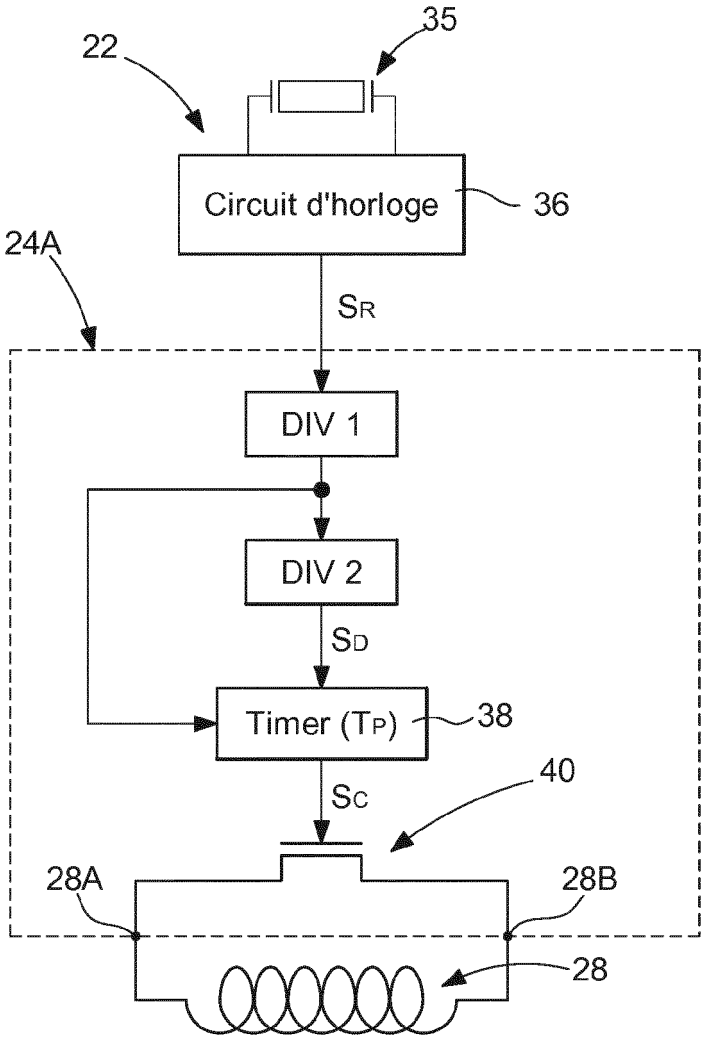

35
22
Circuit d'horloge
36
24A
SR
DIV 1
DIV 2
SD
Timer (TP)
38
40
SC
28A
28B
28

Fig. 4

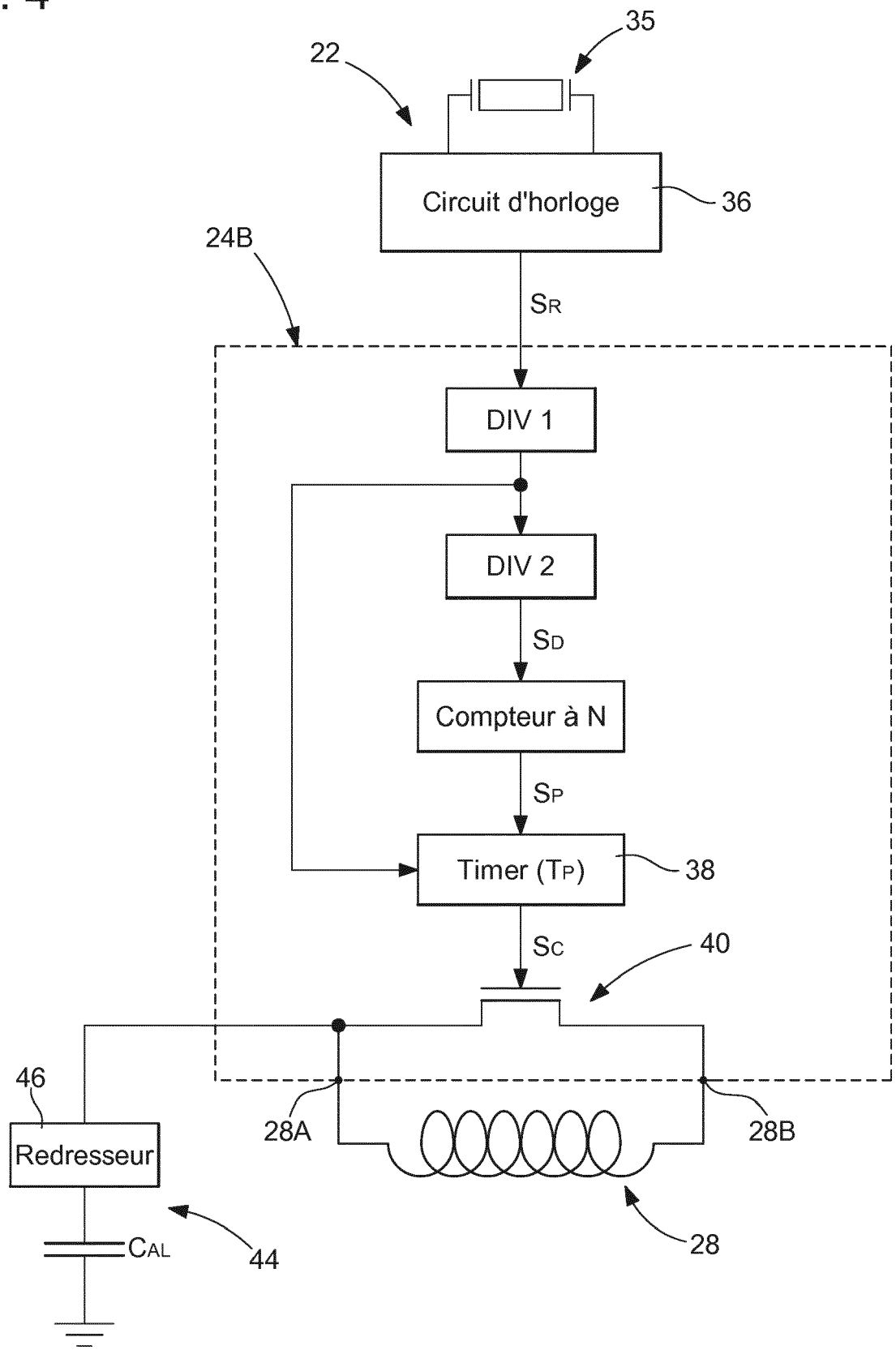

35
22
Circuit d'horloge
36
24B
SR
DIV 1
DIV 2
SD
Compteur à N
SP
Timer (TP)
38
SC
40
46
28A
28B
Redresseur
CAL
44
28

Fig. 5A

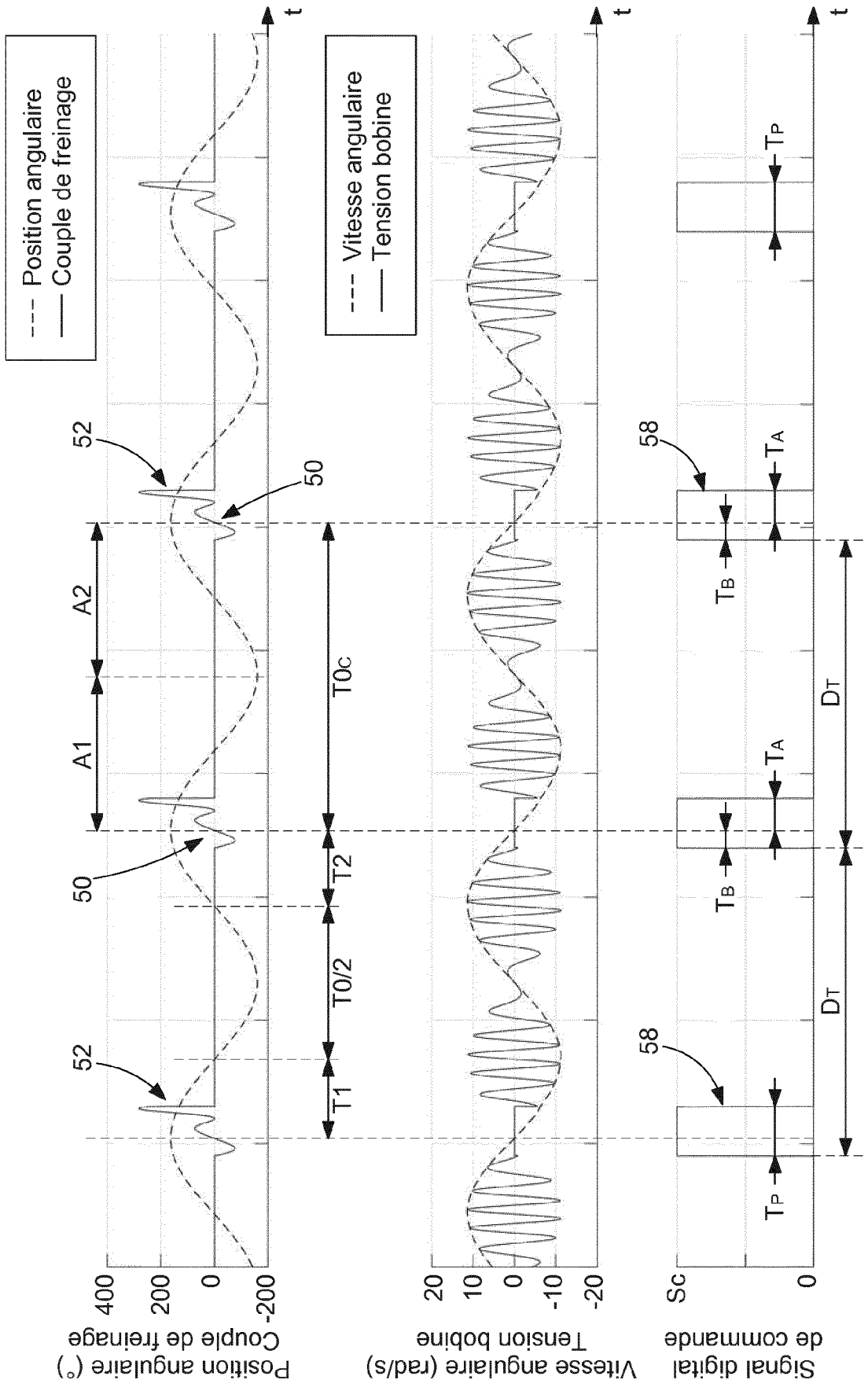

Position angulaire
Couple de freinage
Vitesse angulaire
Tension bobine
t
52
50
A1
A2
T0c
T0/2
T1
T2
58
TP
TA
TB
DT
Sc
0
400
200
-200
20
10
-10
-20
Position angulaire (°)
Couple de freinage
Vitesse angulaire (rad/s)
Tension bobine
Signal digital
de commande

Fig. 5B

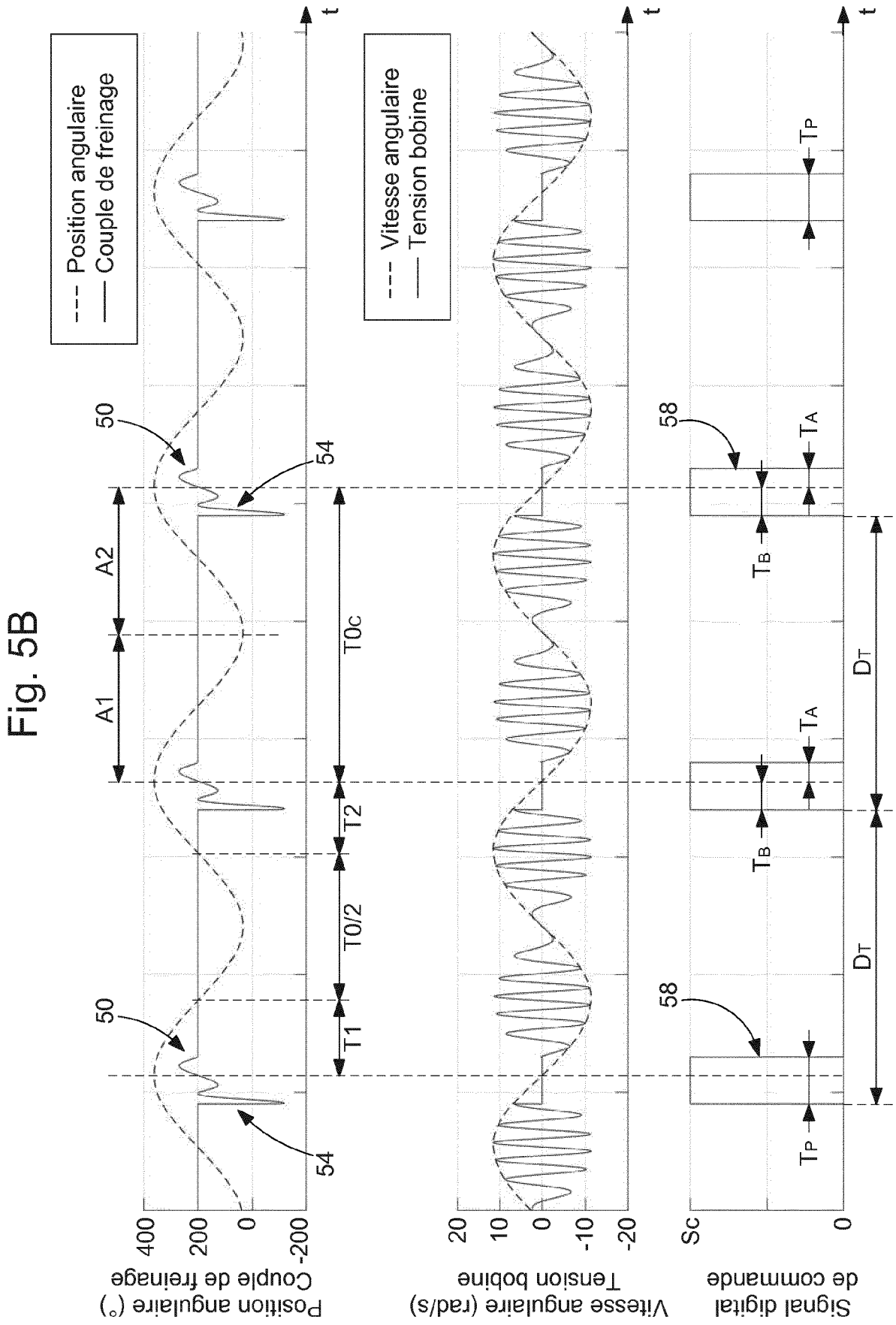

Position angulaire
Couple de freinage
Vitesse angulaire
Tension bobine
Position angulaire (°)
Couple de freinage
Vitesse angulaire (rad/s)
Tension bobine
Signal digital de commande
400
200
0
-200
20
10
0
-10
-20
Sc
0
t
50
54
58
A1
A2
T0c
T1
T0/2
T2
TP
TB
TA
DT

