



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:  
**29.04.2020 Bulletin 2020/18**

(51) Int Cl.:  
**H05H 7/20 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **19205154.8**

(22) Date de dépôt: **24.10.2019**

(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**

• **Université de Caen Normandie**  
**14000 Caen (FR)**

(72) Inventeurs:

- **VASSAL, Adrien**  
**38054 GRENOBLE Cedex 09 (FR)**
- **BONNAY, Patrick**  
**38054 GRENOBLE Cedex 09 (FR)**
- **BONNE, François**  
**38054 GRENOBLE Cedex 09 (FR)**
- **GHRIBI, Adnan**  
**14000 CAEN (FR)**

(30) Priorité: **24.10.2018 FR 1859806**

(71) Demandeurs:

- **Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives**  
**75015 Paris (FR)**
- **CNRS**  
**75794 Paris Cedex 16 (FR)**

(74) Mandataire: **Novaimo**

**Europa 1**  
**362, avenue Marie Curie**  
**Archamps Technopole**  
**74166 Saint Julien-en-Genois Cedex (FR)**

(54) **PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION D'UN FACTEUR QUALITÉ D'UNE CAVITÉ ACCÉLÉRATRICE D'UN ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES**

(57) Procédé de détermination d'un facteur qualité (QO) d'une cavité supraconductrice (4) accélératrice d'un accélérateur de particules (1), notamment d'un accélérateur de particules de type linéaire, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- une détermination d'une charge thermique (Q<sub>dynam</sub>) à laquelle est soumise un cryomodule (3) comprenant la cavité (4) accélératrice et un bain de fluide cryogénique (5), puis
- une détermination d'un facteur qualité (QO) basée sur la détermination de la charge thermique (Q<sub>dynam</sub>) au cours du fonctionnement de l'accélérateur de particules.

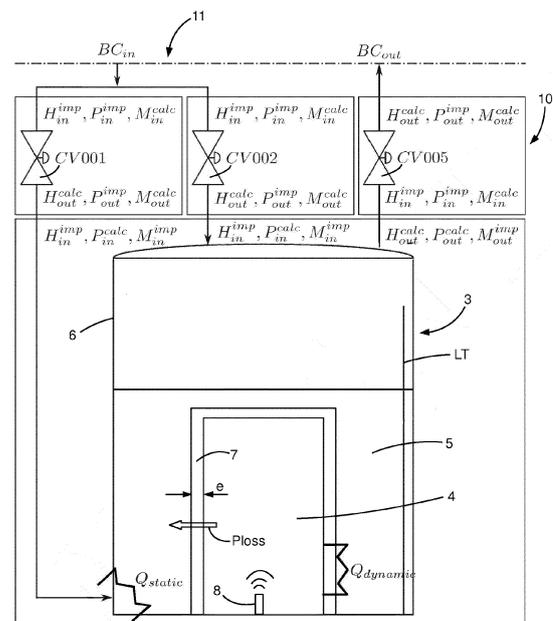


Fig.2

**Description****Domaine technique de l'invention**

5 **[0001]** L'invention se rapporte à un procédé de détermination d'un facteur qualité d'une cavité accélératrice d'un accélérateur de particules, notamment un accélérateur de particules linéaire. L'invention se rapporte également à un procédé de fonctionnement d'un accélérateur de particules. L'invention se rapporte en outre à un dispositif de détermination d'un facteur qualité et à un accélérateur de particules comprenant un tel dispositif.

10 **Etat de la technique**

**[0002]** Au sein des accélérateurs de particules, notamment les accélérateurs de particules linéaires, des cavités accélératrices supraconductrices, dites cavités RF, réalisent l'accélération de particules. Ces cavités sont fabriquées à partir d'un matériau supraconducteur à très basse température, comme le niobium, et sont plongées dans un volume de fluide cryogénique, comme notamment de l'hélium. Les performances d'une cavité accélératrice, et notamment la puissance maximale admissible de la cavité sont fonction de son facteur qualité. Ce facteur est directement lié à l'état de surface et à la géométrie de la cavité. Dans certaines conditions, la cavité peut perdre son état supraconducteur, ce qui déclenche un phénomène dénommé « quench » conduisant à un arrêt complet du faisceau dans l'accélérateur de particules. La dégradation du facteur qualité dégrade également la capacité accélératrice de la cavité concernée.

20 **[0003]** Actuellement, la mesure du facteur qualité est réalisée à l'aide d'une sonde mesurant un champ électromagnétique dans la cavité. Cette mesure est effectuée lorsque l'accélérateur est à l'arrêt, généralement avant le démarrage de l'installation ou lors de périodes de maintenance. Notamment, le document « Improvement of the Q-factor measurement in RF cavities » de Wencan Xu, S. Belomestnykh, and H. Hahn (BNL Technical Note, BNL-98894-(Ipac 13) :2489-2491, 2013) décrit une telle méthode. Cependant il est impossible d'utiliser cette méthode de mesure lorsque l'accélérateur de particules est en marche.

**Objet de l'invention**

30 **[0004]** Le but de l'invention est de fournir un procédé de détermination d'un facteur qualité d'une cavité accélératrice d'un accélérateur de particules remédiant aux inconvénients ci-dessus et améliorant les dispositifs et procédés connus de l'état de l'art antérieur. En particulier, l'invention permet de réaliser une mesure continue du facteur qualité. La mesure obtenue a l'avantage d'être réalisable lorsque l'accélérateur est en marche. Par ailleurs, la détermination du facteur qualité selon l'invention peut permettre une détection de la détérioration de la cavité

35 **[0005]** L'invention se rapporte à un procédé de détermination d'un facteur qualité d'une cavité supraconductrice accélératrice d'un accélérateur de particules, notamment d'un accélérateur de particules de type linéaire, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- une détermination d'une charge thermique à laquelle est soumise un cryomodule comprenant la cavité accélératrice et un bain de fluide cryogénique, puis
- 40 - une détermination d'un facteur qualité basée sur la détermination de la charge thermique au cours du fonctionnement de l'accélérateur de particules.

**[0006]** Les étapes de détermination de la charge thermique et de détermination du facteur qualité peuvent être réalisées simultanément et en temps réel. L'étape de détermination de la charge thermique peut comprendre l'utilisation d'un observateur d'état.

**[0007]** L'observateur d'état peut comprendre une estimation d'un débit massique de fluide cryogénique traversant une vanne du cryomodule sous la forme

$$50 \quad \dot{m} = \beta_T \cdot \dot{m}_{comp} + (1 - \beta_T) \cdot \dot{m}_{incomp}$$

dans laquelle :

55  $\dot{m}_{comp}$  désigne un débit massique de fluide cryogénique sous forme compressible au travers de la vanne,  $\dot{m}_{incomp}$  désigne le débit massique de fluide cryogénique sous forme incompressible au travers de la vanne, et  $\beta_T$  désigne un coefficient de compressibilité isotherme du fluide cryogénique.

**[0008]** L'observateur d'état peut comprendre une estimation d'une masse volumique et d'une énergie interne spécifique

du bain de fluide cryogénique.

**[0009]** Ladite estimation peut être réalisée à partir :

- 5 - d'un volume de fluide cryogénique à l'état liquide calculé à partir d'une mesure d'une hauteur du fluide cryogénique à l'état liquide et/ou calculé à partir d'une mesure de la quantité de fluide cryogénique entrant et sortant du bain de fluide cryogénique ; et
- d'une charge thermique statique et d'une charge thermique dynamique reçues par le bain de fluide cryogénique ; et
- 10 - d'une enthalpie spécifique d'entrée et de sortie du bain cryogénique basée sur une mesure de la pression du bain de fluide cryogénique, ou
- d'une température de sortie du bain de fluide cryogénique basée sur une mesure de la pression du bain de fluide cryogénique et du titre massique d'entrée du bain de fluide cryogénique.

**[0010]** L'invention se rapporte également à un procédé de fonctionnement d'un accélérateur de particules, notamment d'un accélérateur de particules de type linéaire, comprenant au moins une cavité accélératrice, le procédé de fonctionnement comprenant la mise en œuvre du procédé de détermination d'un facteur qualité d'au moins une cavité accélératrice tel que défini précédemment et une étape de modification d'au moins un paramètre de fonctionnement de ladite cavité accélératrice en fonction de son facteur qualité.

**[0011]** Ledit paramètre de fonctionnement peut être une valeur de commande de puissance d'une onde radiofréquence émise dans la cavité accélératrice, et l'étape de modification peut comprendre une réduction de la valeur de la commande de puissance si le facteur qualité de l'au moins une cavité accélératrice franchit un seuil prédéterminé, les autres cavités de l'accélérateur de particules, lorsqu'elles existent, pouvant continuer à fonctionner.

**[0012]** L'invention se rapporte également à un dispositif de détermination d'un facteur qualité d'au moins une cavité accélératrice d'un accélérateur de particules, le dispositif de détermination comprenant des éléments matériels et/ou logiciels mettant en œuvre le procédé tel que défini précédemment, notamment des éléments matériels et/ou logiciels conçus pour mettre en œuvre le procédé tel que défini précédemment.

**[0013]** L'invention se rapporte également à un accélérateur de particules, notamment accélérateur de particules de type linéaire, comprenant au moins un dispositif de détermination tel que défini précédemment. L'accélérateur de particules peut comprendre au moins un cryomodule comprenant une cavité accélératrice ou plusieurs cavités accélératrices et un bain d'un fluide cryogénique.

**[0014]** L'invention se rapporte également à un produit programme pour ordinateur comprenant des instructions de code de programme enregistrées sur un support lisible par un ordinateur pour mettre en œuvre les étapes du procédé tel que défini précédemment lorsque ledit programme fonctionne sur un ordinateur ou produit programme pour ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support de données lisible par un ordinateur et/ou exécutable par un ordinateur comprenant des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre le procédé tel que défini précédemment.

**[0015]** L'invention se rapporte également à un support d'enregistrement de données, lisible par un ordinateur, sur lequel est enregistré un programme pour ordinateur comprenant des instructions de code de programme de mise en œuvre du procédé tel que défini précédemment ou support d'enregistrement lisible par un ordinateur comprenant des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre le procédé tel que défini précédemment.

### Description sommaire des dessins

#### **[0016]**

45 La figure 1 est une vue schématique d'un accélérateur de particules selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 2 est une vue schématique d'un système cryogénique équipé d'un cryomodule.

50 La figure 3 est une vue schématique d'une connexion entre une interface homme machine, un automate programmable industriel et des capteurs du système cryogénique.

Les figures 4A, 4B, 4C et 4D sont des vues schématiques de différentes configurations alternatives d'un système cryogénique.

55 La figure 5 est une vue schématique d'un système cryogénique équipé d'un moyen de régulation.

La figure 6 est une vue schématique de différentes étapes d'un procédé de détermination d'un facteur qualité selon

un mode de réalisation de l'invention.

La figure 7 est une vue schématique d'une modélisation thermodynamique du cryomodule.

5 Les figures 8A, 8B et 8C sont des graphiques illustrant la précision d'un modèle thermodynamique selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 9 est une vue schématique d'un observateur de charge thermique du cryomodule.

10 La figure 10 est une vue schématique d'une modélisation d'un débit traversant une vanne du système cryogénique.

Les figures 11A et 11B sont des graphiques illustrant la précision d'une estimation d'une charge dynamique appliquée au cryomodule.

15 Les figures 12A, 12B et 12C sont des tables de propriété de l'hélium.

### Description d'un mode de réalisation

#### *Description du dispositif*

20 [0017] La figure 1 illustre schématiquement un accélérateur de particules 1 linéaire comprenant un tube 2 longitudinal apte à véhiculer des particules, et deux cryomodules 3, 3' agencés en série le long du tube 2 longitudinal. L'accélérateur de particules 1 pourrait comprendre encore davantage de cryomodules. Chaque cryomodule 3, 3' comprend au moins une cavité 4 accélératrice et un bain de fluide cryogénique 5. Le bain de fluide cryogénique 5 est contenu dans une  
25 enceinte 6 enveloppant la cavité 4 accélératrice. Le bain de fluide cryogénique 5, maintenu à une température de l'ordre de 4K, a pour vocation de maintenir la température de la cavité en dessous de sa température critique, notamment en dessous de 9,2K. Comme visible sur la figure 1, un premier type de cryomodule 3 comprend une unique cavité 4 accélératrice et un deuxième type de cryomodule 3' comprend deux cavités 4 accélératrices. En variante, d'autres types de cryomodules pourraient comprendre un nombre quelconque de cavités et un accélérateur de particule pourrait  
30 comprendre un agencement quelconque de cryomodules. Le cryomodule peut être équipé d'un système de refroidissement périphérique (non représenté), dit bouclier thermique, permettant de maintenir son enveloppe externe à une température donnée, par exemple à une température de 70K.

[0018] En référence à la figure 2, on précise la conception d'un cryomodule 3 équipé d'une unique cavité 4. Une cavité 4 accélératrice comprend des parois 7 fabriquées par exemple en niobium, en alliage de niobium avec du titane, ou  
35 encore en tout autre matériau adapté pour la fabrication de parois de cavités accélératrices supraconductrices. Les parois 7 possèdent une épaisseur  $e$  donnée. Le niobium est un matériau supraconducteur lorsqu'il est maintenu à une température inférieure à 9,2K. La cavité 4 comprend également une antenne radiofréquence 8 apte à émettre des ondes électromagnétiques pour accélérer les particules traversant la cavité 4. Un vide parfait ou quasi parfait règne à l'intérieur de la cavité 4. Le fluide cryogénique 5 dans lequel la cavité 4 est immergée est avantageusement de l'hélium bouillant se présentant en partie à l'état liquide et en partie à l'état gazeux. De même, d'autres compositions chimiques pourraient  
40 être envisagées pour constituer le fluide cryogénique 5.