Fig. 5C

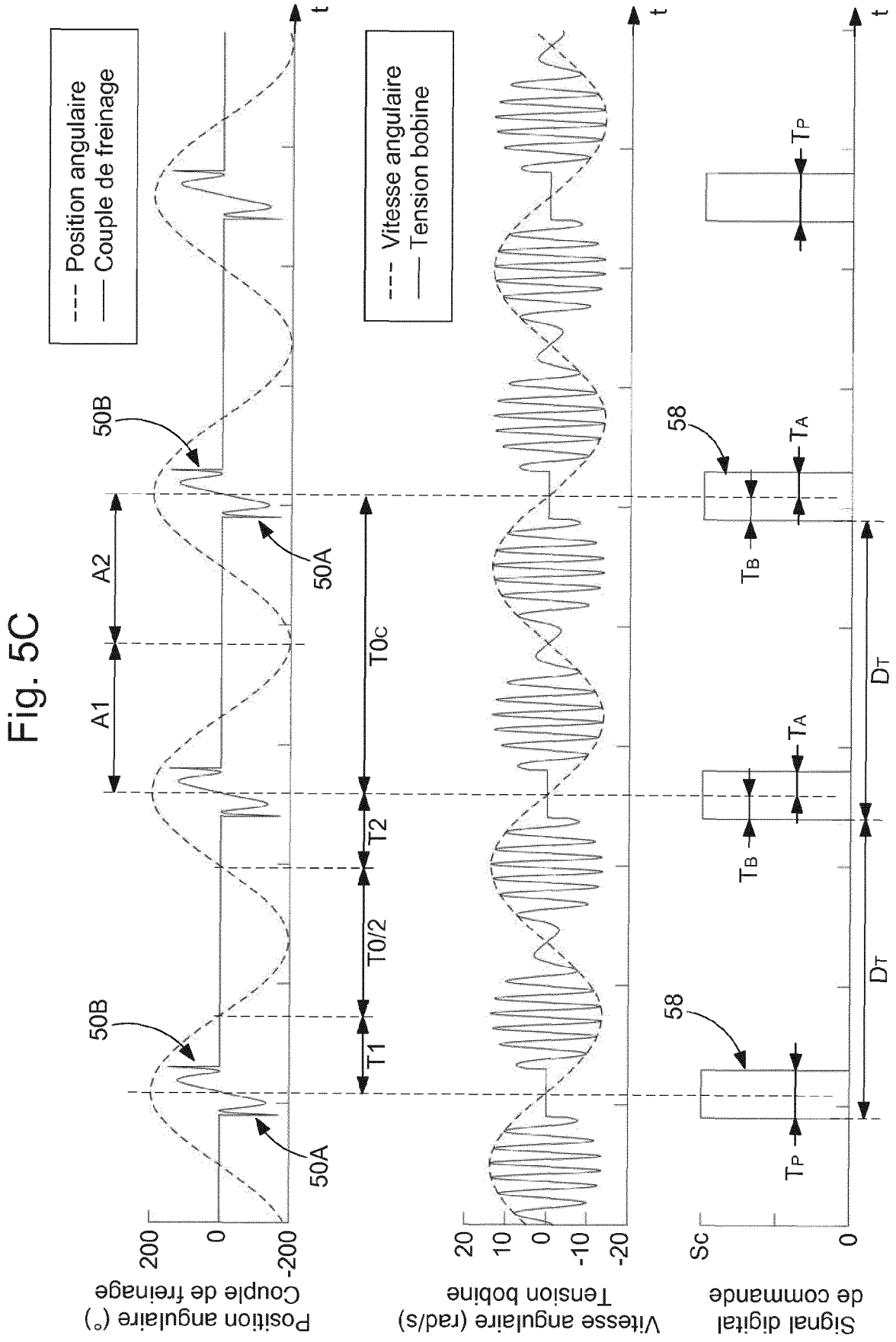

Position angulaire
Couple de freinage
Vitesse angulaire
Tension bobine
t
50B
50A
A1
A2
T0c
T0/2
T1
T2
58
TP
TA
TB
DT
Sc
200
0
-200
20
10
-10
-20
Position angulaire (°)
Couple de freinage
Vitesse angulaire (rad/s)
Tension bobine
Signal digital
de commande

Fig. 6

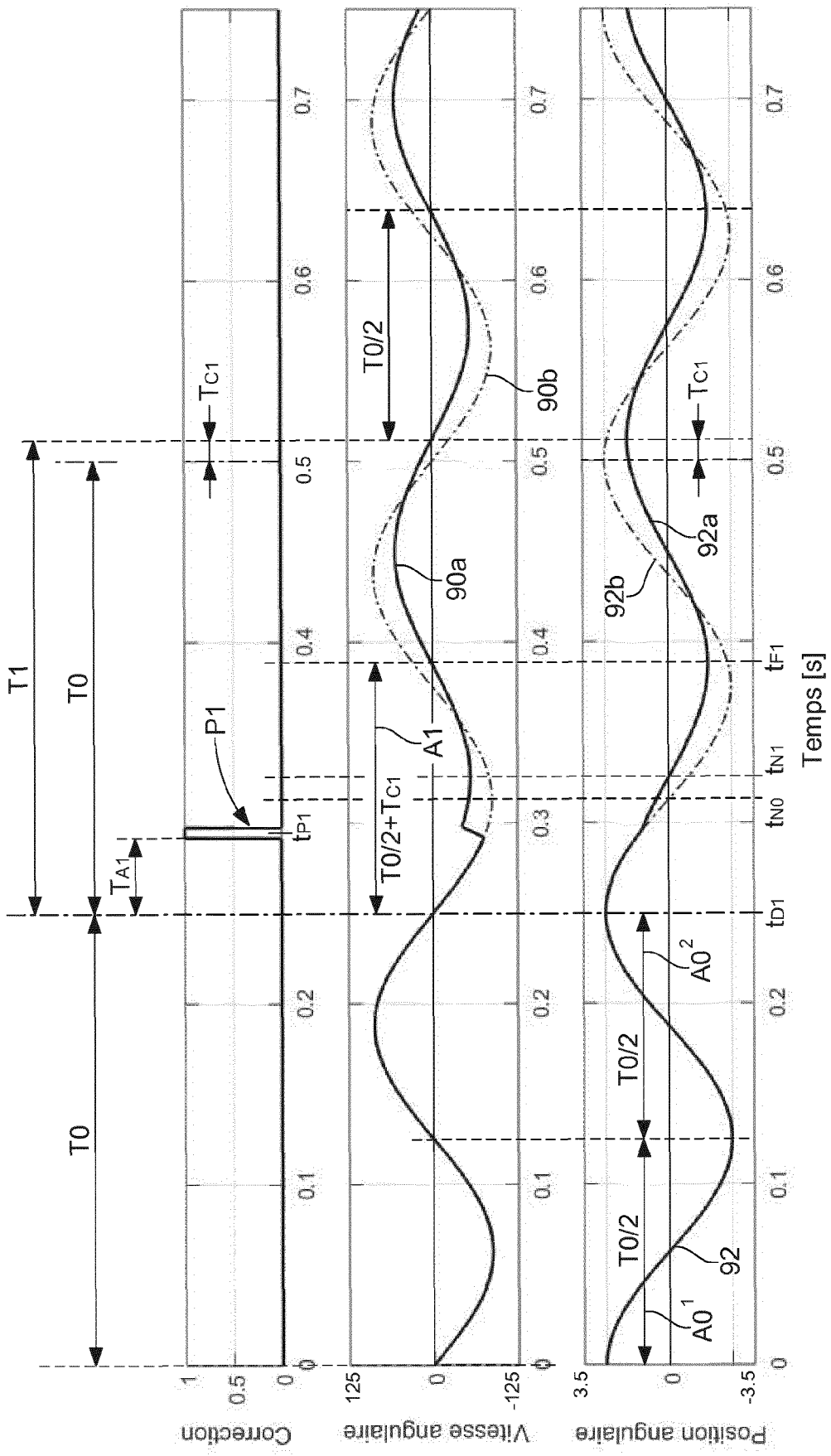
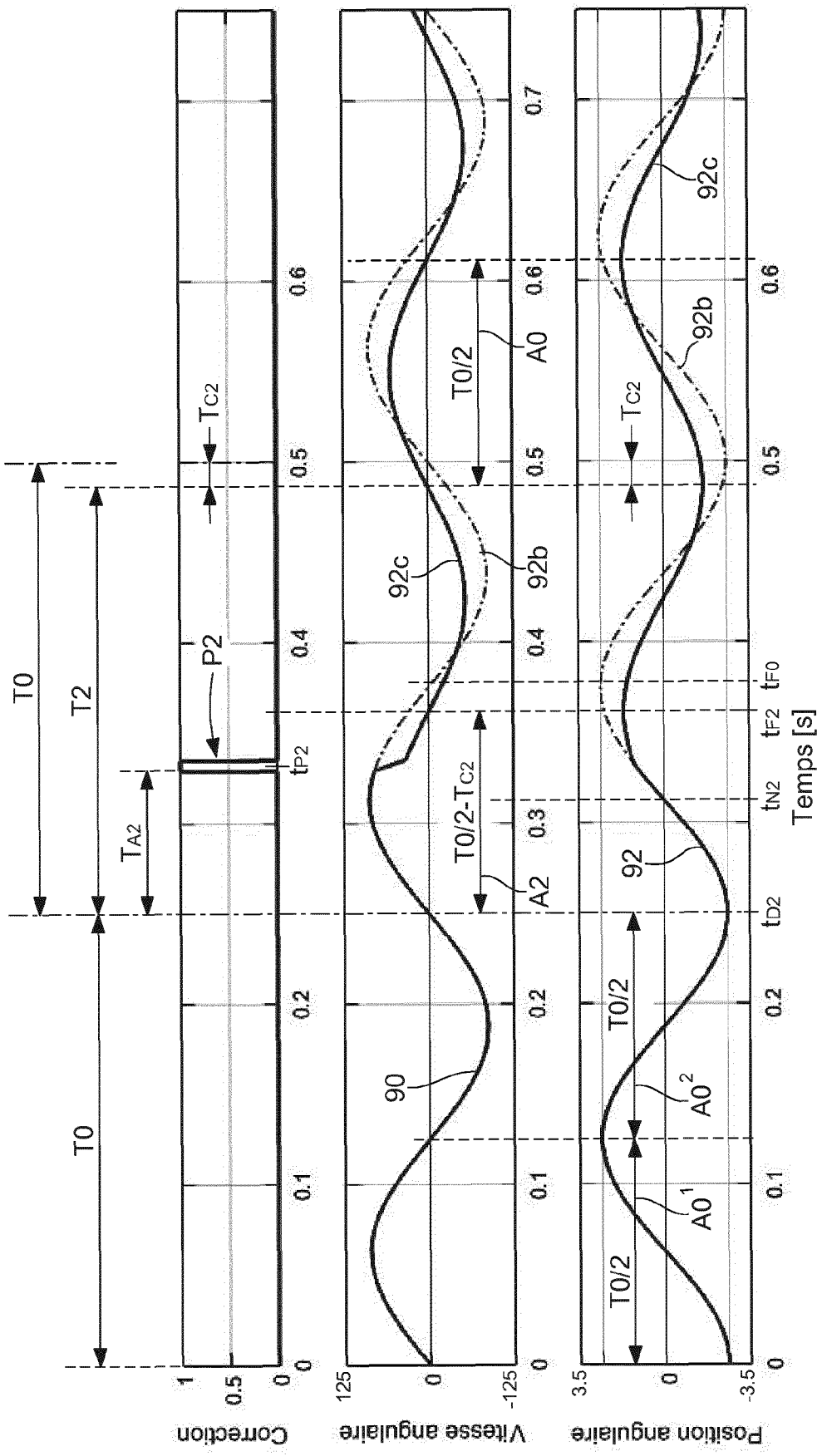