[0019] L'hélium à l'état liquide est plus dense que l'hélium à l'état gazeux. Par gravité l'hélium à l'état liquide occupe donc un volume inférieur de l'enceinte 6 du cryomodule 3 tandis que l'hélium à l'état gazeux occupe un volume supérieur de l'enceinte. Le bain d'hélium se comporte donc comme un séparateur de phase, c'est-à-dire un bain dans lequel se  
45 produit un équilibre entre l'état gazeux et l'état liquide d'un même fluide en fonction des conditions de pression et de température. Dans la suite du document on utilisera donc indifféremment le terme « séparateur de phase » pour désigner le bain d'hélium contenu dans le cryomodule 3. Le cryomodule est équipé d'un capteur de niveau LT, apte à mesurer la hauteur d'hélium sous forme liquide au sein de l'enceinte du cryomodule.

[0020] Le séparateur de phase est sujet à une charge thermique qui peut être décomposée en deux parties. D'une part le séparateur de phase est soumis à une charge thermique statique  $Q_{\text{static}}$ , mesurable, due aux échanges thermiques par conduction, convection et radiation entre l'environnement externe du cryomodule à une température ambiante (soit environ 300K) et le fluide cryogénique à une température de 4K. D'autre part, le séparateur de phase est soumis à une charge thermique dynamique  $Q_{\text{dynam}}$  due à la puissance du champ électromagnétique dans la cavité et/ou par le passage des particules dans la cavité. Cette charge dynamique sera déterminée (autrement dit estimée, simulée ou calculée)  
55 conformément à la description qui sera donnée ultérieurement. D'un point de vue thermodynamique, la cavité 4 n'a pas d'autre effet qu'un apport de chaleur supplémentaire sur le bain d'hélium.

[0021] La charge thermique peut être l'image de la puissance radiofréquence injectée dans la cavité mais pas seulement. Elle peut être l'image de la dégradation du vide d'isolation, d'émission électronique de basse énergie au niveau

d'un coupleur radiofréquence ou dans la cavité, de l'émission de champs ou de perte en ligne du faisceau.

**[0022]** Le modèle thermodynamique d'un cryomodule 3' équipé de deux cavités 4 accélératrices est équivalent au modèle thermodynamique d'un cryomodule 3 équipé d'une unique cavité 4 accélératrice. Seuls trois paramètres de ces modèles diffèrent : le volume de l'enceinte  $V_{ol}$  contenant le fluide cryogénique, la charge thermique statique  $Q_{static}$  et la charge thermique dynamique  $Q_{dynam}$  agissant sur le fluide cryogénique 5. L'invention sera détaillée sur l'exemple d'un cryomodule équipé d'une unique cavité accélératrice. L'homme du métier pourra transposer ces enseignements à un cryomodule comprenant deux ou plus de cavités accélératrices.

**[0023]** Un système cryogénique 10 comprend le cryomodule 3 ainsi que trois vannes CV001, CV002, CV005, permettant de relier le cryomodule 3 à un circuit de distribution 11 d'hélium. Une première vanne CV001 est une vannée d'entrée d'hélium et est reliée à une partie inférieure du bain d'hélium, en un point où l'hélium est sous forme liquide (une fois la température de l'hélium abaissée à sa température de fonctionnement). Une deuxième vanne CV002 est également une vannée d'entrée d'hélium et est reliée à une partie supérieure du bain d'hélium, en un point où l'hélium est sous forme gazeuse. Une troisième vanne CV005 est une vanne de sortie d'hélium et est reliée à la partie supérieure du bain d'hélium, en un point où l'hélium est sous forme gazeuse. La première vanne CV001 peut être utilisée lors du remplissage en hélium de l'enceinte du cryomodule. Le système cryogénique 10 pourrait ne pas comprendre cette première vanne CV001 si le remplissage en hélium peut être obtenu de manière différente. La première vanne CV001 n'est pas utilisée pour une fonction de régulation. La deuxième vanne CV002 peut être utilisée pour réguler le niveau d'hélium dans l'enceinte du cryomodule. La troisième vanne CV005 peut être utilisée pour réguler la pression dans l'enceinte du cryomodule. La première et la deuxième vanne CV001, CV002, dites vannes d'alimentation, sont connectées à une ligne d'alimentation en hélium diphasique. La troisième vanne CV005, dite vanne d'échappement, est connectée à une ligne de retour. Ces lignes ne sont pas représentées sur la figure 2 mais sont remplacées par les conditions aux limites en entrée  $BC_{in}$  et les conditions aux limites en sortie  $BC_{out}$ . Les conditions aux limites en entrée  $BC_{in}$  sont données par la pression  $P_{in}$  et l'enthalpie  $H_{in}$  en entrée des vannes d'alimentation CV001 et CV002. Les conditions aux limites en sortie  $BC_{out}$  sont données par la pression  $P_{out}$  en sortie de la vanne d'échappement CV005. L'ouverture de chaque vanne peut être ajustée pour faire varier progressivement le débit d'hélium la traversant. La position de chacune de ces vannes, c'est-à-dire son pourcentage d'ouverture, peut être relevée manuellement ou automatiquement.

**[0024]** Un triplet de variables est associé à chaque entrée ou sortie de l'ensemble des composants : la pression interne  $P$  (exprimée en bars absolus), l'enthalpie spécifique  $H$  (exprimée en J/kg) et le débit massique  $\dot{m}$  (exprimée en kg/s) représenté par «  $M$  » sur la figure 2. On définit ainsi localement les caractéristiques physiques de l'hélium. Ces variables représentent les données échangées entre les différents éléments constituant le modèle. L'indice associé à chacune des variables indique s'il s'agit de l'entrée (« in ») ou de la sortie (« out ») du modèle. L'exposant définit si la variable est calculée (« calc ») ou bien imposée par un composant voisin (« imp »).

**[0025]** Le système cryogénique comprend également un capteur de pression PT d'hélium (illustré sur les figures 4A à 4D). Ce capteur peut être par exemple positionné en amont de la troisième vanne CV005, c'est-à-dire entre la troisième vanne et le bain d'hélium. Le capteur de pression PT et le capteur de niveau LT d'hélium liquide sont aptes à réaliser des mesures en continu, c'est-à-dire qu'ils fournissent un signal fluctuant en fonction de l'évolution de la pression dans le bain d'hélium et de la hauteur d'hélium liquide. En référence à la figure 3, ils sont connectés à un automate programmable industriel API. Cet automate peut être avantageusement lui-même connecté à une interface homme machine IHM, telle qu'un ordinateur ou tout autre moyen d'affichage destiné à un utilisateur. Si l'automate met en œuvre le procédé de détermination selon l'invention, l'interface homme machine IHM sert uniquement à afficher le résultat. Les capteurs de pression PT et de niveau LT, l'automate programmable industriel API et l'interface homme machine IHM (lorsqu'il y a une) font partie d'un dispositif de détermination 9 du facteur qualité  $Q_0$ .

**[0026]** Il existe deux moyens de mettre en œuvre la méthode d'estimation du facteur qualité : soit les calculs sont effectués sur l'automate programmable industriel API et le résultat est communiqué à l'interface homme machine IHM, soit l'automate transmet les données des capteurs PT, LT à l'interface homme machine IHM et c'est cette dernière qui réalise les calculs. L'automate programmable industriel API et/ou l'interface homme machine IHM sont des calculateurs et comprennent des moyens de mise en œuvre de la méthode d'estimation du facteur qualité, notamment une mémoire et une unité de calcul. Il est préconisé de privilégier la première option puisqu'elle permet d'éviter des éventuels bugs pouvant survenir sur une interface homme machine (un automate programmable étant conçu pour minimiser le risque de bug). Dans la suite de la description on supposera donc la méthode mise en œuvre par l'automate programmable industriel API.

**[0027]** Les différentes vannes et capteurs du système cryogénique sont reliés à un ou plusieurs contrôleurs CTRL aptes à réguler la pression d'hélium et le niveau d'hélium liquide à l'intérieur du cryomodule en agissant sur les vannes CV002 et CV005. En référence aux figures 4A, 4B, 4C et 4D, quatre structures de contrôle possibles sont proposées.

**[0028]** La figure 4A illustre un contrôle centralisé : un unique contrôleur CTRL est apte à agir sur les deux vannes CV002 et CV005.

**[0029]** La figure 4B illustre un contrôle décentralisé de l'ouverture de la deuxième vanne CV002 et de la troisième vanne CV005 : il consiste à utiliser deux contrôleurs CTRL distincts et à découpler totalement les deux régulations de

niveau et de pression.

**[0030]** La figure 4C illustre un contrôle distribué : il fonctionne sur le même principe que le contrôle décentralisé mais avec une interaction entre les deux contrôleurs CTRL de niveau et de pression.

**[0031]** La figure 4D illustre un contrôle hiérarchisé : un coordinateur Coord pilote deux contrôleurs CTRL distincts et assure la stabilité du système cryogénique.

**[0032]** Les structures de contrôle CTRL et Coord utilisent l'estimation de la charge thermique agissant sur le bain d'hélium pour améliorer la stabilité globale du système, ce que nous allons détailler par la suite.

**[0033]** La figure 5 illustre un système cryogénique 10 équipé d'un moyen de régulation 12 de la puissance émise par l'antenne radiofréquence en fonction de l'estimation du facteur qualité Q0.

#### Description du procédé

**[0034]** Nous allons à présent décrire un mode d'exécution du procédé de détermination d'un facteur qualité Q0 d'une cavité au travers de six étapes E1 à E6 réalisées successivement. Comme présenté sur la figure 6, les étapes E1 à E5 conduisent à estimer une charge thermique  $Q_{\text{dynam}}$  agissant sur le cryomodule. Cette estimation est réalisée à l'aide d'un observateur d'état s'appuyant sur un modèle thermodynamique et thermohydraulique du cryomodule. Puis, l'étape E6 conduit à estimer la valeur du facteur qualité Q0 sur la base de la charge thermique  $Q_{\text{dynam}}$ .

**[0035]** Le procédé est réalisé en temps réel, c'est-à-dire que les estimations de la charge dynamique  $Q_{\text{dynam}}$  et du facteur qualité Q0 sont calculées instantanément et renouvelées de manière constante. Par « temps réel », on comprend que les étapes de détermination sont exécutées à une vitesse adaptée à l'évolution de la charge dynamique  $Q_{\text{dynam}}$  et du facteur qualité Q0. Par exemple, de nouvelles valeurs de charge dynamique  $Q_{\text{dynam}}$  et du facteur qualité Q0 peuvent être calculées à une fréquence supérieure ou égale à 1 Hz, voire supérieure ou égale à 10 Hz, voire même supérieure ou égale à 1kHz. De plus, le procédé peut être réalisé alors que la cavité est en cours de fonctionnement, c'est à dire alors que l'accélérateur de particules est justement utilisé pour accélérer des particules, notamment à des fins expérimentales. Le procédé n'est pas nécessairement mis en œuvre au cours d'une manipulation dédiée à la mesure du facteur qualité. Le procédé peut donc être mis en œuvre parallèlement à une expérience durant laquelle tous les systèmes de l'accélérateur sont en fonctionnement. L'estimation peut également être renouvelée lorsqu'un capteur du système cryogénique enregistre une variation significative.

**[0036]** Lorsque la description ne le précise pas, l'unité physique associée à une grandeur physique donnée est une unité du système internationale.

**[0037]** Dans une première étape E1, on détermine des caractéristiques du séparateur de phase et des vannes de régulation. Ces caractéristiques dépendent directement de la conception du cryomodule et des vannes. Elles peuvent être mesurées ou calculées. Ces caractéristiques sont :

- le volume Vol de l'enceinte contenant le fluide cryogénique,
- la charge thermique statique Qstatic supportée par le fluide cryogénique, c'est-à-dire l'énergie transmise au cryomodule par les transferts thermiques avec l'extérieur du cryomodule,
- la fonction f1 définissant la hauteur d'hélium liquide h en fonction du volume d'hélium liquide Vliq dans l'enceinte :  $h = f1(Vliq)$ . Cette fonction dépend de la géométrie de l'enceinte contenant le fluide cryogénique. Elle peut être calculée au moyen d'un modèle numérique de cette enceinte ou être définie empiriquement.

**[0038]** Pour la deuxième vanne CV002 et la troisième vanne CV005, ces caractéristiques sont :

- Le coefficient de débit CV de chaque vanne, c'est-à-dire le coefficient exprimant le débit d'un fluide qui traverse une vanne, à une température donnée, et qui provoque une chute de pression donnée.
- La rangeabilité Rv de chaque vanne, c'est-à-dire le rapport des débits maximal et minimal entre lesquels la caractéristique d'une vanne est maintenue dans certaines limites de précision.

**[0039]** Dans une deuxième étape E2, on réalise une modélisation thermodynamique du cryomodule. Une telle modélisation est illustrée de manière macroscopique sur la figure 7. La modélisation thermodynamique du cryomodule permet de lier par des équations des conditions aux limites  $BC_{in}$ ,  $BC_{out}$ , la position des trois vannes  $POS_{CV001}$ ,  $POS_{CV002}$ ,  $POS_{CV005}$ , la charge statique  $Q_{\text{static}}$ , la charge dynamique  $Q_{\text{dynam}}$ , la hauteur h d'hélium liquide dans l'enceinte, et la pression interne P dans l'enceinte 6. La modélisation peut être décomposée en trois sous-étapes E21, E22, E23.

**[0040]** Dans une première sous-étape E21 on établit une modélisation des vannes. Cette première sous étape E21 permet de définir la quantité d'hélium entrant  $\dot{m}_{in}$  dans l'enceinte et la quantité d'hélium sortant  $\dot{m}_{out}$  de l'enceinte en fonction des conditions aux limites  $BC_{in}$ ,  $BC_{out}$  et de la position des trois vannes  $POS_{CV001}$ ,  $POS_{CV002}$ , et  $POS_{CV005}$ , ainsi que de la pression dans le cryomodule.

**[0041]** Dans une deuxième sous-étape E22 on établit un modèle énergétique d'un séparateur de phase. Cette deuxiè-

EP 3 644 692 A1

me sous-étape permet de définir la masse volumique de l'hélium  $\rho$  (exprimée en kg/m<sup>3</sup>) et l'énergie interne spécifique  $u$  (exprimé en J/kg) de l'hélium contenue dans le cryomodule en fonction de la quantité d'hélium entrant dans l'enceinte  $\dot{m}_{in}$  et la quantité d'hélium sortant de l'enceinte  $\dot{m}_{out}$ , de la charge statique  $Q_{static}$ , et de la charge dynamique  $Q_{dynam}$ , ainsi que de l'enthalpie spécifique d'entrée et de sortie du cryomodule  $H_{in}$  et  $H_{out}$  ou de la température de sortie du cryomodule et du titre massique d'entrée du cryomodule.

**[0042]** Dans une troisième sous-étape E23 on établit une modélisation des propriétés physiques du bain d'hélium. Cette troisième sous-étape permet de définir la hauteur  $h$  d'hélium liquide dans l'enceinte, et la pression interne  $P$  dans l'enceinte en fonction de la masse volumique de l'hélium  $\rho$  et de l'énergie spécifique  $u$  de l'hélium.

**[0043]** Nous allons à présent détailler chacune des modélisations établies lors de ces trois sous-étapes.

**[0044]** La première sous-étape E21 permet d'établir une modélisation des vannes. On détaille la méthode sur l'exemple d'une vanne particulière quelconque parmi les trois vannes CV001, CV002, CV005. Tout d'abord, on considère que la détente se produisant dans la vanne est isenthalpique, c'est-à-dire sans apport d'énergie extérieure. Ainsi, l'enthalpie de l'hélium en amont de la vanne est identique à l'enthalpie en aval de la vanne, soit :  $H_{out} = H_{in}$ . On considère également que la vanne n'accumule pas de fluide. Ainsi, on peut également écrire l'équation  $\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in}$ . Selon le standard ANSI/ISA-75.01.01, le débit d'un fluide compressible au travers d'une vanne s'écrit selon la formule F2 suivante :

$$\dot{m}_{comp} = K \cdot CV \cdot \left(1 - \frac{X}{3 \cdot X_C}\right) \sqrt{\rho_{in} \cdot P_{in} \cdot X}$$

Dans laquelle :

$$X = \min\left(\frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}}, X_C\right)$$

$$X_C = \frac{\gamma}{1.4} \cdot X_t$$

$$X_t = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}}$$

Avec :

- $K$  un coefficient de conversion entre le système d'unité anglo-saxon et le système d'unité international ( $K = 7.59 \cdot 10^{-3}$ ).
- $\rho_{in}$  la masse volumique de l'hélium (exprimée en kg/m<sup>3</sup>) en amont de la vanne. Cette masse volumique pouvant être interpolée à partir d'une table de propriété de l'hélium en connaissant la pression et l'enthalpie en amont de la vanne.
- $P_{in}$  la pression en amont de la vanne (exprimée en Pa).
- $P_{out}$  la pression en aval de la vanne (exprimée en Pa).
- $\gamma$ , le rapport des chaleurs spécifiques (sans unité), défini comme le rapport de la chaleur spécifique à pression constante  $C_p$  (exprimée en J/(kg.K)) sur la chaleur spécifique à volume constant  $C_v$  (exprimée en J/(kg.K)) de

l'hélium, soit :  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ . Ce rapport peut être interpolé à partir d'une table de propriété de l'hélium en connaissant la pression et l'enthalpie en amont de la vanne.

- $CV$  désignant le coefficient de débit de la vanne (sans unité) et pouvant être calculé par la formule :

$$CV = \frac{CV_{max}}{R_v} \cdot \left(\exp\left(\frac{open}{100} \cdot R_v\right) - \left(1 - \frac{open}{100}\right)\right)$$

dans laquelle :

- $CV_{max}$  est une constante de dimensionnement de la vanne choisie de sorte à ce que l'ouverture de la vanne soit dans une gamme de fonctionnement convenable (c'est-à-dire que pour que la vanne ne s'ouvre pas ou ne se ferme

pas à 100% lors de son utilisation.

- $R_v$  est la rangeabilité de la vanne (sans unité).
- « open » est un niveau d'ouverture de la vanne évoluant de 0, quand la vanne est complètement fermée, à 100, quand la vanne est complètement ouverte. Le niveau d'ouverture « open » représente la position respective d'ouverture de chaque vanne  $POS_{CV001}$ ,  $POS_{CV002}$ , et  $POS_{CV005}$  en pourcentage.

[0045] Par ailleurs, le débit d'un fluide incompressible au travers d'une vanne s'écrit selon la formule F3 suivante :

$$\dot{m}_{incomp} = K \cdot CV \cdot \sqrt{\rho_{in} \cdot (P_{in} - P_{out})}$$

[0046] Dans laquelle les variables ont la même signification que dans la formule F2.

[0047] On définit la compressibilité isotherme  $\beta_T$  comme un facteur de variation du volume d'un système lorsque la pression dans le système varie tandis que sa température reste constante. Ce facteur indique à quel point un fluide est compressible. Ainsi,  $\beta_T = 0$  quand le fluide est incompressible et  $\beta_T = 1$  quand le fluide est compressible. A une température donnée, le facteur  $\beta_T$  peut être calculé par la formule suivante :

$$\beta_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dP} \right)_T$$

[0048] Ce facteur est utilisé pour pondérer le débit du fluide traversant la valve selon la formule F2 ou F3 présentée ci-dessus. Ainsi le calcul du débit au travers de la vanne peut s'écrire avec la formule suivante :

$$\dot{m} = \beta_T \cdot \dot{m}_{comp} + (1 - \beta_T) \cdot \dot{m}_{incomp}$$

[0049] Nous allons à présent détailler la deuxième sous-étape E22 dans laquelle on établit le modèle énergétique du séparateur de phase. On considère par hypothèse que le bain d'hélium est à l'équilibre liquide-gaz. Par conséquent, la masse volumique  $\rho$  de l'hélium et l'énergie spécifique  $u$  de l'hélium (autrement dit sa densité massique d'énergie) sont réparties de façon uniforme dans l'enceinte.

[0050] Tout d'abord, on établit une relation physique entre la masse totale d'hélium  $m_{tot}$  dans le bain du cryomodule, sa masse volumique  $\rho$  et le volume de l'enceinte  $Vol$  contenant l'hélium avec l'équation physique suivante :

$$m_{tot} = \rho \cdot Vol$$

[0051] Cette formule peut être dérivée de manière à s'écrire :

$$\dot{m}_{tot} = \dot{\rho} \cdot Vol$$

[0052] Ensuite, un bilan massique du cryomodule permet de lier la masse totale  $m_{tot}$  d'hélium à l'intérieur de l'enceinte, la masse entrante  $m_{in}$  d'hélium et la masse sortante  $m_{out}$  d'hélium par l'équation suivante :

$$\dot{m}_{tot} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

[0053] La relation liant l'énergie totale  $U$  emmagasinée par l'hélium, l'énergie spécifique  $u$  de l'hélium et la masse totale d'hélium  $m_{tot}$  s'écrit :

$$U = m_{tot} \cdot u$$

[0054] Cette formule peut être dérivée de manière à s'écrire selon la formule suivante :

$$\dot{U} = \dot{m}_{tot} \cdot u + m_{tot} \cdot \dot{u}$$

[0055] Enfin, un bilan énergétique appliqué au bain d'hélium s'écrit avec la formule suivante :

$$\dot{U} = \dot{m}_{tot} \cdot u + H_{in} \cdot \dot{m}_{in} - H_{out} \cdot \dot{m}_{out} + \sum_i Q_i$$

5

[0056] Equation dans laquelle :

- $\sum_i Q_i$  désigne l'ensemble des charges thermiques agissant sur le bain d'hélium, c'est-à-dire :  $\sum_i Q_i = Q_{static} + Q_{dynam}$ .
- $H_{in}$  désigne l'enthalpie de l'hélium entrant dans l'enceinte du séparateur de phase.
- $H_{out}$  désigne l'enthalpie de l'hélium sortant de l'enceinte du séparateur de phase.

10

[0057] En combinant les équations précitées, on obtient une équation du modèle thermodynamique du cryomodule :

$$\dot{u} = \frac{H_{in} \cdot \dot{m}_{in} - H_{out} \cdot \dot{m}_{out} + \sum_i Q_i}{\rho \cdot Vol} - u \cdot \frac{\dot{\rho}}{\rho}$$

15

[0058] Enfin, nous détaillons à présent la troisième sous-étape E23 permettant de définir la hauteur h d'hélium liquide dans l'enceinte, et la pression interne P dans l'enceinte en fonction de la masse volumique  $\rho$  de l'hélium et de l'énergie spécifique u de l'hélium.

20

[0059] La pression interne P dans l'enceinte du cryomodule peut être directement déterminée en fonction de la masse volumique  $\rho$  de l'hélium et de son énergie spécifique u en exploitant les propriétés physiques de l'hélium. A cette fin, une fonction d'interpolation intégrée à un logiciel de calcul tel que Hepak© et/ou une librairie C++ telle que « CoolProp » pourront avantageusement être utilisés. A titre d'exemple, une première table de propriété de l'hélium est illustrée à la figure 12A. Sur cette figure, la masse volumique  $\rho$  de l'hélium est représentée en ordonnée et exprimée en kg/m<sup>3</sup>. L'énergie spécifique u est représentée en abscisse et exprimée en 10<sup>5</sup>.J/kg. Les dix courbes X1 à X10 sont obtenues pour dix niveaux de pression interne P de 50 mPa à 5000 mPa.

25

[0060] Grâce à une deuxième table de propriété de l'hélium, on peut également déterminer le titre massique X de l'hélium en fonction de la masse volumique  $\rho$  de l'hélium et de son énergie spécifique u. Cette deuxième table est représentée à titre d'exemple sur la figure 12B. Le titre massique X est représenté sur l'axe vertical Z. La masse volumique  $\rho$  de l'hélium représentée sur un premier axe horizontal Xh1 et exprimée en kg/m<sup>3</sup>. L'énergie spécifique u est représentée sur un deuxième axe horizontal Xh2 et exprimée en 10<sup>4</sup>.J/kg. Par définition, le titre massique X de l'hélium vérifie la formule suivante :

30

$$m_{liq} = m_{tot}(1 - X)$$

[0061] Formule dans laquelle  $m_{liq}$  désigne la masse d'hélium liquide dans l'enceinte et  $m_{tot}$  la masse totale d'hélium.

35

[0062] Le volume d'hélium sous forme liquide  $V_{liq}$  est défini par l'équation :

$$V_{liq} = \frac{m_{liq}}{\rho_{liq}}$$

40

dans laquelle  $\rho_{liq}$  désigne la masse volumique de l'hélium liquide.

[0063] Enfin, grâce à une troisième table de propriété de l'hélium, illustrée à titre d'exemple sur la figure 12C, et en considérant que l'hélium est à l'état de liquide saturé, on peut également déterminer la masse volumique de l'hélium liquide  $\rho_{liq}$  (en ordonnée) en fonction de pression interne P (en abscisse). Sur cette figure, la masse volumique de l'hélium liquide  $\rho_{liq}$  est exprimée en kg/m<sup>3</sup> et la pression interne P est exprimée en 10<sup>5</sup>.Pa. En remarque, on appelle liquide saturée, un liquide dont la température et la pression sont telles qu'à température constante, toute perte de pression même la plus infime entrainerait l'ébullition du liquide. Finalement, on détermine le volume d'hélium sous forme liquide  $V_{liq}$ , puis on calcule la hauteur h d'hélium liquide en utilisant la fonction  $f_1$  définie précédemment.

45

[0064] Finalement, grâce aux trois sous-étapes E21, E22, E23 précédemment décrites, on obtient une modélisation thermodynamique du cryomodule. liant par des équations les conditions aux limites  $BC_{in}$ ,  $BC_{out}$ , la position des trois vannes  $POS_{CV001}$ ,  $POS_{CV002}$ ,  $POS_{CV005}$ , la charge statique  $Q_{static}$ , la charge dynamique  $Q_{dynam}$ , la hauteur d'hélium liquide dans l'enceinte h, et la pression dans l'enceinte P.

50

[0065] La précision de la modélisation thermodynamique du cryomodule peut être vérifiée en comparant la hauteur

$h_{mes}$  d'hélium liquide mesurée avec la hauteur  $h_{calc}$  d'hélium liquide estimée par la modélisation, et de même en comparant la pression  $P_{mes}$  dans l'enceinte mesurée avec la pression  $P_{calc}$  estimée par la modélisation, lorsqu'on fait varier l'ouverture des vannes CV002 et CV005. Aux fins de cette vérification, la charge thermique dynamique  $Q_{dynam}$  pourra être maintenue à une valeur nulle et la vanne CV001 maintenue fermée. La figure 8A illustre un graphique de l'ouverture des vannes CV002 et CV005 en fonction du temps (la valeur de 100% désignant une vanne complètement ouverte). La figure 8B illustre l'évolution au cours du temps de la hauteur d'hélium liquide mesurée  $h_{mes}$  et estimée  $h_{calc}$ . Les deux courbes en pointillé représentent le calcul d'une incertitude. Plus précisément, les deux courbes en pointillés représentent la hauteur d'hélium liquide estimée avec une ouverture des vannes augmentée de 2%, et respectivement diminuée de 2%. On constate que la hauteur  $h_{calc}$  d'hélium liquide calculée ne s'éloigne pas de plus de quelques pourcents de la hauteur  $h_{mes}$  d'hélium liquide mesurée. De même, la figure 8C illustre l'évolution au cours du temps de la pression d'hélium mesurée  $P_{mes}$  et estimée  $P_{calc}$ . Les deux courbes en pointillé représentent également le calcul d'une incertitude obtenue en simulant une ouverture des vannes augmentée de 2%, et respectivement diminuée de 2%. On constate que la pression  $P_{calc}$  d'hélium simulée ne s'éloigne pas de plus de quelques millibars de la pression d'hélium mesurée  $P_{mes}$ . Cette vérification permet donc de valider la précision du modèle thermodynamique établi.