Correction
Vitesse angulaire
Position angulaire
Temps [s]
T1
T0
TA1
TC1
P1
tP1
T0/2
T0/2+TC1
A1
90a
90b
92a
92b
92
A0 1
A0 2
tD1
tN0
tN1
tF1

Fig. 7


Correction
Vitesse angulaire
Position angulaire
Temps [s]
T0
T2
TA2
TC2
P2
tP2
tD2
tN2
tF2
tF0
T0/2
T0/2-TC2
A0
A2
A0 1
A0 2
90
92
92b
92c

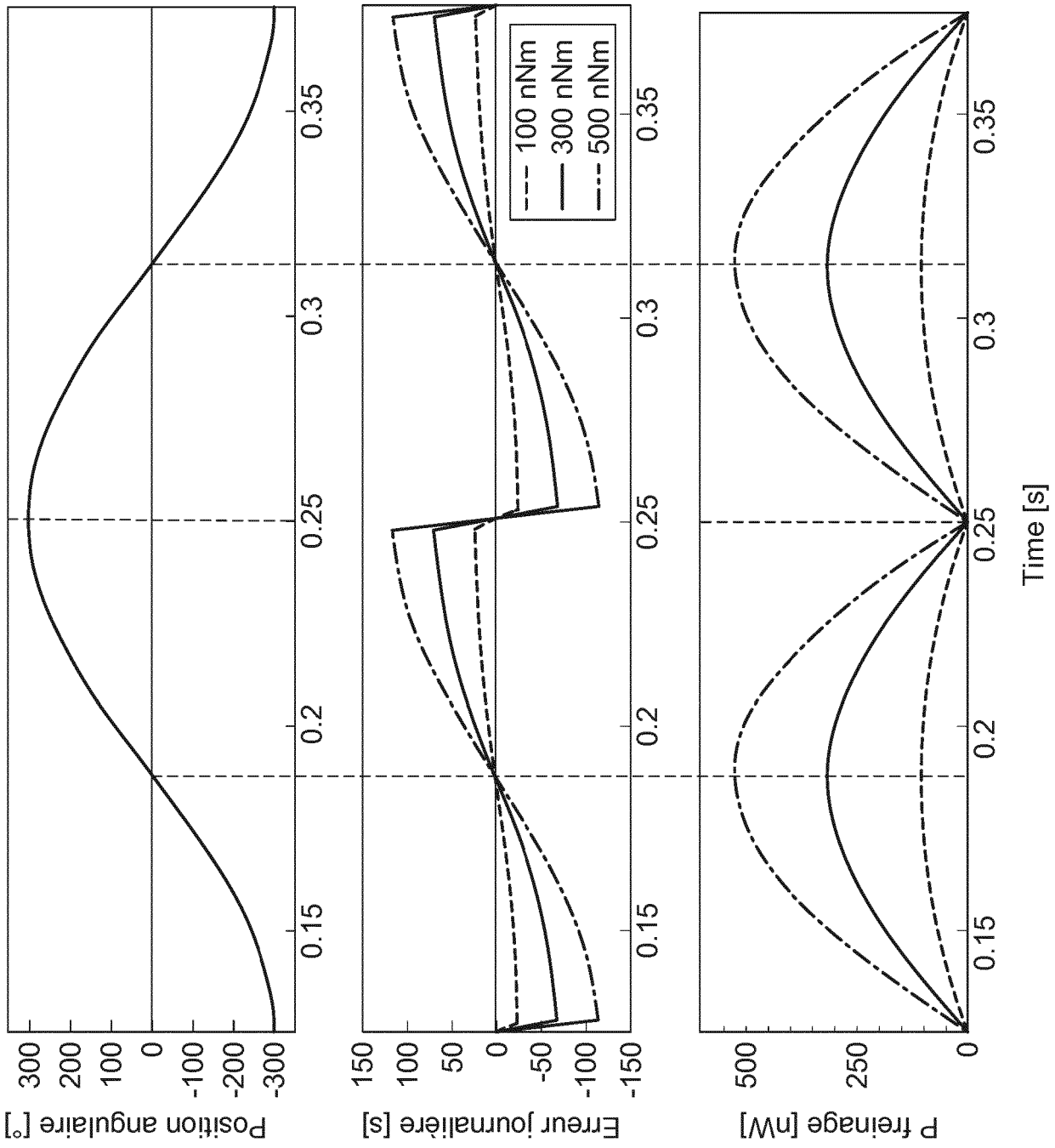



Fig. 8A

Fig. 8B

Fig. 8C

Fig. 9

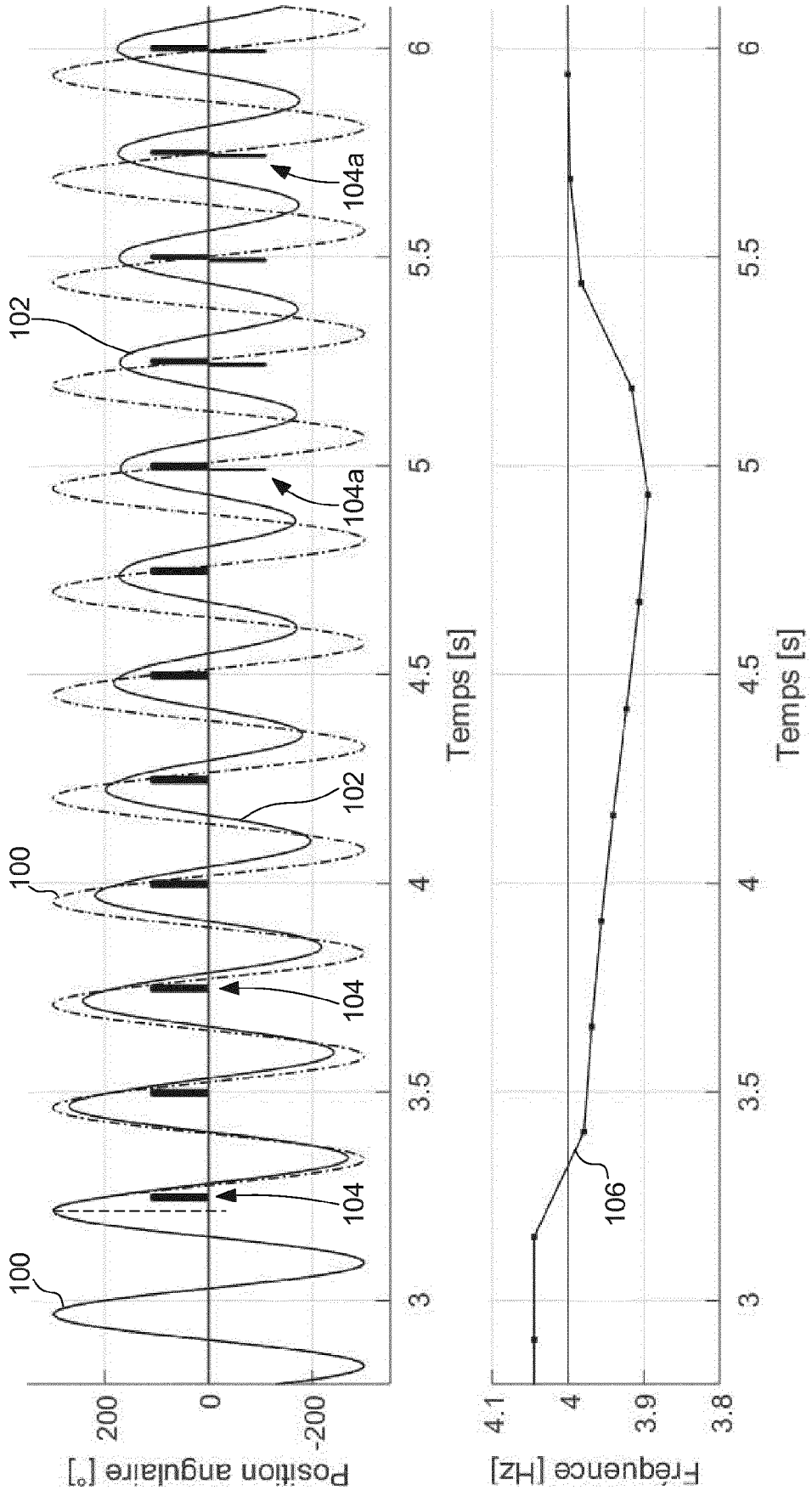

Position angulaire [°]
200
0
-200
3
3.5
4
4.5
5
5.5
6
Temps [s]
100
102
104
104a
Fréquence [Hz]
4.1
4
3.9
3.8
106

Fig. 10

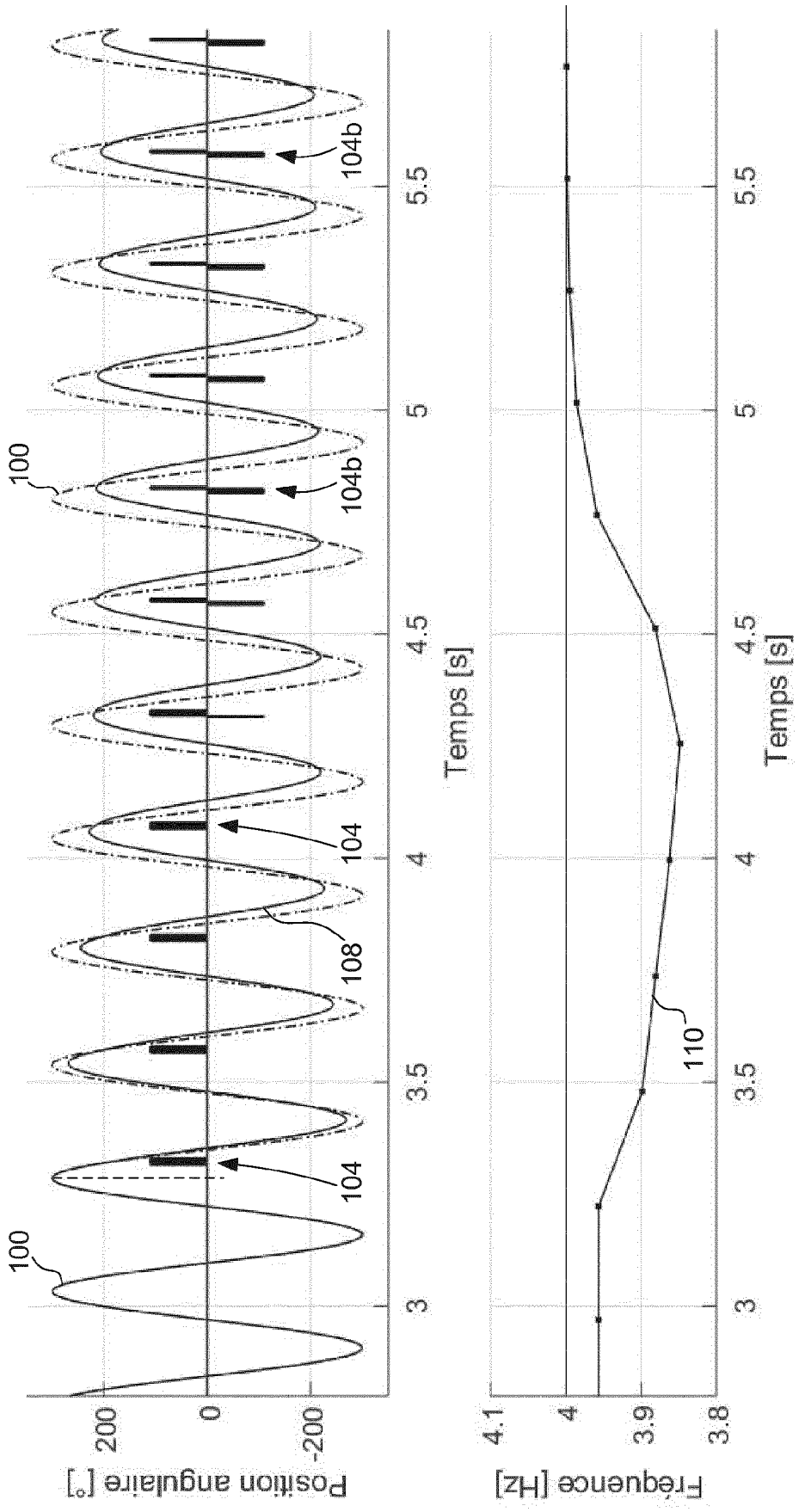

Position angulaire [°]
200
0
-200
3
3.5
4
4.5
5
5.5
Temps [s]
100
104
104b
108
Fréquence [Hz]
4.1
4
3.9
3.8
110