**[0066]** Dans une troisième étape E3, on enregistre différents paramètres du système cryogénique dans la mémoire de l'automate programmable industriel API. En particulier, on enregistre la pression interne P fournie par le capteur de pression PT. On enregistre la hauteur h d'hélium liquide dans l'enceinte fournie par le capteur de niveau LT. On enregistre également les conditions aux limites, à savoir :

- la pression  $P_{in}$  d'hélium en amont des vannes d'admission CV001, CV002,
- la pression  $P_{out}$  d'hélium en aval de la vanne de sortie CV005.
- L'enthalpie spécifique d'entrée de la vanne d'alimentation :  $H_{in}$ .

**[0067]** Les conditions aux limites sont dépendantes du circuit de distribution 11 d'hélium et peuvent être mesurées et/ou calculées au moyen de capteurs adaptés positionnés dans le circuit de distribution 11. En variante, et pour simplifier les calculs, les conditions aux limites pourraient être considérées comme des constantes. Une telle simplification conduirait néanmoins à une estimation de la charge dynamique moins précise.

**[0068]** La modélisation thermodynamique du cryomodule obtenue à l'issue de la deuxième étape E2 comprend des équations complexes à résoudre. Afin de faciliter la résolution de ces équations, l'invention prévoit dans une quatrième étape E4 une linéarisation du modèle thermodynamique, c'est-à-dire une approximation du modèle thermodynamique par un jeu d'équations différentielles linéaires autour d'un point de fonctionnement prédéterminé.

**[0069]** Dans une première sous-étape E41, on définit un point de fonctionnement autour duquel le modèle va être linéarisé. Ce point de fonctionnement peut être déterminé en fonction des contraintes que doit respecter le cryomodule. Par exemple, on peut définir le point de fonctionnement par une pression interne P du bain d'hélium égale à 1200mBar et une hauteur d'hélium liquide égale à 90% de la hauteur totale de l'enceinte.

**[0070]** Dans une deuxième sous-étape E42, on définit les conditions aux limites du système  $BC_{in}$  et  $BC_{out}$  et on cherche les valeurs d'ouverture des vannes  $POS_{CV001}$ ,  $POS_{CV002}$ ,  $POS_{CV005}$  qui permettent au modèle de se stabiliser au point de fonctionnement préalablement défini. La valeur de d'ouverture de la première vanne  $POS_{CV001}$  peut être fixée à 0% (c'est-à-dire complètement fermée) car cette vanne n'est utile qu'au remplissage de l'enceinte. Deux régulateurs de type PID, c'est-à-dire de type à action « Proportionnelle - Intégrale - Dérivée » peuvent être utilisés pour déterminer les valeurs d'ouvertures des deux autres vannes  $POS_{CV002}$ ,  $POS_{CV005}$ . Lors de cette étape, l'antenne radiofréquence peut, ou non, être activée en fonction du point de fonctionnement autour duquel on souhaite linéariser le modèle thermodynamique.

**[0071]** Dans une troisième sous-étape E43, on représente le modèle thermodynamique comme un système dynamique linéaire. Le système linéaire est défini par la représentation d'état suivante :

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix}$$

$$y = C \cdot x + D \cdot \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix}$$

Avec :

- A, B, C et D des matrices d'état du système,
- v désignant un vecteur d'entrées commandables et défini par :

EP 3 644 692 A1

$$v = \begin{pmatrix} \dot{m}_{in} \\ \dot{m}_{out} \end{pmatrix}$$

5  $\dot{m}_{in}$  désignant le débit massique entrant dans le cryomodule.  
 $\dot{m}_{out}$  désignant le débit massique sortant du cryomodule.

- w désignant un vecteur d'entrées non commandables et défini par :

10

$$w = \begin{pmatrix} Q_{static} \\ Q_{dynam} \\ H_{in} \end{pmatrix}$$

15

$Q_{static}$  désignant la charge statique,  $Q_{dynam}$  désignant la charge dynamique et  $H_{in}$  désignant l'enthalpie au sein du cryomodule.

- x désignant un vecteur d'état, celui-ci étant égal au vecteur de sortie y et étant défini par :

20

$$x = y = \begin{pmatrix} u \\ \rho \end{pmatrix}$$

25 où p désigne la masse volumique de l'hélium et u son énergie interne spécifique.

**[0072]** Ce système linéaire décrit les dynamiques du procédé autour du point de fonctionnement défini à la sous-étape E41 et défini par :

30

$$v_0 = \begin{pmatrix} \dot{m}_{in}(nom) \\ \dot{m}_{out}(nom) \end{pmatrix}$$

35

$$w_0 = \begin{pmatrix} Q_{static}(nom) \\ Q_{dynam}(nom) \\ H_{in}(nom) \end{pmatrix}$$

40

$$x_0 = y_0 = \begin{pmatrix} u(nom) \\ \rho(nom) \end{pmatrix}$$

**[0073]** Grace au modèle thermodynamique préalablement établi lors de la deuxième étape E2, on peut déterminer les valeurs des matrices d'état du système A, B, C et D. À cet effet on peut utiliser une fonction linéarisation d'un outil de calcul telle que la fonction « linearize » de Matlab®. En pratique, comme  $x = y$ , la matrice d'état C est égale à une matrice unitaire et la matrice d'état D est égale à une matrice nulle. Le système linéaire ainsi obtenu décrit le comportement thermodynamique du cryomodule autour du point de fonctionnement défini à la sous-étape E41.

45

**[0074]** Dans une cinquième étape E5, on met en place un observateur OBS de charge thermique tel qu'illustré sur la figure 8. Les entrées du modèle sont la hauteur h d'hélium liquide, la pression interne P du bain d'hélium, la pression d'hélium  $P_{out}$  en aval de la vanne de sortie CV005, la pression d'hélium  $P_{in}$  en amont des vannes d'entrée CV001 et CV002, la position des trois vannes  $POS_{CV001}$ ,  $POS_{CV002}$ ,  $POS_{CV005}$ , l'enthalpie de l'hélium en amont des vannes d'entrée  $H_{in}$ . Toutes ces entrées sont mesurées à l'exception de  $H_{in}$ , valeur estimée à partir de deux capteurs situés en amont du cryomodule.

50

**[0075]** Dans une première sous-étape E51, on filtre les signaux fournis par les capteurs de sorte à réduire leur bruit. Un filtrage du premier ordre de la forme suivante peut être utilisé :

55

$$H(p) = \frac{1}{1 + \tau_{\text{filtre}} \cdot p}$$

[0076] Dans lequel  $\tau_{\text{filtre}}$  est une constante de temps du filtre, choisie en fonction d'une constante de temps  $\tau_{\text{procédé}}$  du procédé, telle que :

$$\tau_{\text{filtre}} \ll 5 \cdot \tau_{\text{procédé}}$$

[0077] Dans une deuxième sous-étape E52, on calcule la masse volumique  $\rho$  et l'énergie interne  $u$  du bain d'hélium à partir du niveau d'hélium liquide  $h$  et de la pression interne  $P$  dans l'enceinte. Dans un premier temps, le volume d'hélium liquide  $V_{\text{liq}}$  est calculé à partir de la mesure du niveau selon la formule  $V_{\text{liq}} = f_1(h)$  dans laquelle  $f_1$  est la fonction donnant le volume d'hélium liquide  $V_{\text{liq}}$  en fonction de la hauteur indiquée par le capteur de niveau LT. A partir du volume d'hélium liquide il est possible de déduire le titre massique  $X$  du fluide contenu dans le cryomodule en utilisant la formule :

$$X = \frac{m_{\text{gaz}}}{m_{\text{gaz}} + m_{\text{liq}}} = \frac{\rho_{\text{gaz}} \cdot V_{\text{gaz}}}{\rho_{\text{gaz}} \cdot V_{\text{gaz}} + \rho_{\text{liq}} \cdot V_{\text{liq}}}$$

[0078] Dans laquelle  $m_{\text{gaz}}$ ,  $\rho_{\text{gaz}}$ ,  $V_{\text{gaz}}$  désignent respectivement la masse, la masse volumique et le volume d'hélium sous forme gazeuse et  $m_{\text{liq}}$ ,  $\rho_{\text{liq}}$ ,  $V_{\text{liq}}$  désignent respectivement la masse, la masse volumique et le volume d'hélium sous forme liquide.

[0079] Comme expliqué précédemment, la masse volumique de l'hélium liquide  $\rho_{\text{liq}}$  peut être déterminée grâce à la troisième table de propriété de l'hélium, en fonction de pression interne  $P$  et sachant qu'il s'agit de liquide saturé.

[0080] De manière analogue, la masse volumique de l'hélium gazeux  $\rho_{\text{gaz}}$  peut être déterminée grâce à la quatrième table de propriété de l'hélium, en fonction de la pression interne  $P$  et sachant qu'il s'agit de vapeur saturée.

[0081] On peut ainsi calculer le titre massique  $X$ , puis à partir d'une cinquième et sixième table de propriété de l'hélium, en déduire respectivement la masse volumique  $\rho$  et l'énergie interne  $u$  du bain d'hélium.

[0082] Dans une troisième sous-étape E53, on calcule le débit  $\dot{m}$  traversant chacune des vannes CV001, CV002 et CV005 conformément au schéma logique illustré sur la figure 9. Ce calcul comprend une première sous étape E531 d'ajustement de la mesure de la position d'une vanne et une deuxième sous-étape E532 de calcul du débit massique au travers d'une vanne au moyen de la modélisation établie lors de la sous-étape E21.

[0083] La sous-étape E531 vise à compenser des écarts et des dérives observées entre le débit massique simulé et le débit massique observé au travers d'une vanne CV00i (i étant égale à 1, 2 ou 5 selon la vanne considérée). Afin de compenser un écart entre le débit massique simulé et le débit massique observé, on définit un offset statique  $CV00i_{\text{offset}_{\text{stat}}}$  appliqué sur la mesure de la position de la vanne i par la formule suivante :

$$CV00i_{\text{offset}_{\text{stat}}} = CV00i_{\text{pos}_{\text{mes}}}^{\text{nom}} - CV00i_{\text{pos}_{\text{sim}}}^{\text{nom}}$$

où :

-  $CV00i_{\text{pos}_{\text{mes}}}^{\text{nom}}$  désigne la valeur nominale mesurée de la position de la vanne i au point de fonctionnement défini à la sous-étape E41.

-  $CV00i_{\text{pos}_{\text{sim}}}^{\text{nom}}$  désigne la valeur nominale simulée de la position de la vanne i au point de fonctionnement défini à la sous-étape E41.

[0084] Afin de corriger une dérive du débit massique traversant la vanne, on peut également définir un offset dynamique par la formule suivante :

$$CV00i_{\text{offset}_{\text{dyn}}} = (CV00i_{\text{pos}_{\text{mes}}} - CV00i_{\text{pos}_{\text{mes}}}^{\text{nom}}) \cdot \text{gain}$$

où :

- $CV00i_{pos_{mes}}$  désigne la valeur courante, mesurée de la position de la vanne  $i$ .
- $CV00i_{pos_{mes}}^{nom}$  désigne la valeur nominale mesurée de la position de la vanne  $i$  au point de fonctionnement défini à la sous-étape E41.
- gain désigne un coefficient de proportionnalité à régler à partir des mesures faites sur le système.

**[0085]** La position corrigée  $CV00i_{pos_{corr}}$  de la vanne  $CV00i$  peut alors être obtenue par l'addition de la position mesurée, de l'offset statique et de l'offset dynamique, soit par l'équation suivante :

$$CV00i_{pos_{corr}} = CV00i_{pos_{mes}} + CV00i_{offset_{stat}} + CV00i_{offset_{dyn}}$$

**[0086]** Le bloc identifié par E531 sur la figure 10 illustre un schéma logique permettant d'implémenter la formule de calcul de  $CV00i_{pos_{corr}}$  définie ci-dessus.

**[0087]** Lors de la deuxième sous-étape E532, on utilise la modélisation établie lors de la sous-étape E21. Cette modélisation permet de calculer le débit massique au travers d'une vanne  $CV00i$  en fonction de la position corrigée  $CV00i_{pos_{corr}}$  de la vanne  $CV00i$  calculée précédemment, de la pression en amont de la vanne  $P_{in}$ , de la pression en aval de la vanne  $P_{out}$  et de l'enthalpie en amont de la vanne  $H_{in}$  (supposée identique à l'enthalpie en aval de la vanne). La sous-étape E53 est ensuite répétée pour chacune des vannes  $CV001$ ,  $CV002$  et  $CV005$  du système de manière à déterminer le débit massique traversant chacune de ces vannes en fonction de la valeur courante, mesurée  $CV00i_{pos_{mes}}$  de la position de la vanne  $i$ .

**[0088]** Dans une sous-étape E54, on implémente un observateur d'état, dit observateur de Kalman, conformément au schéma défini à la figure 8. L'observateur d'état comprend les matrices d'état A, B, C et D définies lors de la sous-étape E43. L désigne le gain de l'observateur calculé pour le système. Le bloc constitué du symbole / représente un intégrateur.

**[0089]** Le système résultant est un système linéaire invariant, pour lequel il existe un estimateur de Kalman obtenu en résolvant une équation de Riccati aux différences, par exemple en utilisant la fonction « lqr » de Matlab® avec L = lqr (A, C, Q, R) dans laquelle Q et R sont des matrices de pondération. En d'autres termes, il s'agit de trouver le gain L qui minimise le critère suivant :

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} x^T Q x + u^T R u, \text{ avec } u = -Lx$$

**[0090]** Par exemple, les matrices Q et R peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$Q = \begin{bmatrix} 1e2 & 0 \\ 0 & 1e3 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1e3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1e3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1e2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1e2 \end{bmatrix}$$

**[0091]** L'observateur d'état ainsi implémenté permet de déterminer et d'observer en temps réel la charge dynamique  $Q_{dynam}$ .

**[0092]** Avantagusement la méthode de calcul ainsi développée peut être validée au moyen d'une expérience sur un système cryogénique lorsque celui-ci comprend une cavité équipée d'un dispositif de génération de chaleur tel qu'une résistance chauffante à alimentation variable, également dénommée « chaufferette ». Une telle résistance permet de simuler un apport de chaleur identique à celui qui serait produit par le fonctionnement de la cavité dans un accélérateur de particules. La résistance chauffante délivre une chaleur équivalente à la charge thermique dynamique  $Q_{dynam}$ . La figure 11A est un graphique représentant en fonction du temps, la puissance  $Q_{ref}$  délivrée par la résistance chauffante, la charge thermique dynamique  $Q1$  calculée sans appliquer de traitement sur les non linéarités (c'est-à-dire en utilisant le modèle linéaire complet du cryomodule, intégrant la modélisation des vannes et le calcul du niveau de liquide du

### EP 3 644 692 A1

bain), et la charge thermique dynamique Q2 calculée par l'observateur d'état décrit précédemment. On observe que la puissance  $Q_{ref}$  fournie par la résistance chauffante est stable à une valeur de 47W. La valeur calculée de la charge thermique dynamique Q1 oscille autour d'une puissance de 40W environ. La valeur calculée de la charge thermique dynamique Q2 oscille autour d'une puissance de 47W environ et converge plus rapidement vers cette valeur lorsque la résistance chauffante est activée. Le régime transitoire de la charge thermique dynamique Q1 est réduit de 20 à 30 secondes en comparaison de la charge thermique dynamique Q2. La figure 11B est un graphique représentant en fonction du temps l'erreur d'estimation de la charge thermique dynamique Q1 et de la charge thermique dynamique Q2. L'erreur est plus importante pour le calcul de la charge thermique dynamique Q1 que pour le calcul de la charge thermique dynamique Q2. Cette expérience montre donc que la détermination de la charge thermique dynamique réalisée par l'observateur d'état selon l'invention est précise et fiable.

**[0093]** Dans une sixième étape E6, on calcule le facteur qualité  $Q_0$  de la cavité 4. Le facteur qualité est une mesure du taux d'amortissement d'un système oscillant. Le facteur qualité dépend de la température T de la paroi interne de la cavité, supposée uniforme, du matériau de la cavité et de sa forme géométrique. Il est défini par le rapport de l'énergie U stockée dans la cavité sur l'énergie dissipée  $P_{loss}$  dans les parois de la cavité, par période d'oscillation. Le facteur qualité peut donc être exprimé par la formule suivante :

$$Q_0(T) = \frac{\omega \cdot U}{P_{loss}}$$

**[0094]** Dans laquelle  $\omega$  désigne la pulsation de résonance de la cavité.

**[0095]** Pour calculer l'énergie U stockée dans la cavité et l'énergie dissipée  $P_{loss}$  dans les parois de la cavité, on fait les hypothèses qu'un vide parfait règne dans la cavité et que la résistivité des parois de la cavité est uniforme sur l'ensemble de leurs surfaces. Sachant que l'énergie emmagasinée dans le champ électrique est égale à l'énergie emmagasinée dans le champ magnétique, que l'énergie interne de la cavité est calculée sur le volume et que les pertes sont concentrées sur la surface de la cavité, on peut exprimer U et  $P_{loss}$  par des intégrales respectivement sur le volume de la cavité et sur la surface des parois de la cavité. U et  $P_{loss}$  peuvent donc s'exprimer selon les formules suivantes :

$$U = \frac{1}{2} \mu_0 \int_v |H|^2 dv$$

$$P_{loss} = \frac{1}{2} R_s(T) \oint_s |H|^2 ds$$

**[0096]** Formules dans lesquelles :

- $\mu_0$  désigne la perméabilité magnétique du vide,
- $R_s$  désigne la résistance de surface de la cavité et sa valeur dépend de la température de la cavité,
- H désigne le champ magnétique à l'intérieur de la cavité.

**[0097]** Ainsi, le facteur qualité  $Q_0$  peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$Q_0(T) = \frac{G}{R_s(T)}$$

**[0098]** Ou G est appelé facteur géométrique de la cavité, et est défini par :

$$G = \omega \cdot \mu_0 \frac{\int_v |H|^2 dv}{\oint_s |H|^2 ds}$$

**[0099]** Le facteur géométrique G est une donnée connue et invariante qui peut être directement calculée à partir d'un modèle radiofréquence du cryomodule. En considérant le facteur géométrique G connu, il faut encore trouver l'expression de la résistance de surface  $R_s(T)$  pour en déduire le facteur qualité. La résistance de surface  $R_s(T)$  vérifie l'équation

suivante :

$$R_S(T) = R_{BCS}(T) + R_{res}$$

5

**[0100]** Equation dans laquelle :

- $R_{res}$  désigne la résistance résiduelle du niobium,
- $R_{BCS}(T)$  est une résistance variable définie par l'équation suivante :

10

$$R_{BCS}(T) = \frac{A}{T} \cdot f^2 \cdot \exp\left(\frac{-\Delta}{k_B \cdot T}\right)$$

15

**[0101]** Equation dans laquelle :

- T désigne la température de la paroi interne de la cavité,
- A désigne une constante dépendant des propriétés du matériau utilisé pour la fabrication des parois de la cavité, notamment du niobium,
- f désigne la fréquence de résonance de la cavité,
- $\Delta$  désigne l'« energy gap » du matériau utilisé pour la fabrication des parois de la cavité,
- $k_B$  désigne la constante de Boltzmann.

20

**[0102]** Parmi tous ces paramètres, seule la température T est inconnue et sujette à des variations. Tous les autres paramètres A, f,  $\Delta$ ,  $k_B$  sont des valeurs fixes connues ou mesurables.

25

**[0103]** La température T de la paroi interne de la cavité peut justement être estimée à partir de la puissance dissipée dans la cavité et la température du bain d'hélium. En effet, la chaleur dissipée sur la surface intérieure de la cavité est transmise au bain d'hélium par conduction à travers les parois en niobium de la cavité. En considérant que la cavité cède toute sa chaleur au bain d'hélium on déduit que l'énergie dissipée  $P_{loss}$  dans les parois de la cavité est égal à la charge thermique dynamique  $Q_{dynam}$ .

30

**[0104]** Par ailleurs, une équation de conduction thermique appliquée à aux parois de la cavité s'exprime de la manière suivante :

35

$$P_{loss} = \frac{\lambda(T) \cdot S}{e} \cdot (T_{cavité} - T_{bain}) = Q_{dynam}$$

**[0105]** Equation dans laquelle :

- $\lambda(T)$  désigne la conductivité thermique du niobium,
- S désigne la surface d'échange entre la cavité et le bain d'hélium,
- e désigne l'épaisseur de la paroi de la cavité,
- $T_{cavité}$  désigne la température de la paroi interne de la cavité,
- $T_{bain}$  désigne la température du bain d'hélium.

45

**[0106]** La température du bain d'hélium  $T_{bain}$  peut être interpolée à partir d'une table de propriété de l'hélium en connaissant la pression interne P du bain d'hélium (régulée autour d'une valeur de 1200mBar) et sachant qu'il s'agit de liquide saturé.

**[0107]** En remarque, la pression interne du bain d'hélium est supposée dans cette modélisation comme uniforme. La modélisation pourrait être affinée en considérant la pression en fonction de la hauteur du point considéré dans le bain d'hélium. Il serait alors possible de définir un gradient de température dans le bain d'hélium plutôt que de considérer une température uniforme.

50

**[0108]** Finalement, comme la conductivité thermique du niobium  $\lambda(T)$ , la surface S d'échange entre la cavité et le bain d'hélium, l'épaisseur e de la paroi de la cavité sont des grandeurs connues, et, comme on dispose d'une estimation de la charge thermique dynamique  $Q_{dynam}$  fournie par l'observateur d'état, on peut calculer la température de la paroi interne de la cavité  $T_{cavité}$ . Une fois cette température déterminée, il est possible de calculer la valeur de la résistance variable  $R_{BCS}(T)$ , puis la résistance de surface  $R_S(T)$ , et enfin le facteur qualité  $Q_0$ .

55

**[0109]** Finalement, le facteur qualité  $Q_0$  peut s'exprimer par la formule suivante :

$$Q_0 = G / \left( \frac{A}{Q_{\text{dynam}} \cdot \frac{e}{\lambda(T) \cdot S} + T_{\text{bain}}} \cdot f^2 \cdot \exp \left( \frac{-\Delta}{k_B \cdot (Q_{\text{dynam}} \cdot \frac{e}{\lambda(T) \cdot S} + T_{\text{bain}})} \right) + R_{\text{res}} \right)$$

**[0110]** L'invention se rapporte également à un procédé de fonctionnement d'un accélérateur de particules comprenant la mise en œuvre du procédé de détermination du facteur qualité Q0 tel que décrit précédemment, en particulier des étapes E4 à E6 et une étape E7 de modification d'au moins un paramètre de fonctionnement de la cavité accélératrice en fonction du facteur qualité Q0. Par exemple, le paramètre de fonctionnement peut être une valeur de commande de puissance d'une onde radiofréquence émise dans la cavité par l'antenne 8. La modification peut consister en une réduction de la valeur de la commande de puissance jusqu'à l'arrêt de l'émission de l'onde radiofréquence si le facteur qualité d'au moins une cavité accélératrice franchit un seuil prédéterminé, les autres cavités de l'accélérateur, lorsqu'elles existent, pouvant continuer à fonctionner. La réduction de la valeur de la commande peut éventuellement être poursuivie jusqu'à l'arrêt de l'émission de l'onde radiofréquence. L'invention peut également être mise en œuvre lors d'une montée en puissance de l'accélérateur de particules, par exemple en augmentant progressivement la valeur de la commande en fonction du facteur qualité déterminé. La modification peut également consister en toute autre modification de la configuration et/ou du réglage de l'accélérateur de particules.

**[0111]** Concrètement, le moyen de régulation 12, intégré à l'automate de programmation industrielle API, peut par exemple comparer l'estimation du facteur qualité avec une valeur seuil. Si le facteur qualité Q0 est supérieur à un seuil prédéterminé, alors le moyen de régulation 12 peut émettre un ordre de commande à destination du système radiofréquence pour réduire la puissance des ondes émises par l'antenne 8 radiofréquence intégrée à la cavité. Le moyen de régulation 12 peut éventuellement comprendre plusieurs seuils au-delà desquels la puissance des ondes émises par l'antenne radiofréquence sera successivement réduite jusqu'à atteindre une puissance nulle. Ainsi, on peut utiliser chaque cavité à une puissance optimale compte tenu de son facteur qualité et sans impacter le fonctionnement des autres cavités de l'accélérateur de particules. De préférence, le procédé de fonctionnement comprend plusieurs itérations des étapes E4 à E7.

**[0112]** Au cours du fonctionnement, les structures de contrôle CTRL et Coord illustrées sur les figures 4A, 4B, 4C et 4D utilisent l'estimation de la charge thermique agissant sur le bain d'hélium pour réguler l'ouverture des vannes CV002 et CV005 et maintenir le cryomodule autour d'un point de fonctionnement optimal.

## Conclusion

**[0113]** Le principe de mesure illustré à travers cette invention est fondamentalement différent de la mesure classique car il s'appuie sur l'état thermique du bain de fluide cryogénique dans lequel est plongée la cavité et non sur une mesure directe du champ radiofréquence dans la cavité.

**[0114]** La charge thermique est estimée à l'aide de capteurs propres au système cryogénique, ainsi la détermination du facteur qualité Q0 ne requiert pas de sonde de pick-up, d'un analyseur de réseau ou de tout autre moyen dédié à la détermination du facteur qualité. De plus une estimation du facteur qualité au cours du fonctionnement (et non en statique) est réalisée. Cette détermination peut être réalisée en différé ou en temps réel mais toujours au cours du fonctionnement de l'accélérateur de particules, contrairement à l'art antérieur. Autrement dit, l'invention permet d'estimer le potentiel accélérateur d'une cavité accélératrice (la puissance maximale admissible) à tout instant et d'adapter en conséquence la puissance émise par l'antenne radiofréquence. Cette estimation ne nécessite aucune modification physique du système en place, c'est-à-dire qu'elle ne nécessite pas d'ajout de capteur ou autre dispositif de mesure et ne nécessite pas non plus la connaissance d'une tension appliquée à la cavité. La connaissance du facteur qualité en particulier en temps réel permet d'équilibrer à la fois le comportement cryogénique et le comportement du système radiofréquence agissant sur la cavité pour permettre un fonctionnement fiable de l'accélérateur. Le dispositif réalisé est suffisamment économe en puissance de calcul pour être implanté sur un automate programmable.

**[0115]** Le procédé selon l'invention est exécutable dès l'injection d'une puissance radiofréquence dans les cavités supraconductrices et avant même qu'il y ait un faisceau. Il est exécutable aussi avec le faisceau et permet de diagnostiquer certaines anomalies possibles qui engendreraient une charge thermique anormale dans les cavités.

## Revendications

1. Procédé de détermination d'un facteur qualité (Q0) d'une cavité supraconductrice (4) accélératrice d'un accélérateur de particules (1), notamment d'un accélérateur de particules de type linéaire, le procédé comprenant les étapes suivantes :

## EP 3 644 692 A1

- une détermination d'une charge thermique ( $Q_{\text{dynam}}$ ) à laquelle est soumise un cryomodule (3) comprenant la cavité (4) accélératrice et un bain de fluide cryogénique (5), puis
- une détermination d'un facteur qualité ( $Q_0$ ) basée sur la détermination de la charge thermique ( $Q_{\text{dynam}}$ ) au cours du fonctionnement de l'accélérateur de particules.

5

2. Procédé de détermination selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les étapes de détermination de la charge thermique ( $Q_{\text{dynam}}$ ) et de détermination du facteur qualité ( $Q_0$ ) sont réalisées simultanément et en temps réel.
3. Procédé de détermination selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** l'étape de détermination de la charge thermique comprend l'utilisation d'un observateur d'état (OBS).
4. Procédé de détermination selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** l'utilisation d'un observateur d'état (OBS) comprend une estimation d'un débit massique ( $\dot{m}$ ) de fluide cryogénique traversant une vanne du cryomodule sous la forme

15

$$\dot{m} = \beta_T \cdot \dot{m}_{\text{comp}} + (1 - \beta_T) \cdot \dot{m}_{\text{incomp}}$$

dans laquelle :

20

- $\dot{m}_{\text{comp}}$  désigne un débit massique de fluide cryogénique sous forme compressible au travers de la vanne,
- $\dot{m}_{\text{incomp}}$  désigne le débit massique de fluide cryogénique sous forme incompressible au travers de la vanne, et
- $\beta_T$  désigne un coefficient de compressibilité isotherme du fluide cryogénique.