Fig. 11

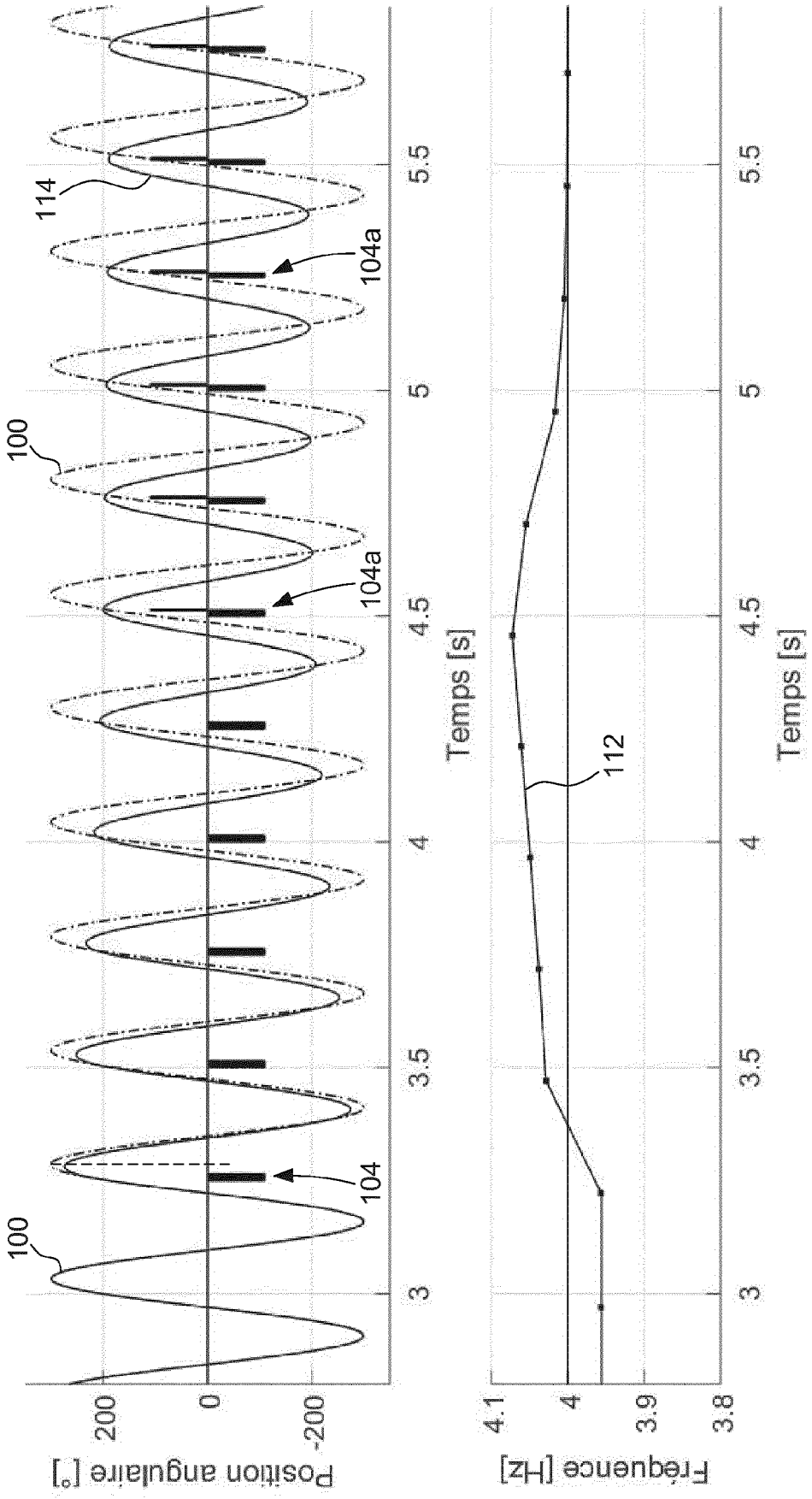

Position angulaire [°]
200
0
-200
3
3.5
4
4.5
5
5.5
Temps [s]
100
104
104a
104a
114
Fréquence [Hz]
4.1
4
3.9
3.8
3
3.5
4
4.5
5
5.5
Temps [s]
112

Fig. 12

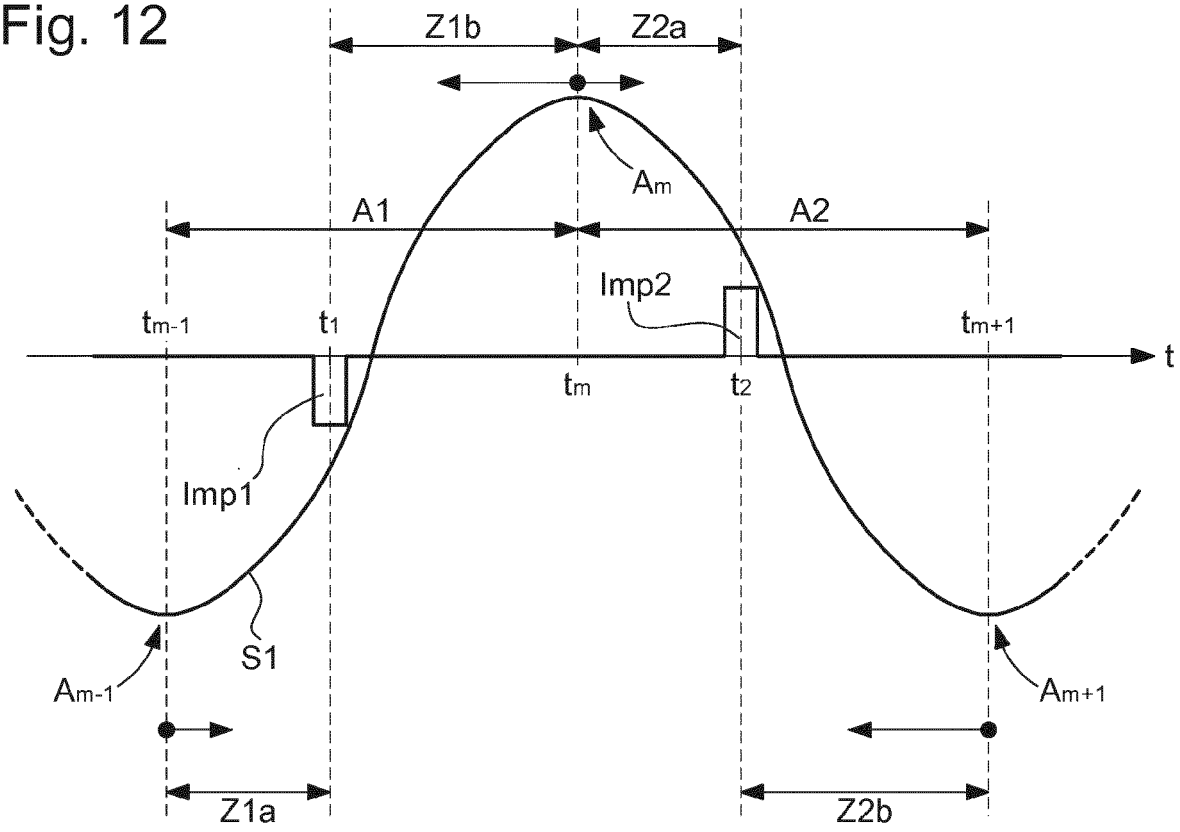

Z1b
Z2a
Am
A1
A2
Imp2
tm-1
t1
tm+1
t
tm
t2
Imp1
S1
Am-1
Am+1
Z1a
Z2b

Fig. 13

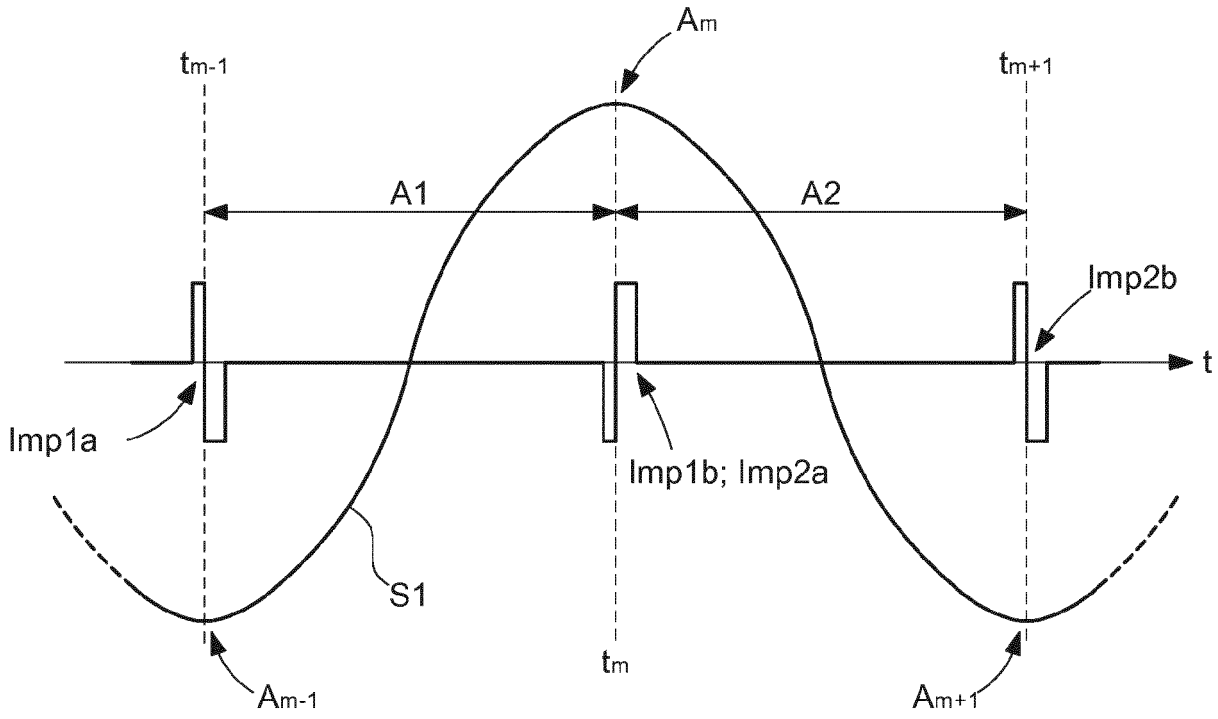

Am
tm-1
tm+1
A1
A2
Imp2b
t
Imp1a
Imp1b; Imp2a
S1
tm
Am-1
Am+1

Fig. 14

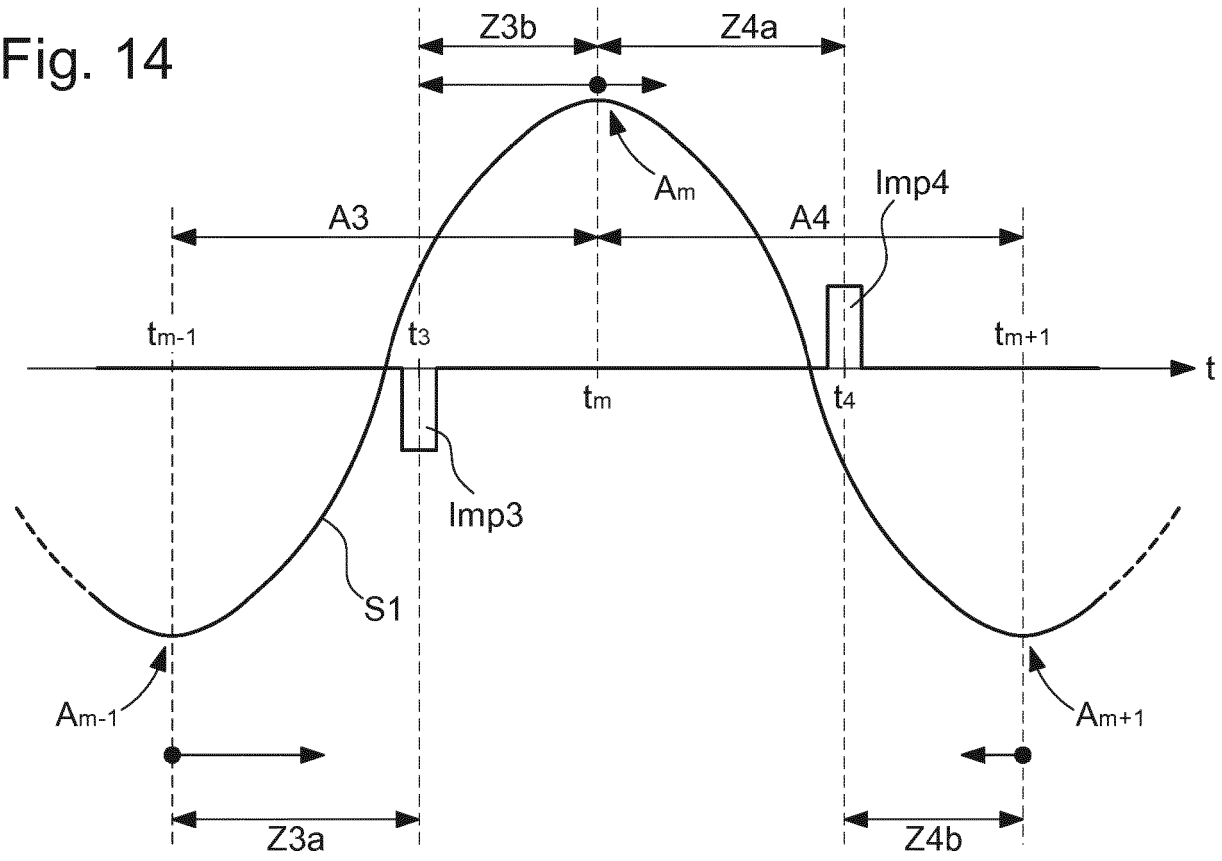

Z3b
Z4a
Am
Imp4
A3
A4
tm-1
t3
tm+1
t
tm
t4
Imp3
S1
Am-1
Am+1
Z3a
Z4b

Fig. 15

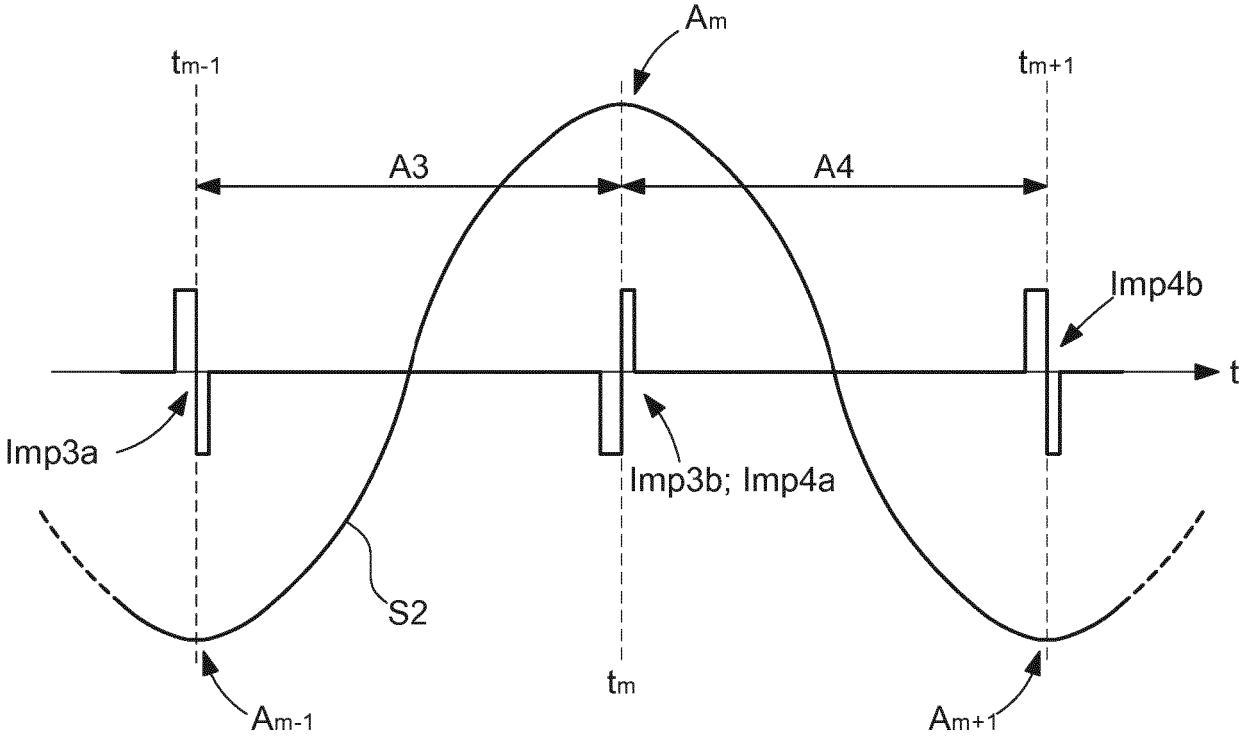

Am
tm-1
tm+1
A3
A4
Imp4b
t
Imp3a
Imp3b; Imp4a
S2
tm
Am-1
Am+1

Fig. 16

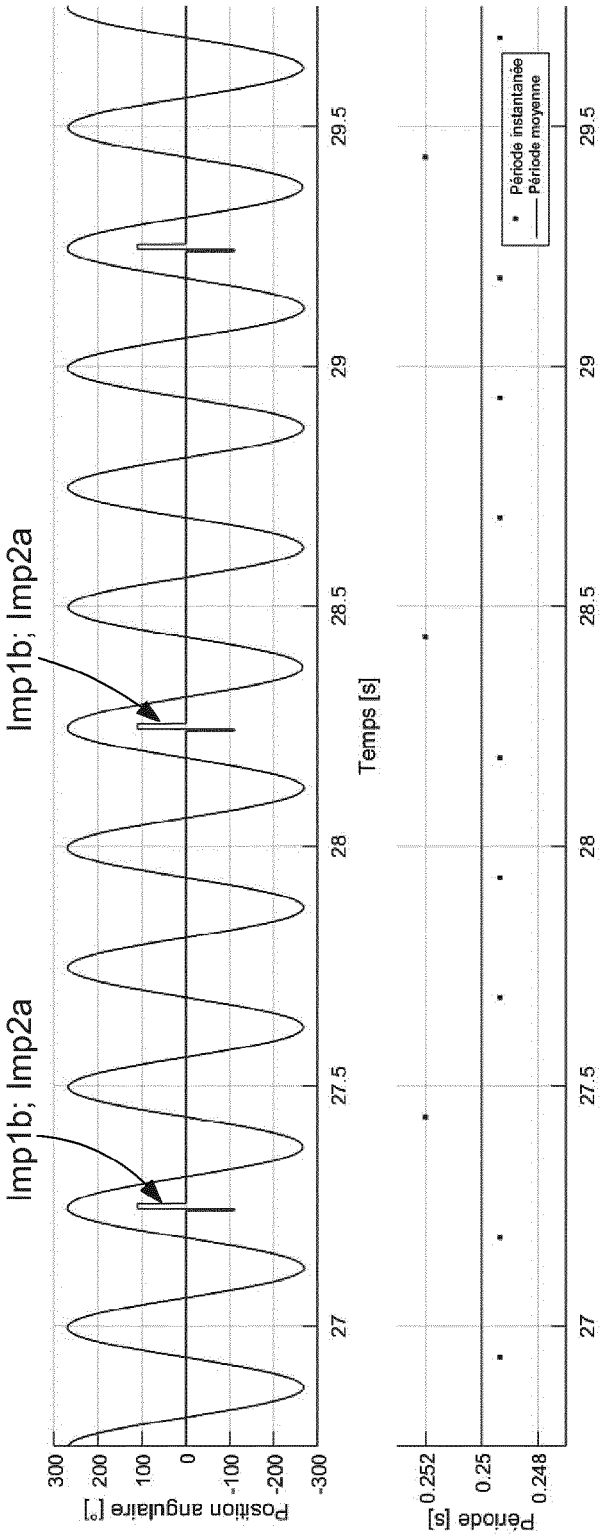

Imp1b; Imp2a
Imp1b; Imp2a
Position angulaire [°]
300
200
100
0
-100
-200
-300
27
27.5
28
28.5
29
29.5
Temps [s]
Période instantanée
Période moyenne
Période [s]
0.252
0.25
0.248

Fig. 17

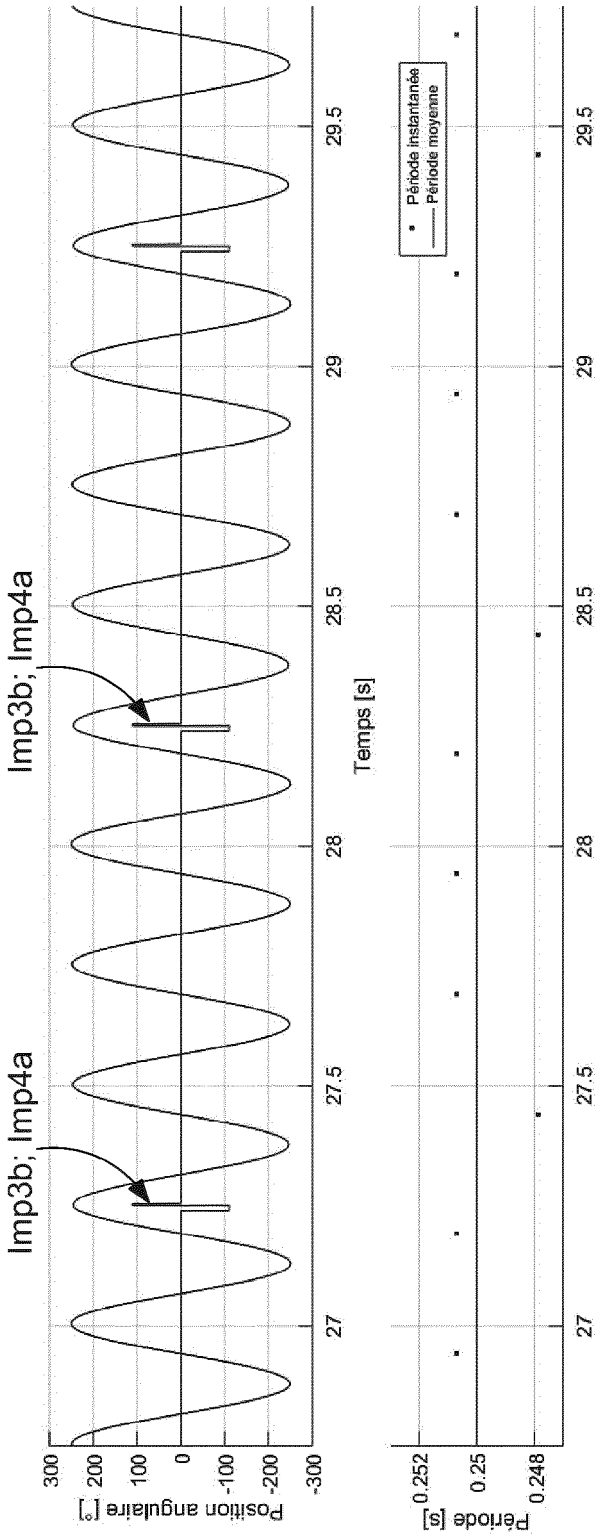

Imp3b; Imp4a
Imp3b; Imp4a
Position angulaire [°]
300
200
100
0
-100
-200
-300
27
27.5
28
28.5
29
29.5
Temps [s]
Période instantanée
Période moyenne
Période [s]
0.252
0.25
0.248