25

5. Procédé de détermination selon la revendication 3 ou 4, **caractérisé en ce que** l'observateur d'état comprend une estimation d'une masse volumique ( $\rho$ ) et d'une énergie interne spécifique ( $u$ ) du bain de fluide cryogénique (5).
6. Procédé de détermination selon la revendication 5 **caractérisé en ce que** ladite estimation est réalisée à partir :

30

- d'un volume ( $V_{\text{liq}}$ ) de fluide cryogénique à l'état liquide calculé à partir d'une mesure d'une hauteur ( $h$ ) du fluide cryogénique à l'état liquide et/ou calculé à partir d'une mesure de la quantité de fluide cryogénique entrant et sortant du bain de fluide cryogénique (5) ; et

35

- d'une charge thermique statique ( $Q_{\text{static}}$ ) et d'une charge thermique dynamique ( $Q_{\text{dynam}}$ ) reçues par le bain de fluide cryogénique (5) ; et
- d'une enthalpie spécifique d'entrée ( $H_{\text{in}}$ ) et de sortie ( $H_{\text{out}}$ ) du bain cryogénique basée sur une mesure de la pression ( $P$ ) du bain de fluide cryogénique (5), ou d'une température de sortie du bain de fluide cryogénique (5) basée sur une mesure de la pression ( $P$ ) du bain de fluide cryogénique (5) et du titre massique ( $X$ ) d'entrée du bain de fluide cryogénique (5).

40

7. Procédé de fonctionnement d'un accélérateur de particules (1), notamment d'un accélérateur de particules de type linéaire, comprenant au moins une cavité (4) accélératrice, le procédé de fonctionnement comprenant la mise en œuvre du procédé de détermination d'un facteur qualité ( $Q_0$ ) d'au moins une cavité (4) accélératrice selon l'une des revendications précédentes et une étape de modification d'au moins un paramètre de fonctionnement de ladite cavité accélératrice en fonction de son facteur qualité ( $Q_0$ ).

45

8. Procédé de fonctionnement selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** ledit paramètre de fonctionnement est une valeur de commande de puissance d'une onde radiofréquence émise dans la cavité (4) accélératrice, et **en ce que** l'étape de modification comprend une réduction de la valeur de la commande de puissance si le facteur qualité ( $Q_0$ ) de l'au moins une cavité (4) accélératrice franchit un seuil prédéterminé, les autres cavités de l'accélérateur de particules (1), lorsqu'elles existent, pouvant continuer à fonctionner.

50

9. Dispositif de détermination (9) d'un facteur qualité ( $Q_0$ ) d'au moins une cavité (4) accélératrice d'un accélérateur de particules (1), le dispositif de détermination (9) comprenant des éléments (LT, PT, API, IHM) matériels et/ou logiciels mettant en œuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 8, notamment des éléments matériels (LT, PT, API, IHM) et/ou logiciels conçus pour mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 8.

55

10. Accélérateur de particules (1), notamment accélérateur de particules de type linéaire, comprenant au moins un dispositif de détermination (9) selon la revendication précédente.

## EP 3 644 692 A1

11. Accélérateur de particules (1) selon la revendication précédente, **caractérisé en ce qu'il** comprend au moins un cryomodule (3) comprenant une cavité (4) accélératrice ou plusieurs cavités (4) accélératrices et un bain d'un fluide cryogénique (5).

5 12. Produit programme pour ordinateur comprenant des instructions de code de programme enregistrées sur un support lisible par un ordinateur pour mettre en œuvre les étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 lorsque ledit programme fonctionne sur un ordinateur ou produit programme pour ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support de données lisible par un ordinateur et/ou exécutable par un ordinateur, caractérisé en ce en ce qu'il comprend des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.

10 13. Support d'enregistrement de données, lisible par un ordinateur (IHM, API), sur lequel est enregistré un programme pour ordinateur comprenant des instructions de code de programme de mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 8 ou support d'enregistrement lisible par un ordinateur comprenant des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.