Fig. 18

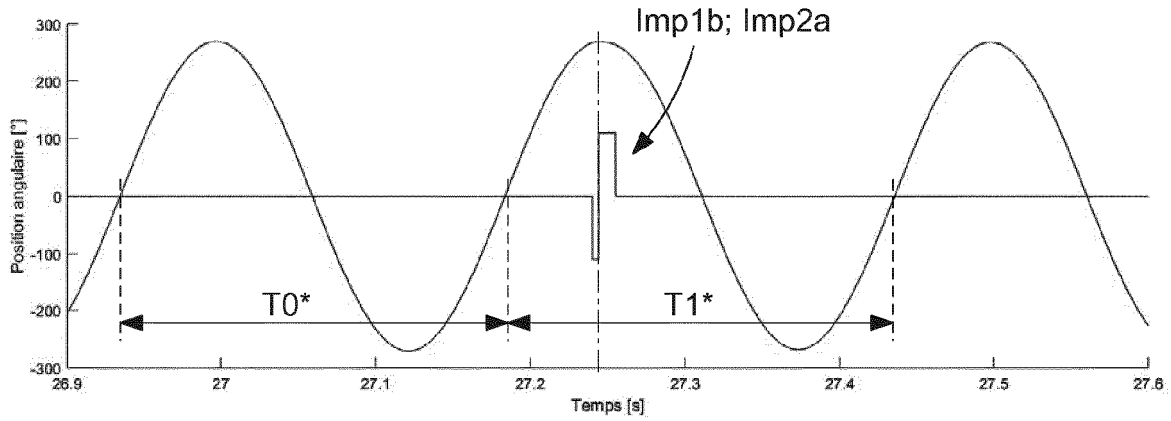



Fig. 19

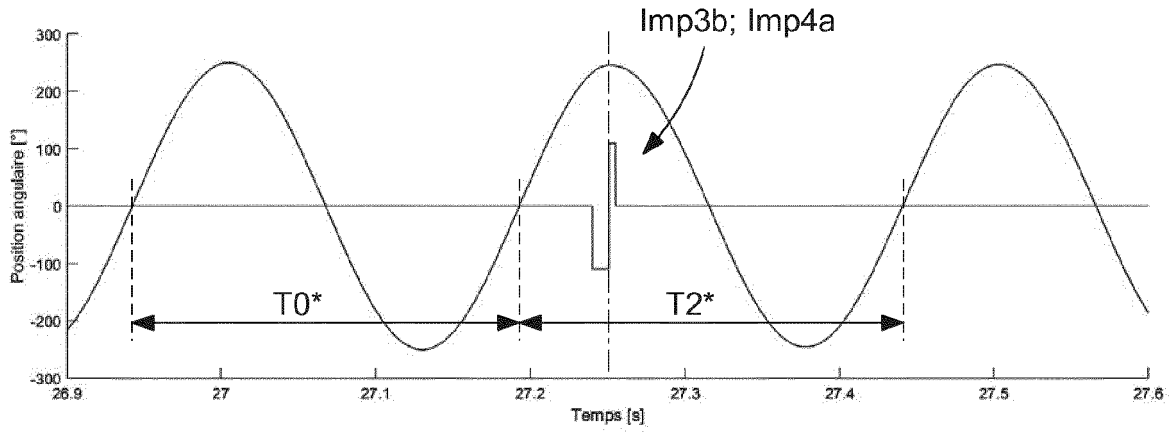



Fig. 20

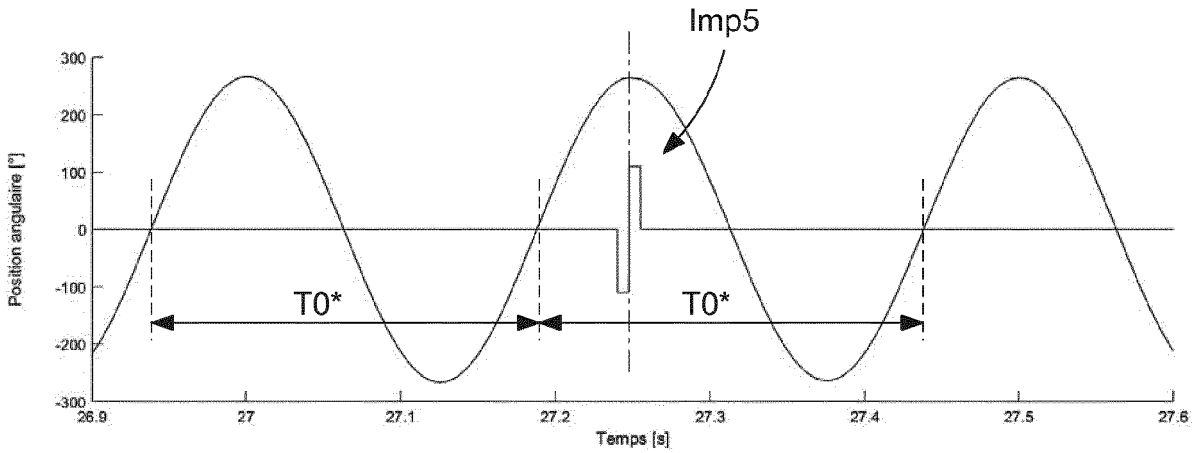


Fig. 21

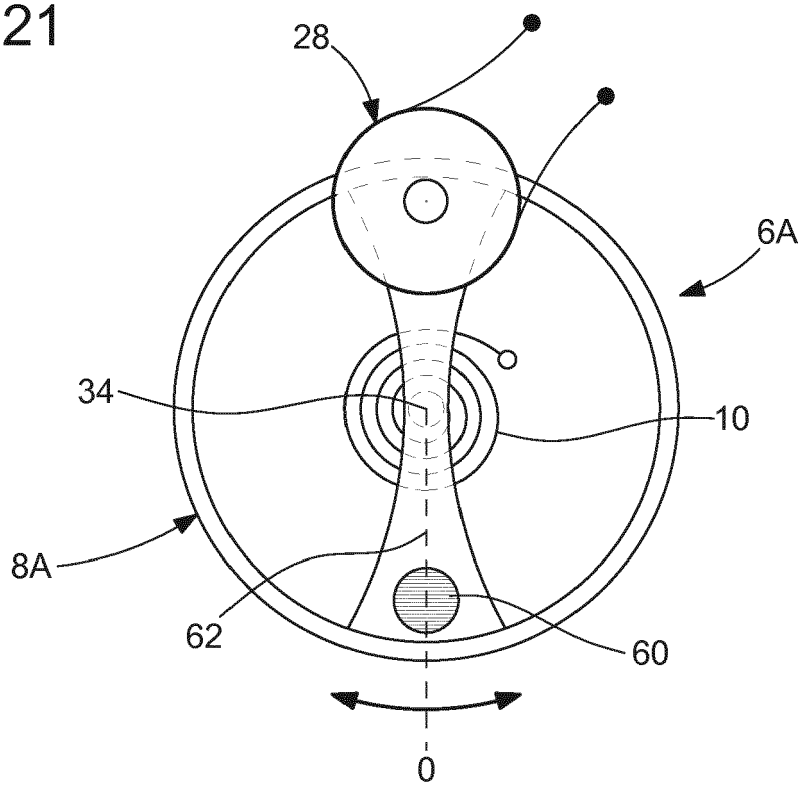



Fig. 23

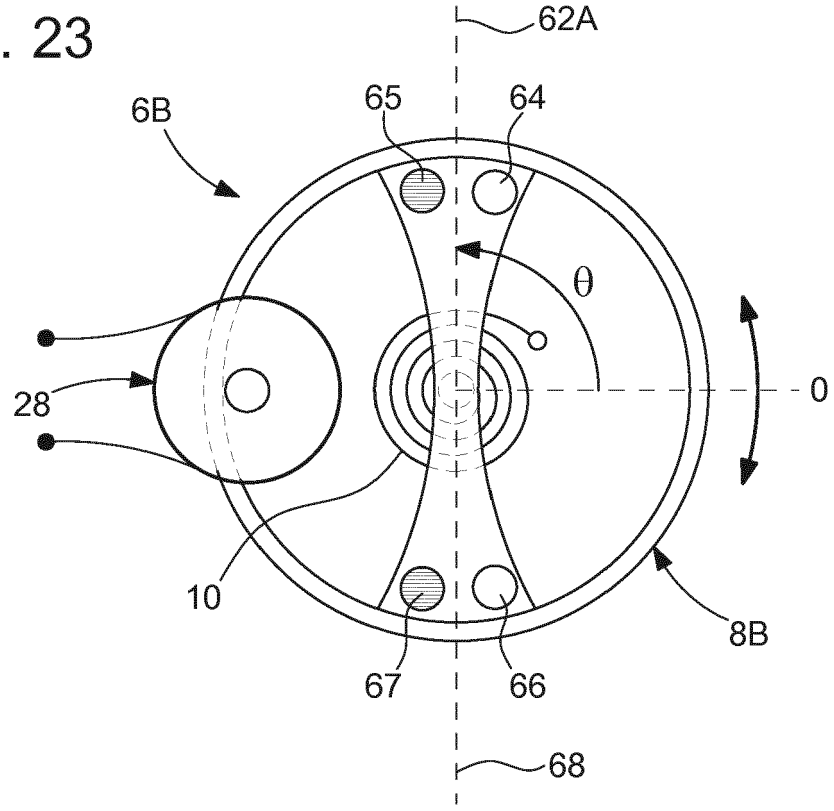


Fig. 22

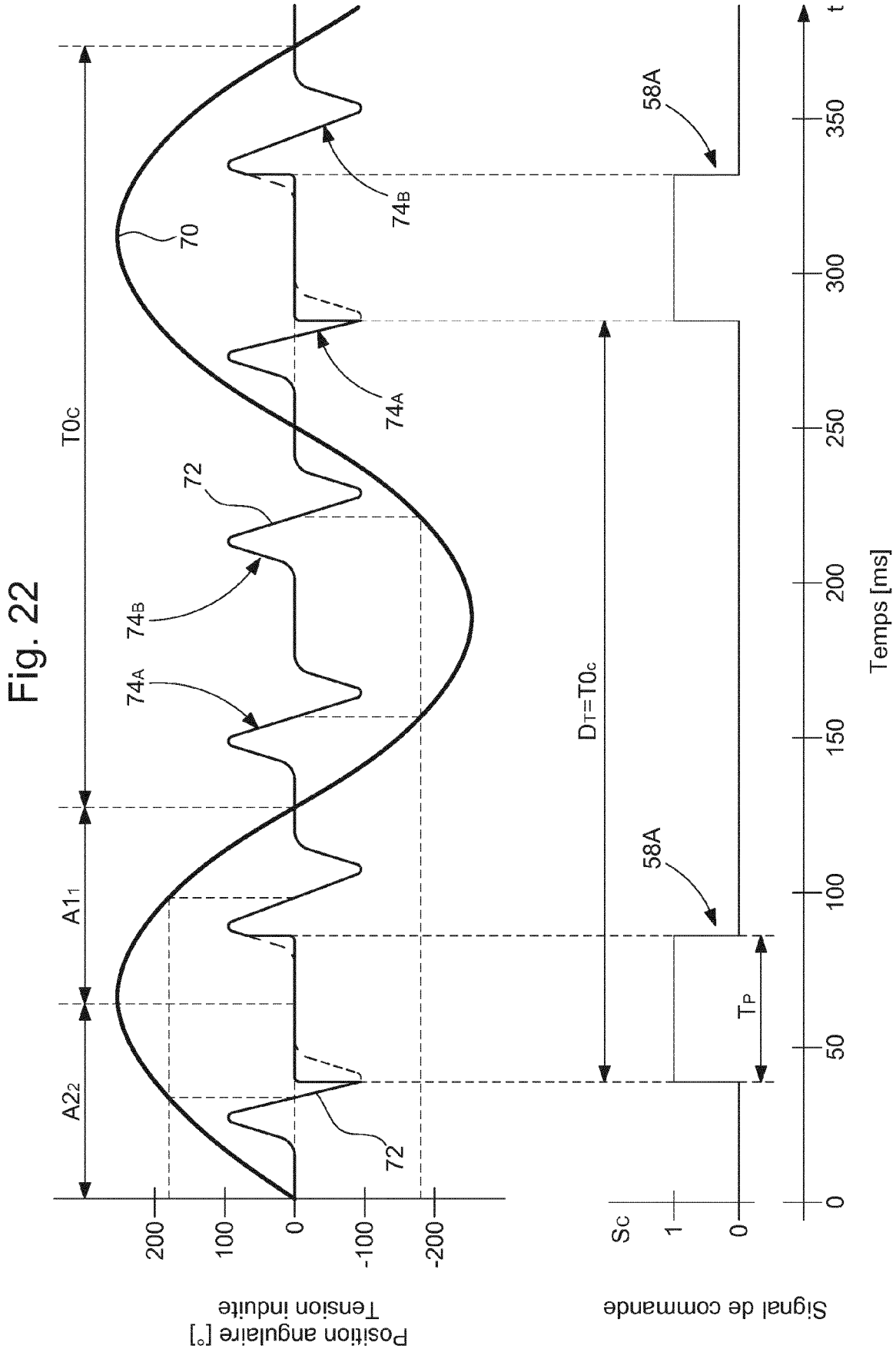

Position angulaire [°]
Tension induite
200
100
0
-100
-200
A2₂
A1₁
T0c
72
74A
74B
70
74B
74A
72
Signal de commande
Sc
1
0
58A
58A
58A
DT=T0c
TP
0
50
100
150
200
250
300
350
t
Temps [ms]

Fig. 24

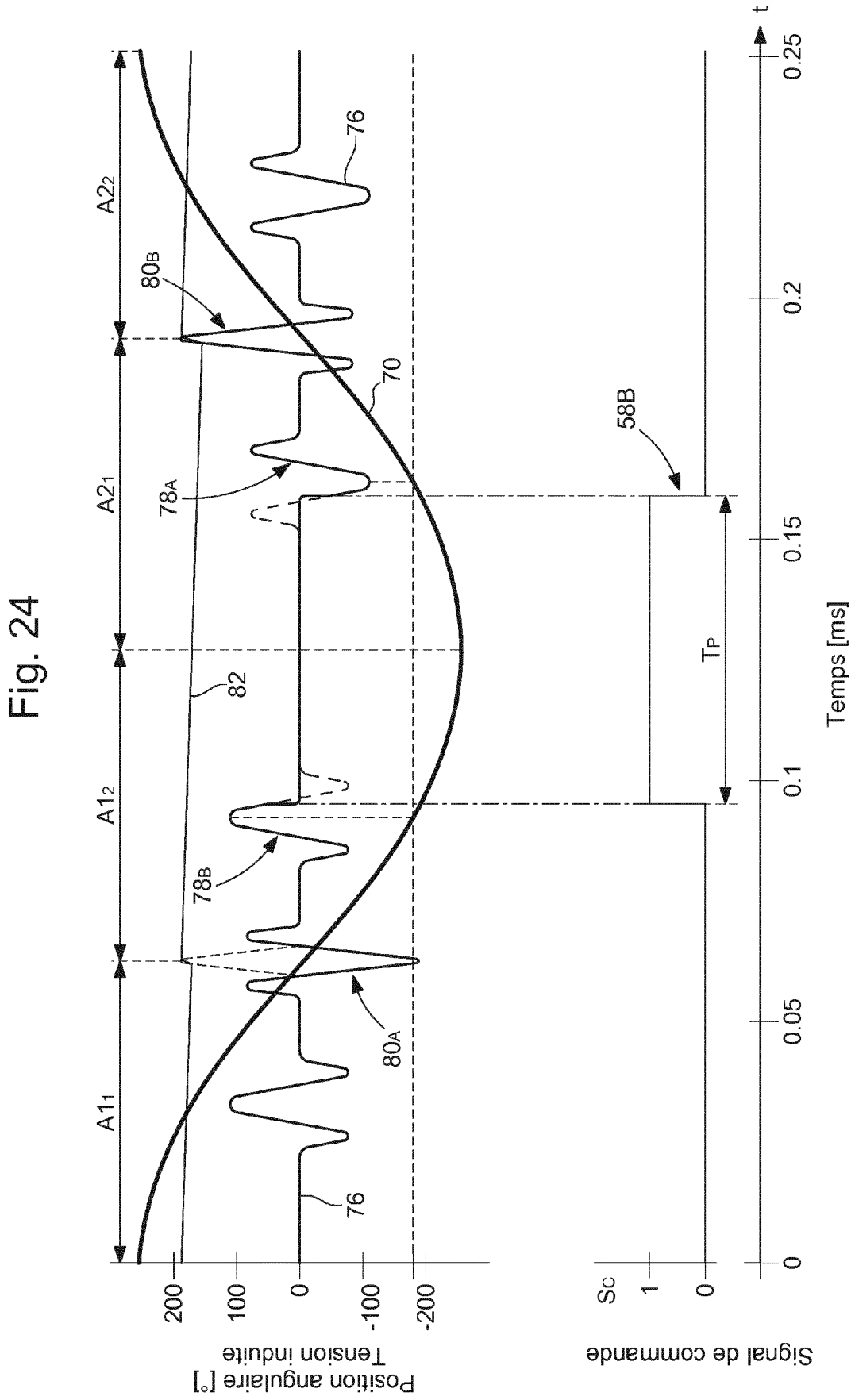

Position angulaire [°]
Tension induite
200
100
0
-100
-200
A11
A12
A21
A22
76
80A
78B
82
78A
80B
70
58B
TP
Signal de commande
Sc
1
0
t
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
Temps [ms]

Fig. 25

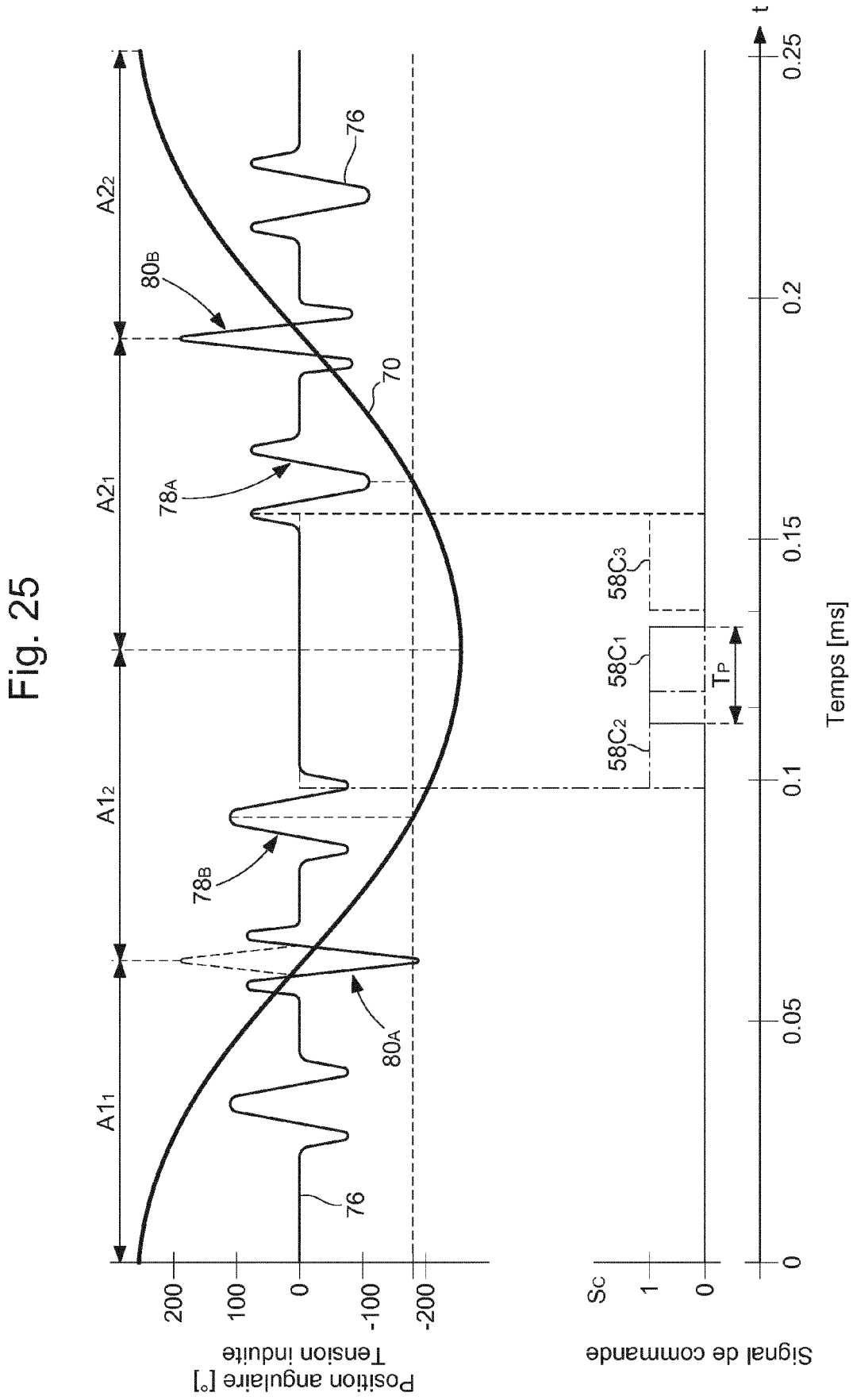

Position angulaire [°]
Tension induite
200
100
0
-100
-200
A11
A12
A21
A22
76
80A
78B
80B
78A
70
Signal de commande
SC
1
0
58C2
58C1
58C3
TP
t
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
Temps [ms]

Fig. 26

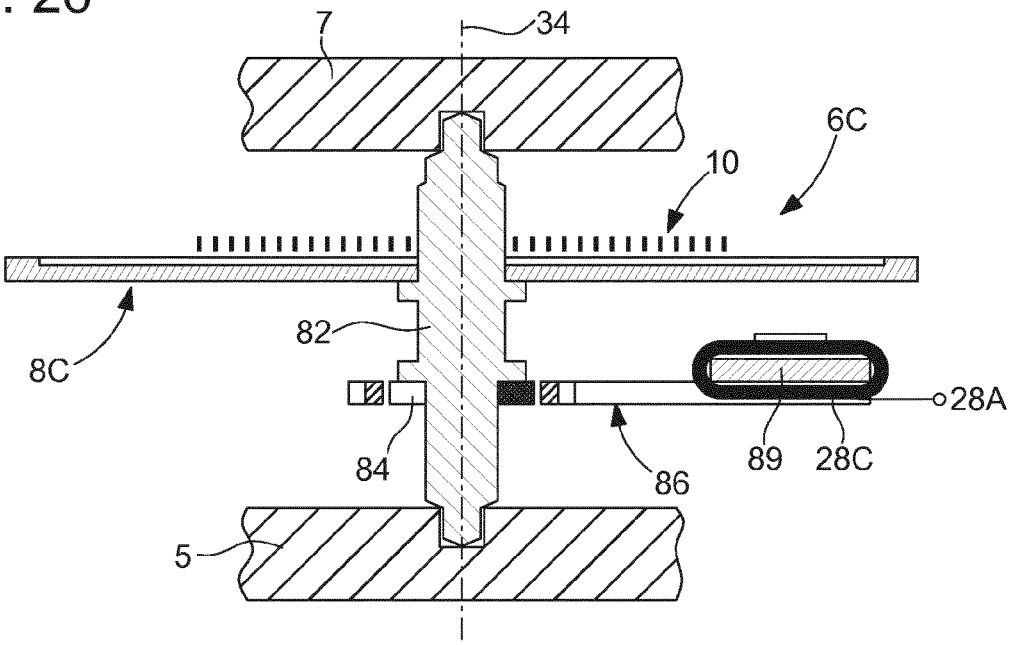

7
34
6C
10
8C
82
28A
84
86
89
28C
5

Fig. 27

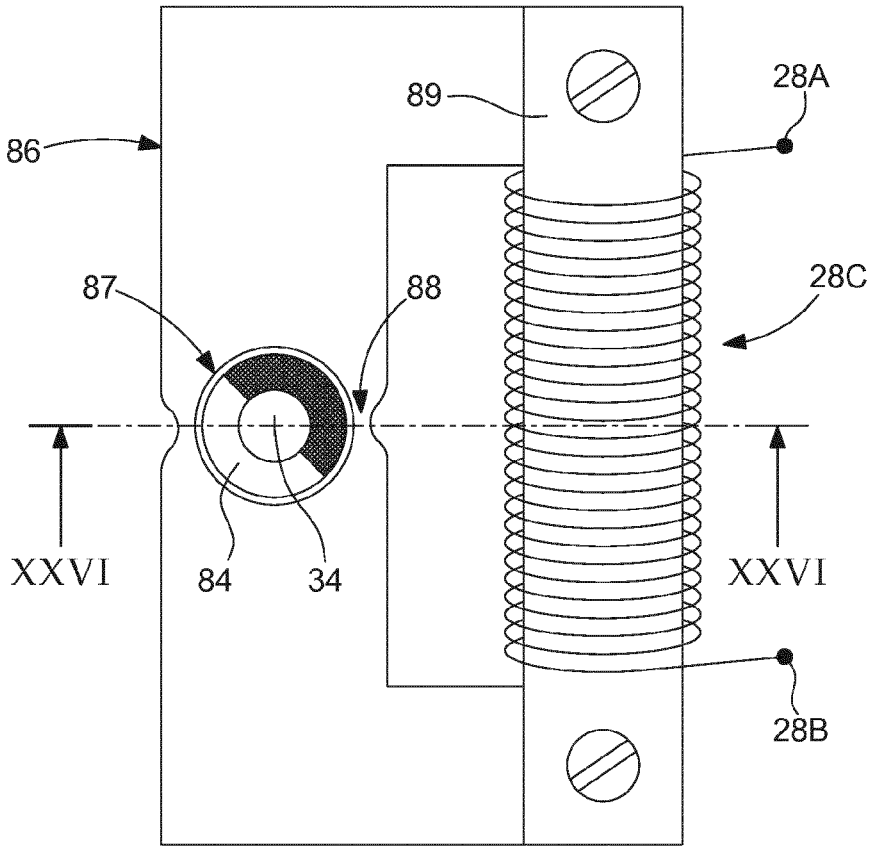

89
28A
86
87
88
28C
XXVI
84
34
XXVI
28B

Fig. 28A

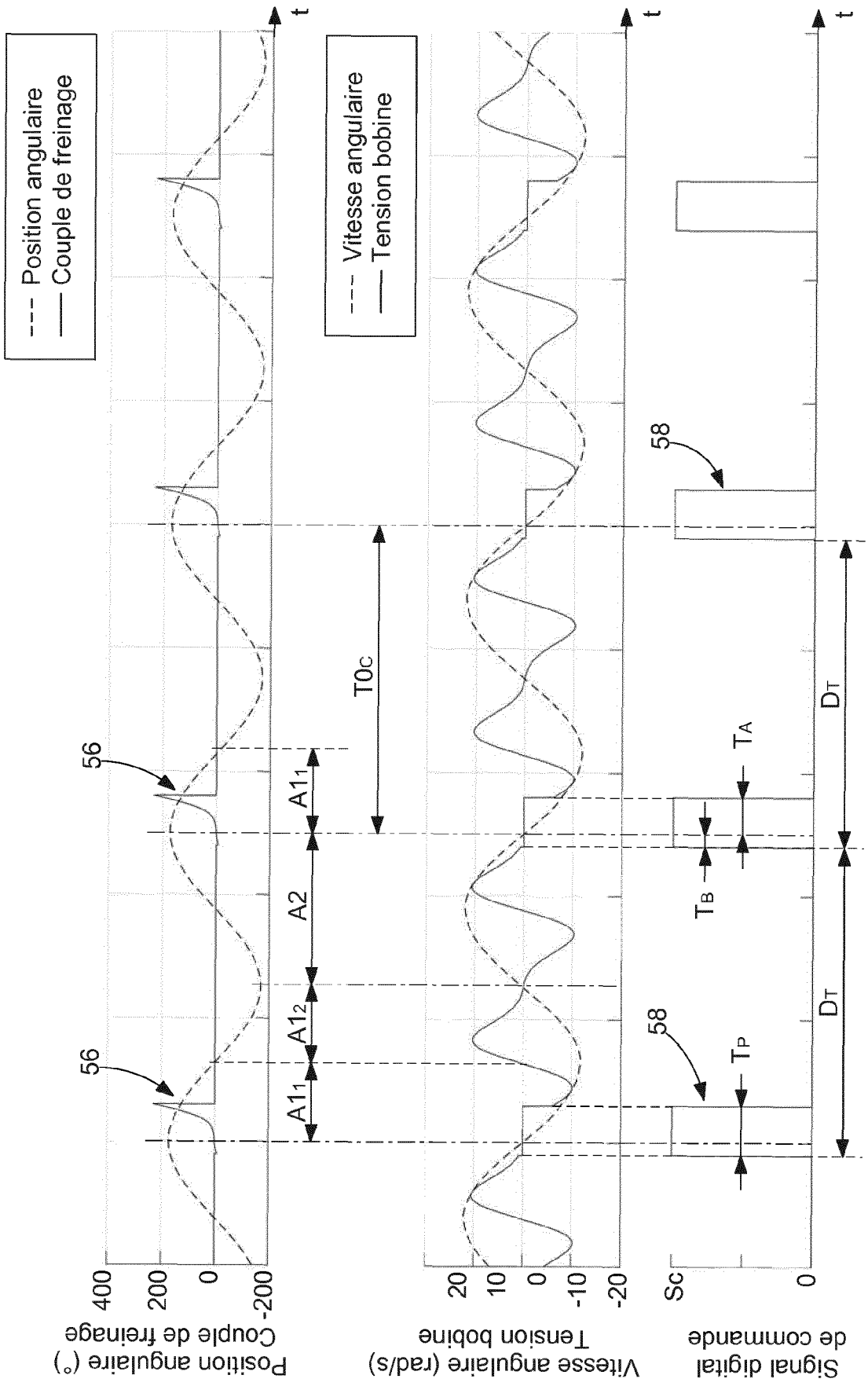

Position angulaire
Couple de freinage
Vitesse angulaire
Tension bobine
Position angulaire (°)
Couple de freinage
Vitesse angulaire (rad/s)
Tension bobine
Signal digital de commande
400
200
0
-200
20
10
0
-10
-20
Sc
0
t
56
58
A11
A2
A12
T0C
TA
TB
TP
DT