20

25

30

35

40

45

50

55

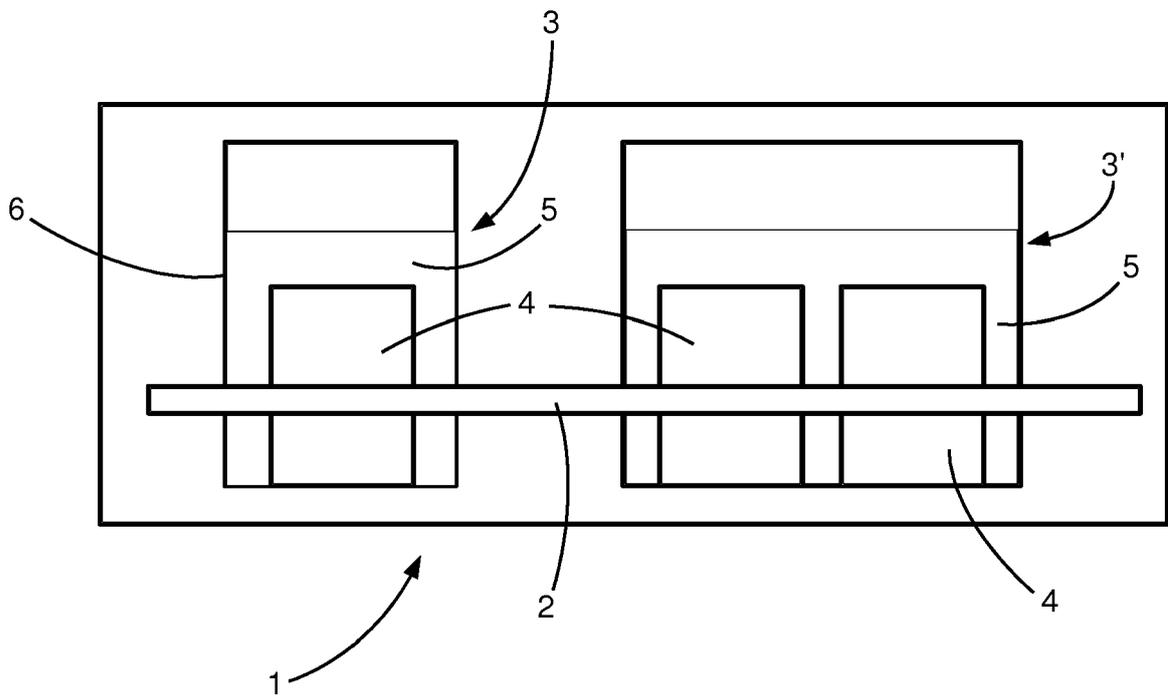


Fig.1

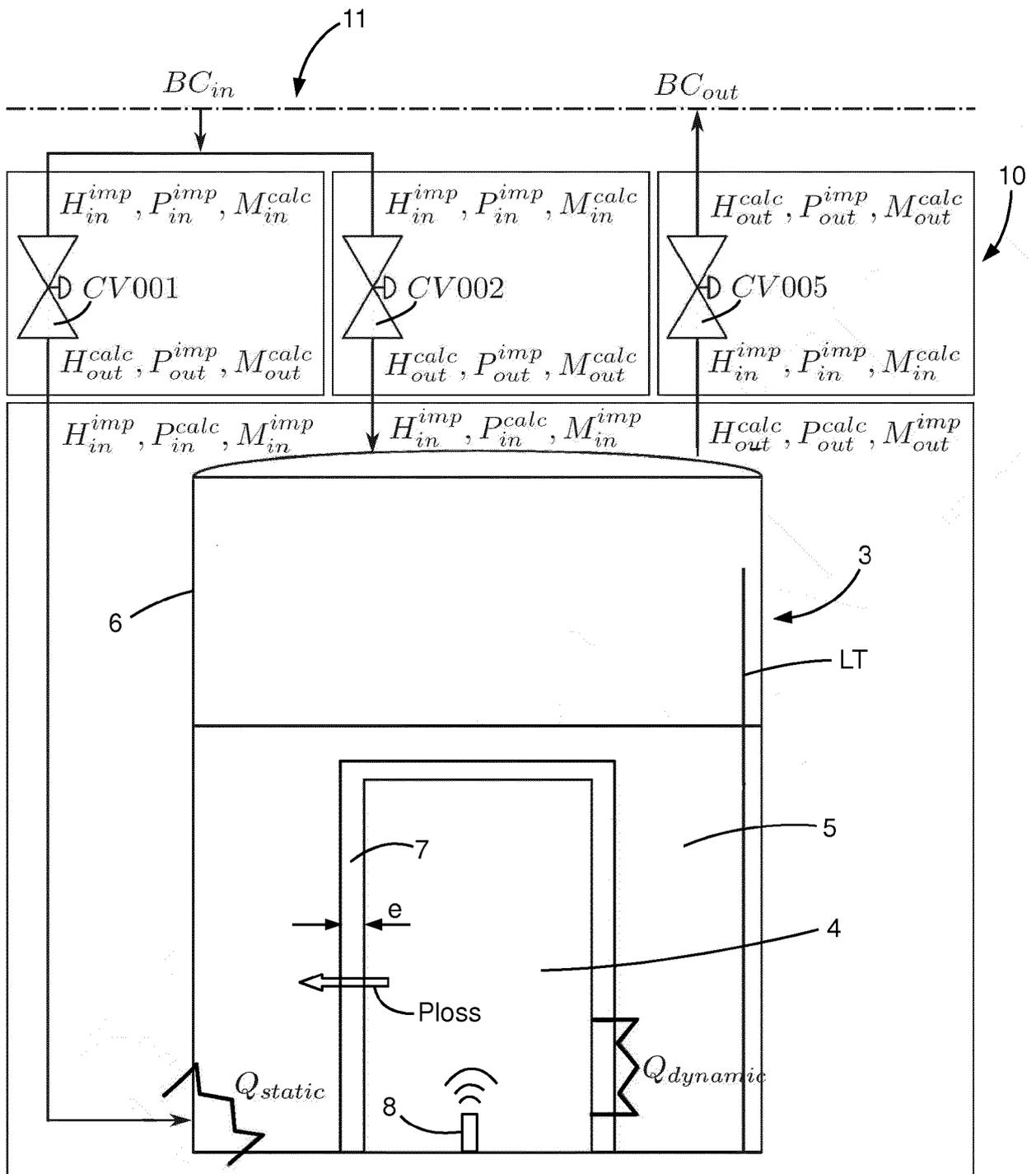


Fig.2

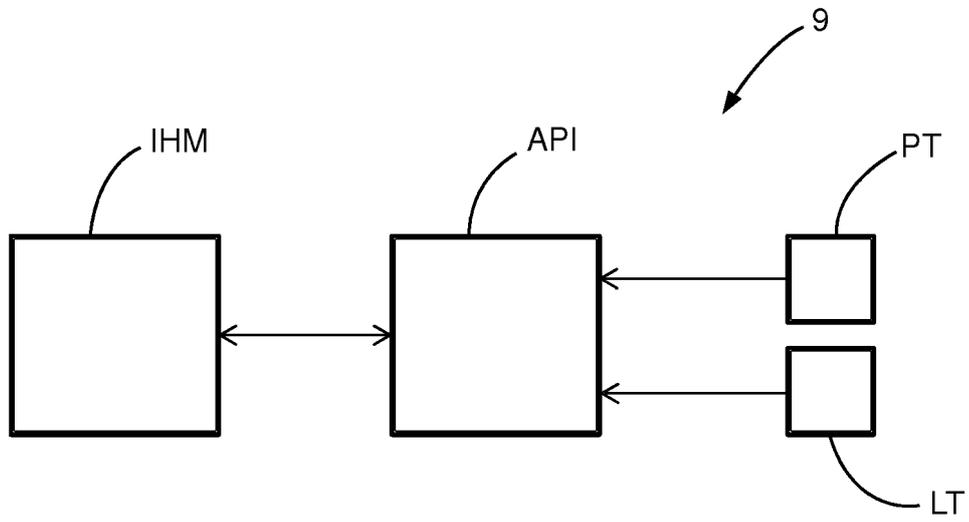


Fig.3

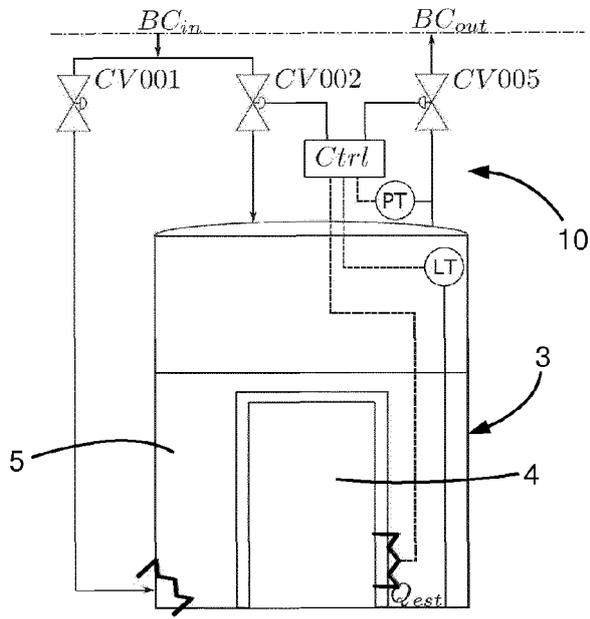


Fig.4A

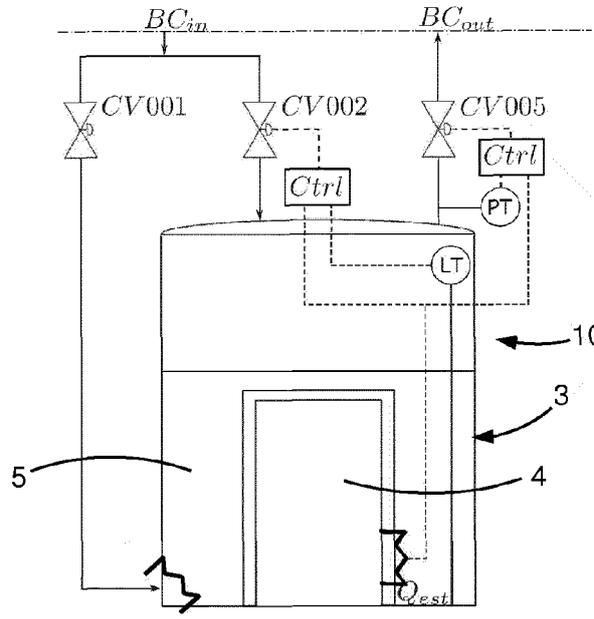


Fig.4B

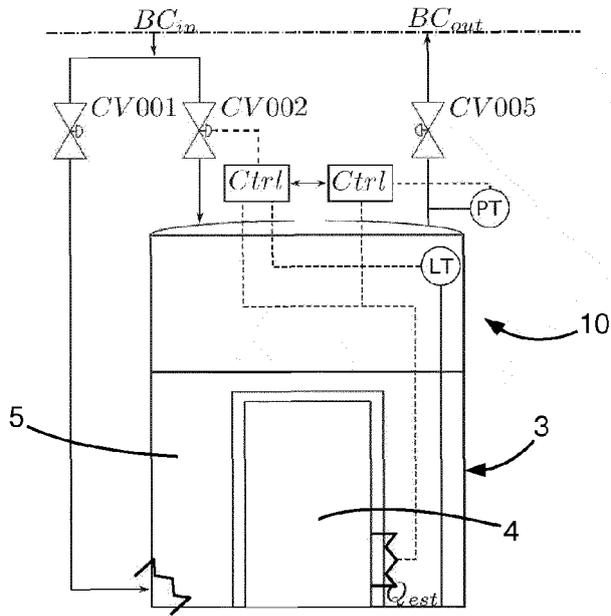


Fig.4C

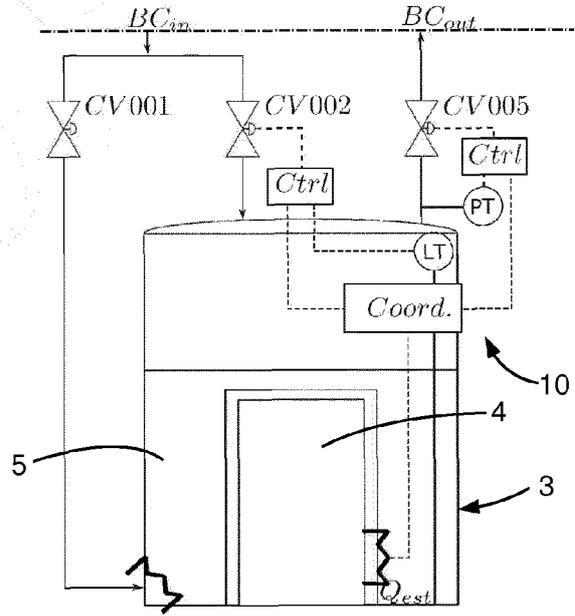


Fig.4D

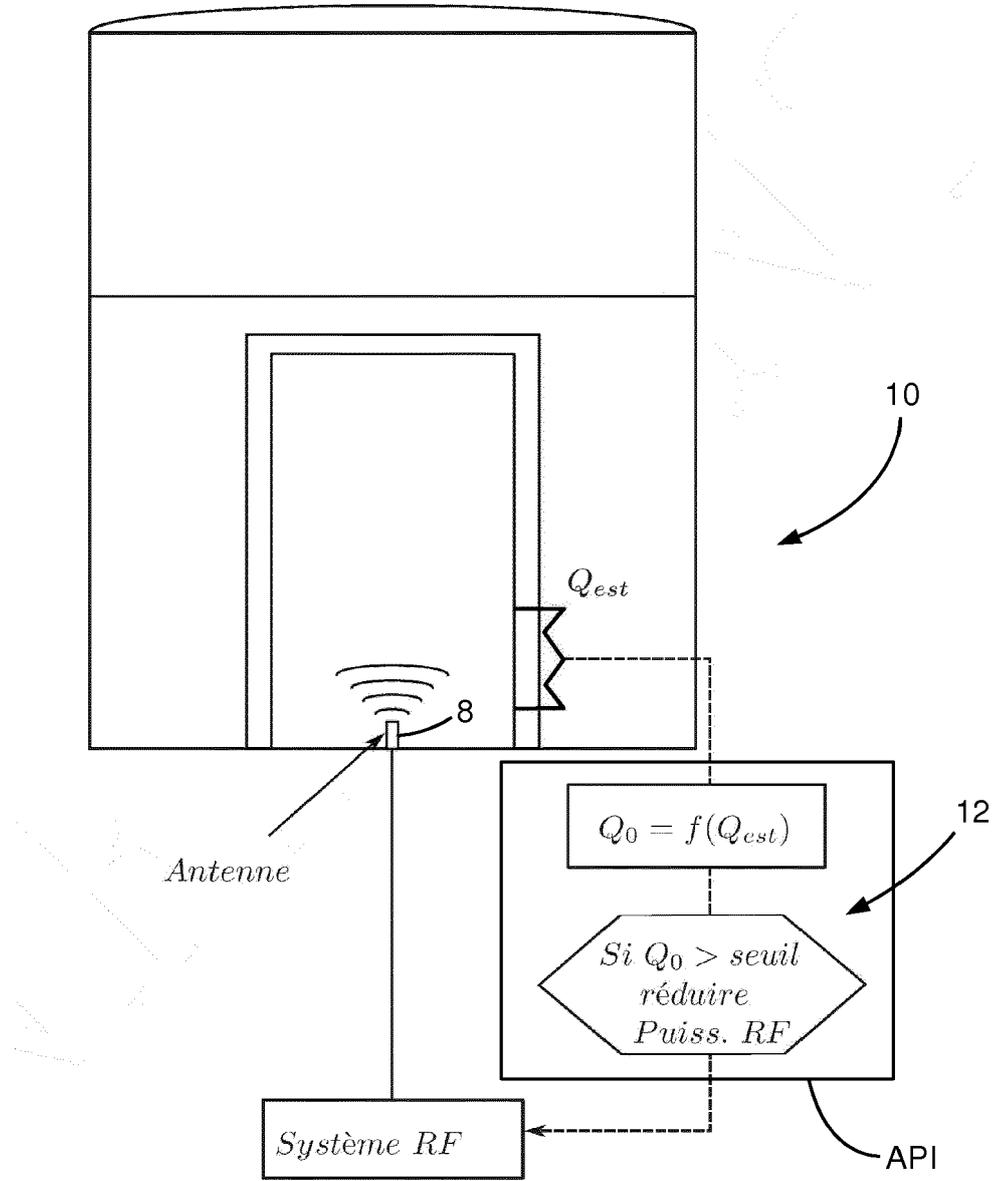


Fig.5

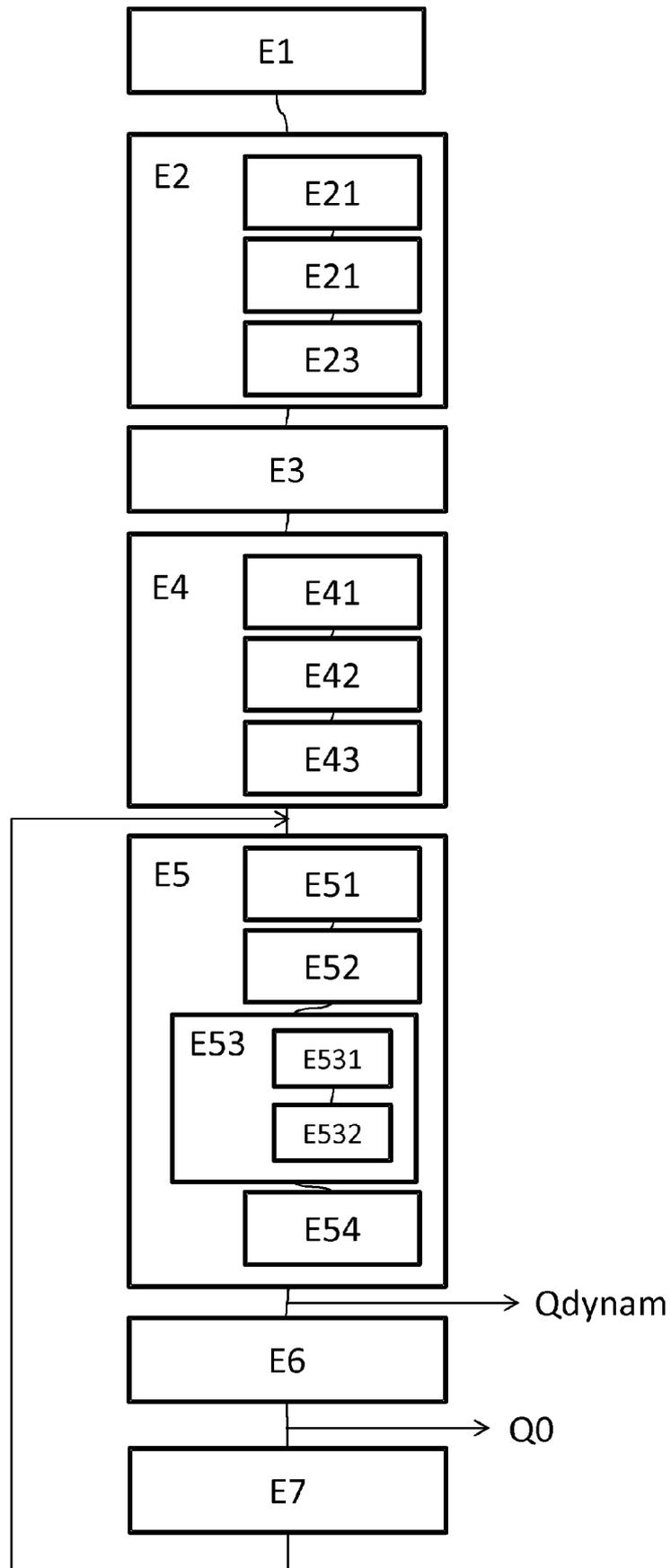
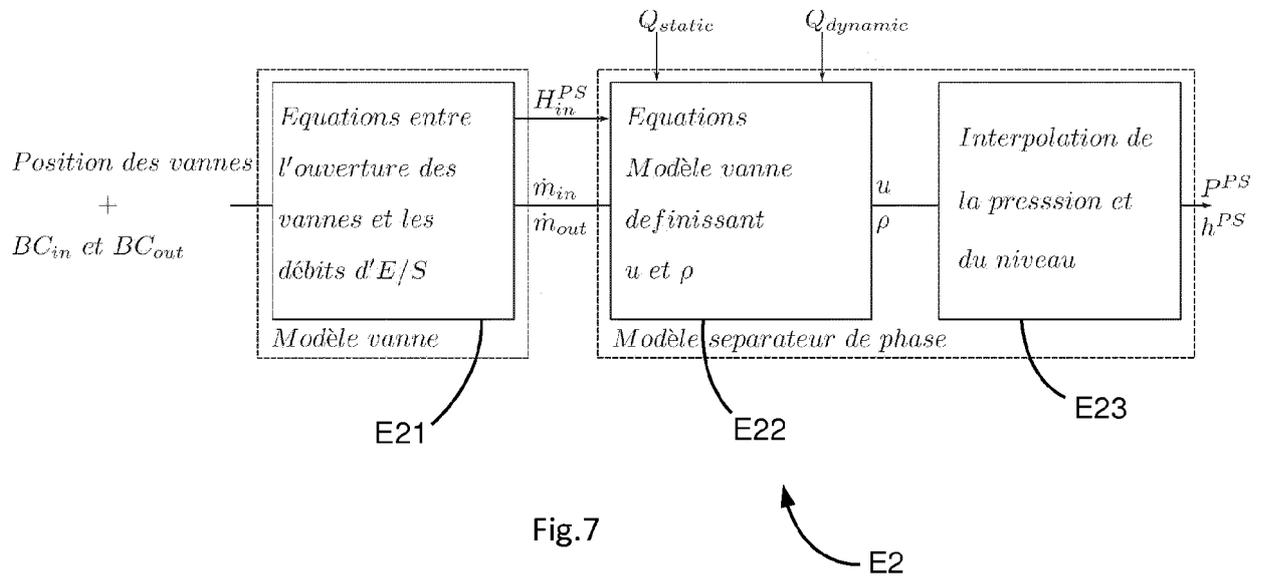