Fig. 28B

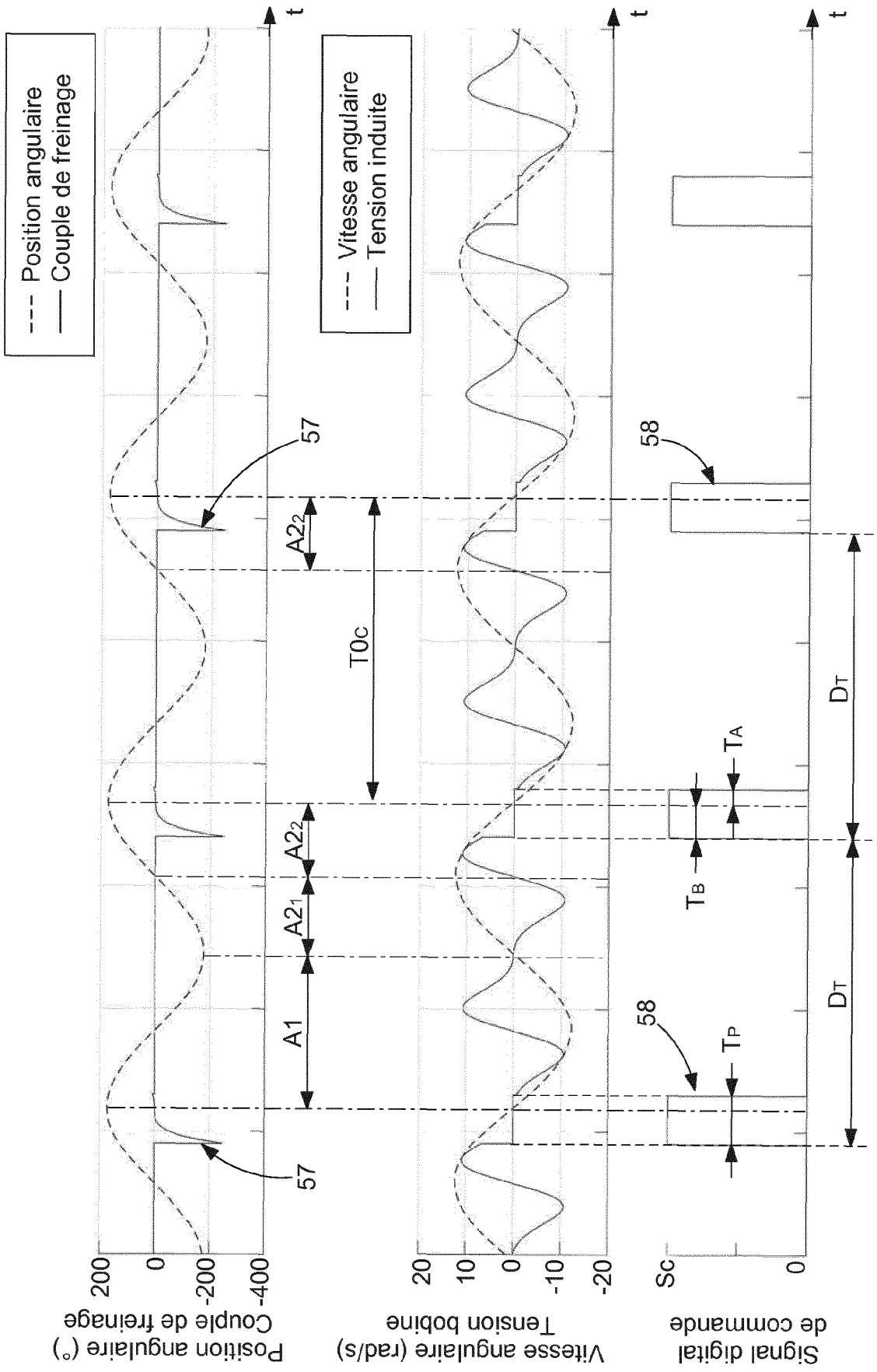
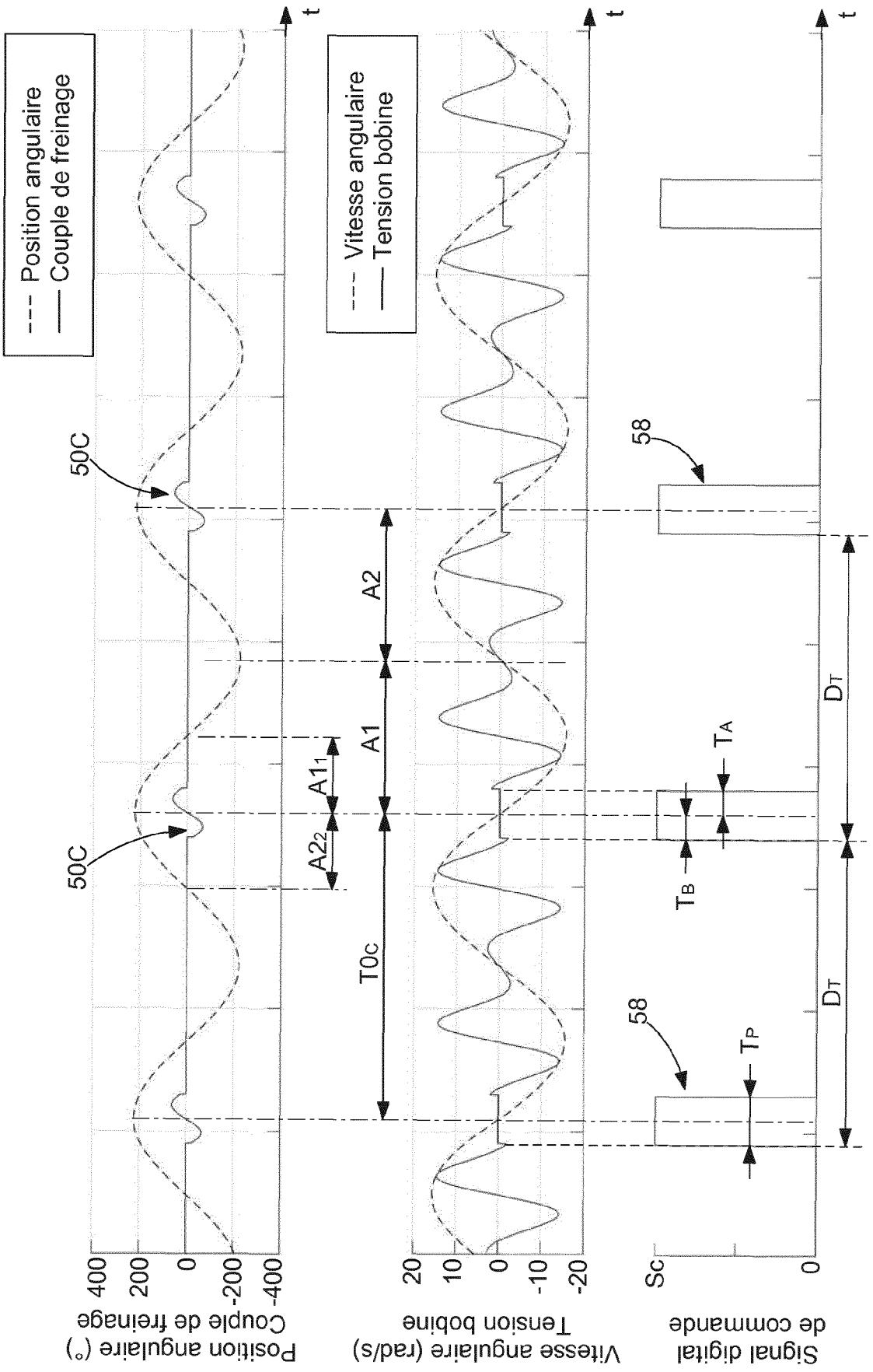

Position angulaire
Couple de freinage
Vitesse angulaire
Tension induite
t
57
58
A1
A21
A22
T0c
TA
TB
TP
DT
Sc
0
200
-200
-400
20
10
-10
-20
Position angulaire (°)
Couple de freinage
Vitesse angulaire (rad/s)
Tension bobine
Signal digital
de commande

Fig. 28C


Position angulaire
Couple de freinage
Vitesse angulaire
Tension bobine
Position angulaire (°)
Couple de freinage
Vitesse angulaire (rad/s)
Tension bobine
Signal digital de commande
400
200
0
-200
-400
20
10
0
-10
-20
Sc
0
t
50C
58
A2
A1
A11
A22
T0C
TA
TB
TP
DT

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

# RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 18 19 2469

## DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

| Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | Revendication concernée | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC) |
|---|---|---|---|
| A | FR 2 162 404 A1 (DIXI SA)<br>20 juillet 1973 (1973-07-20)<br>* figures 5-9 *<br>* page 2, lignes 15-25 *<br>* page 3, ligne 10 - page 4, ligne 35 * | 1-13 | INV.<br>G04C3/04 |
| A | US 2005/036405 A1 (BORN JEAN-JACQUES [CH] ET AL) 17 février 2005 (2005-02-17)<br>* alinéas [0026] - [0034] *<br>* alinéas [0038] - [0044] * | 1-13 | |
| A | FR 2 210 787 A1 (EBAUCHES SA [CH])<br>12 juillet 1974 (1974-07-12)<br>* le document en entier * | 1 | |
| A | CH 709 279 A2 (SWATCH GROUP RES & DEV LTD [CH]) 28 août 2015 (2015-08-28)<br>* abrégé *<br>* alinéa [0076]; figure 8 * | 1 | |

DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)

G04C

Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications

| Lieu de la recherche | Date d'achèvement de la recherche | Examinateur |
|---|---|---|
| La Haye | 8 février 2019 | Pirozzi, Giuseppe |

CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons

& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

## ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO. EP 18 19 2469

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits members sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

08-02-2019

| Document brevet cité au rapport de recherche | Date de publication | Membre(s) de la famille de brevet(s) | Date de publication |
|---|---|---|---|
| FR 2162404 A1 | 20-07-1973 | CH 568597 B5 | 31-10-1975 |
| | | CH 1801671 A4 | 30-05-1975 |
| | | DE 2258963 A1 | 20-06-1973 |
| | | FR 2162404 A1 | 20-07-1973 |
| | | GB 1378826 A | 27-12-1974 |
| | | JP S4866466 A | 12-09-1973 |
| US 2005036405 A1 | 17-02-2005 | AT 363675 T | 15-06-2007 |
| | | CN 1603981 A | 06-04-2005 |
| | | DE 60314142 T2 | 24-01-2008 |
| | | EP 1521141 A1 | 06-04-2005 |
| | | HK 1075299 A1 | 18-12-2009 |
| | | JP 4722445 B2 | 13-07-2011 |
| | | JP 2005106830 A | 21-04-2005 |
| | | SG 110187 A1 | 28-04-2005 |
| | | US 2005036405 A1 | 17-02-2005 |
| FR 2210787 A1 | 12-07-1974 | CH 594201 B5 | 30-12-1977 |
| | | CH 1810272 A4 | 28-02-1977 |
| | | DE 2362379 A1 | 11-07-1974 |
| | | FR 2210787 A1 | 12-07-1974 |
| | | GB 1442414 A | 14-07-1976 |
| | | JP S4998280 A | 17-09-1974 |
| | | US 3877215 A | 15-04-1975 |
| CH 709279 A2 | 28-08-2015 | AUCUN | |

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

## RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

*Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.*

### Documents brevets cités dans la description


- CH 597636 **[0003]**