Fig.6



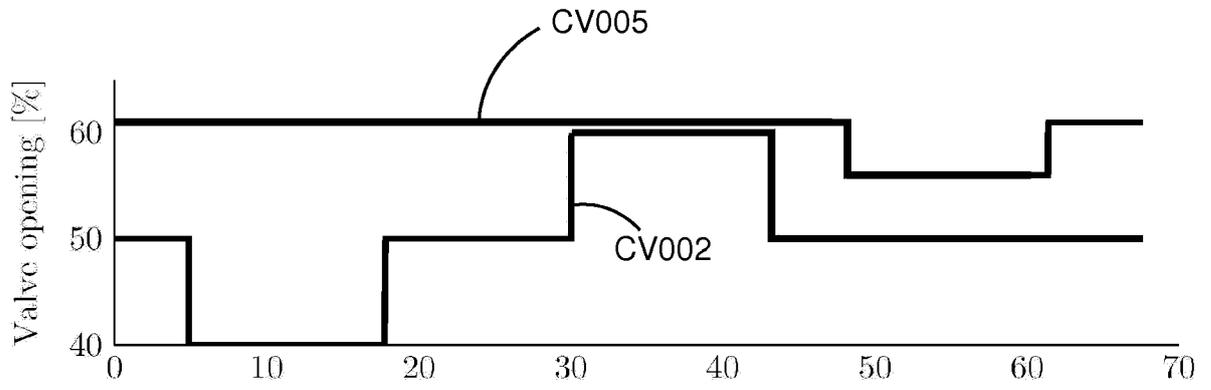


Fig.8A

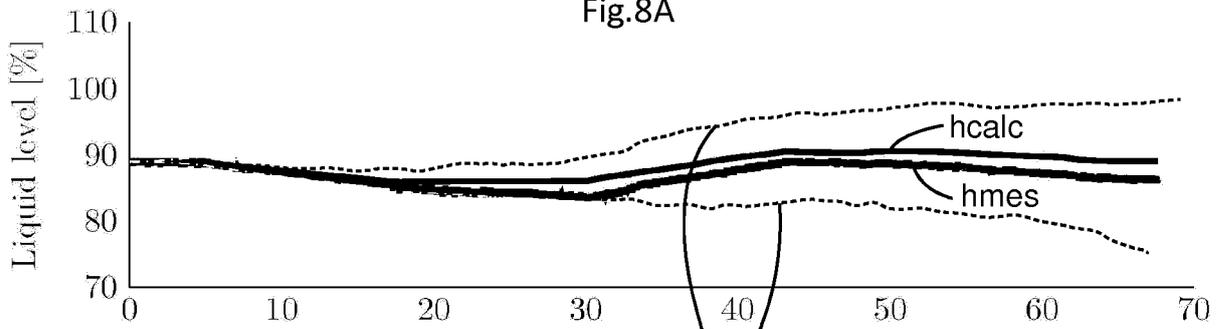


Fig.8B

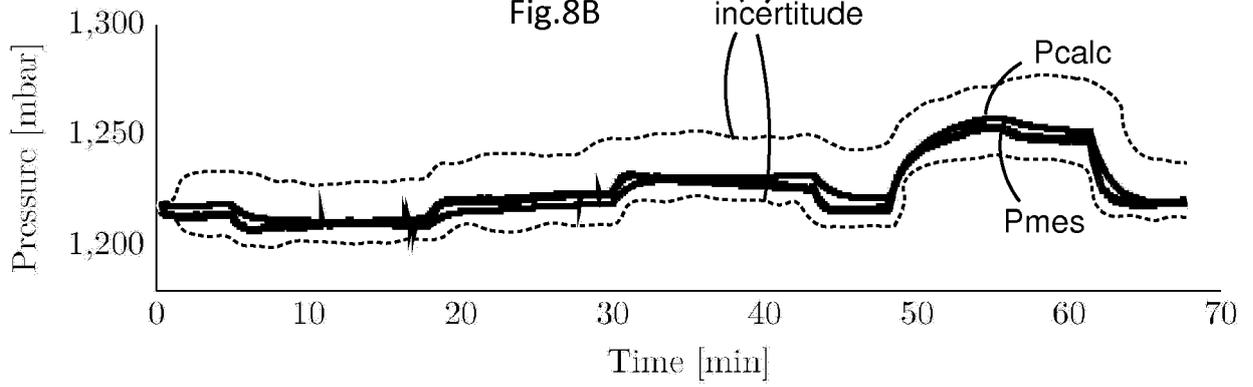


Fig.8C

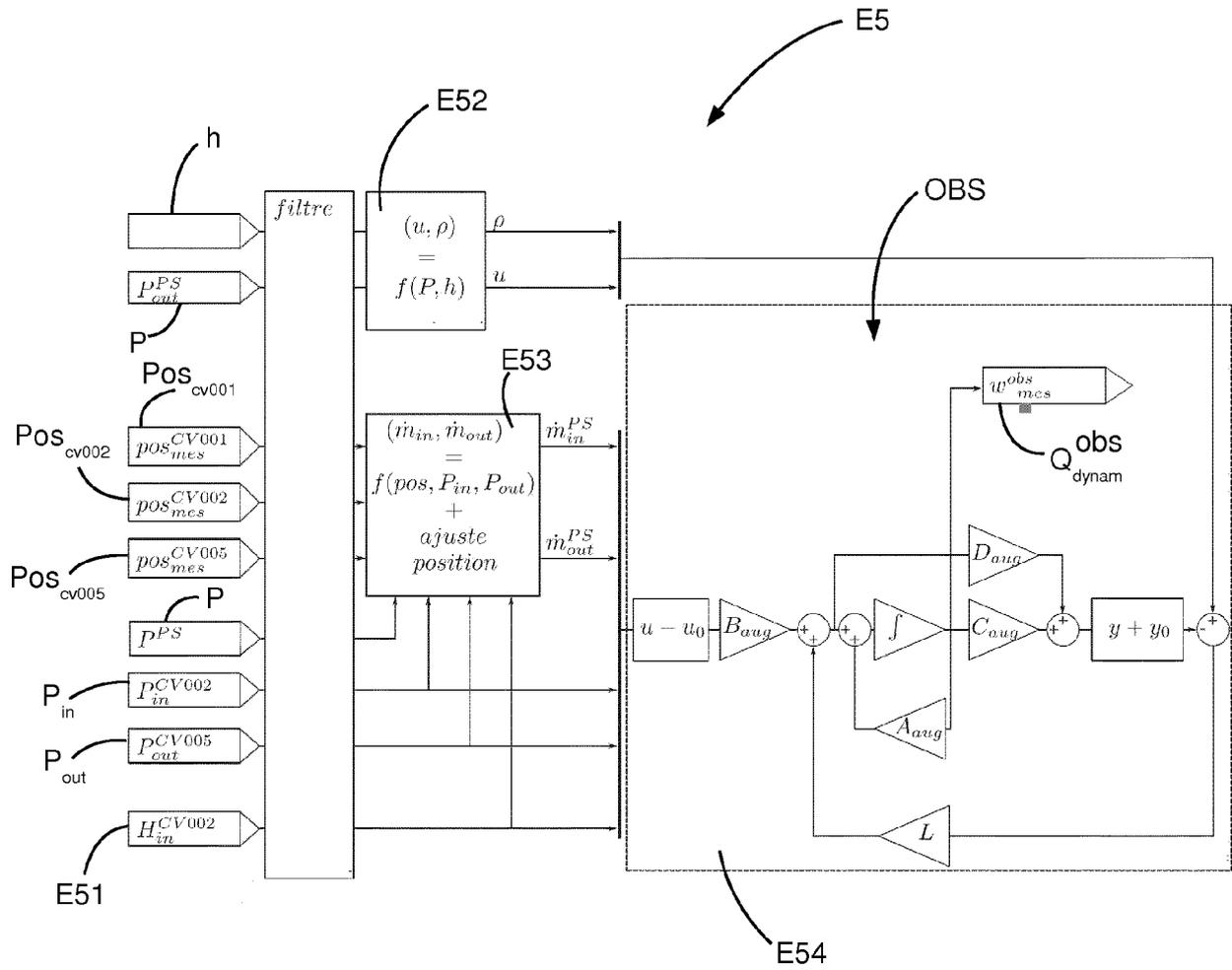


Fig.9

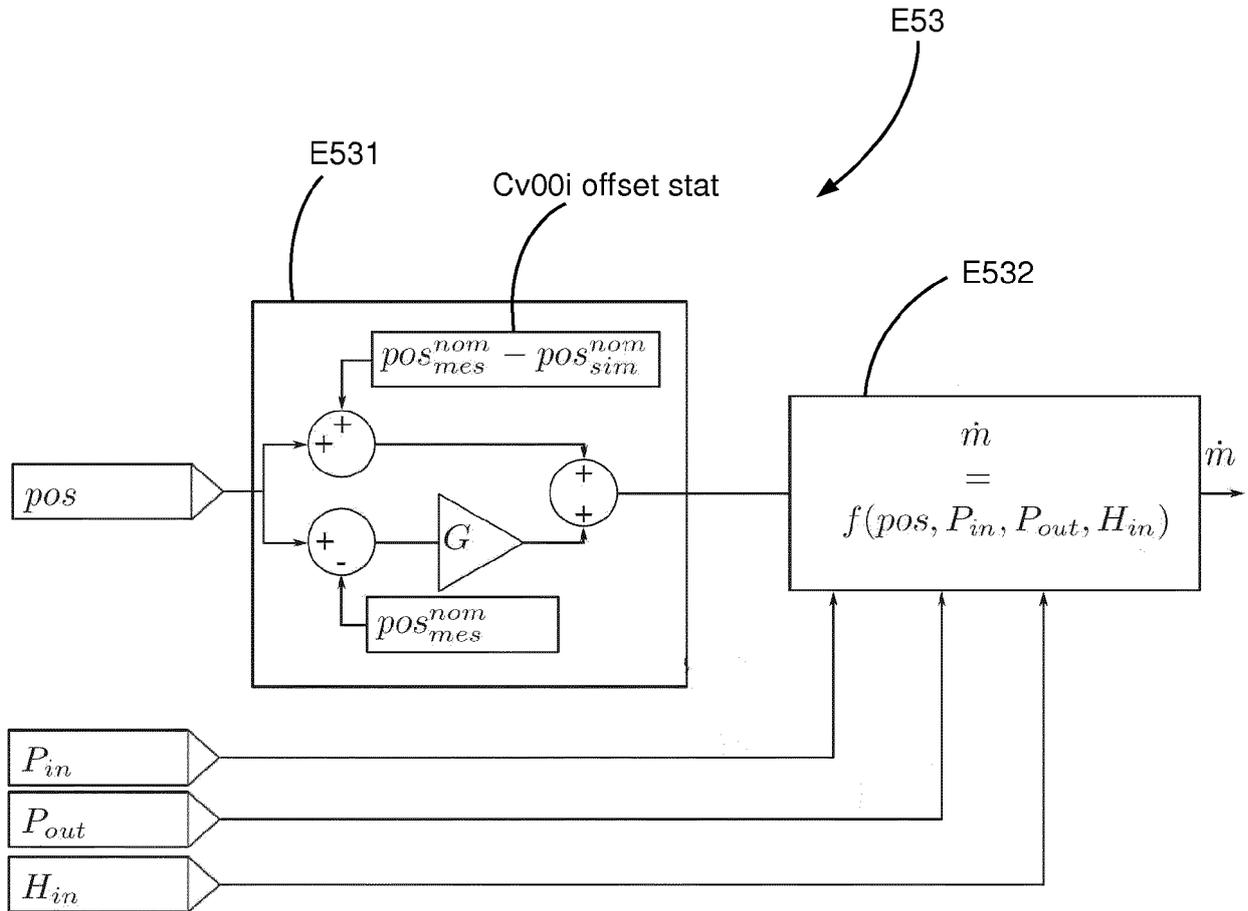


Fig.10

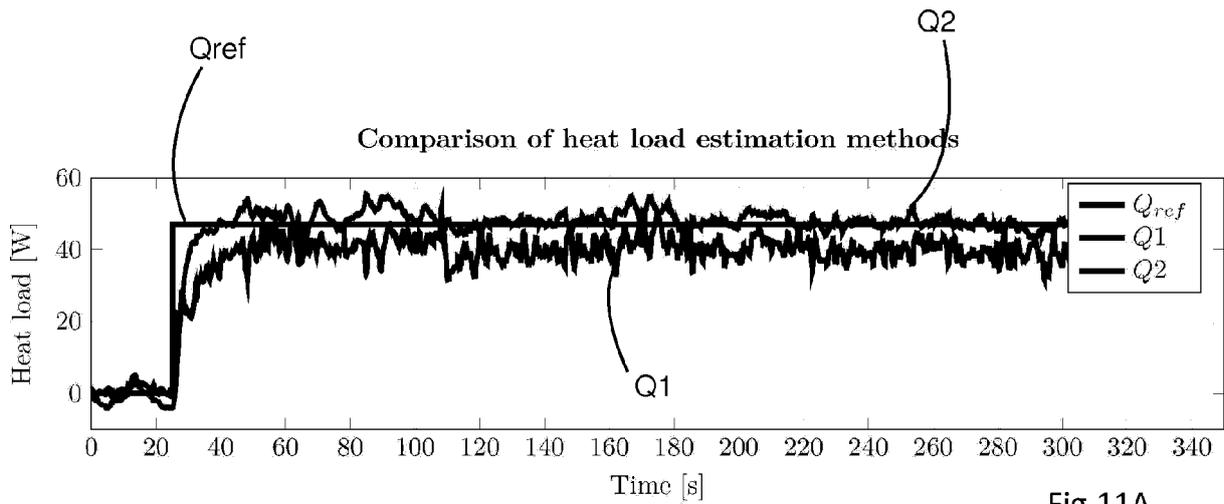


Fig.11A

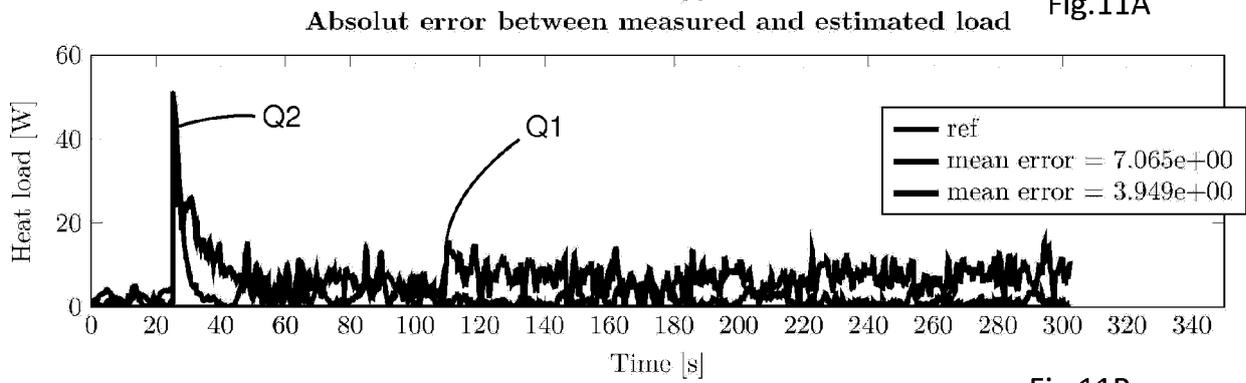


Fig.11B

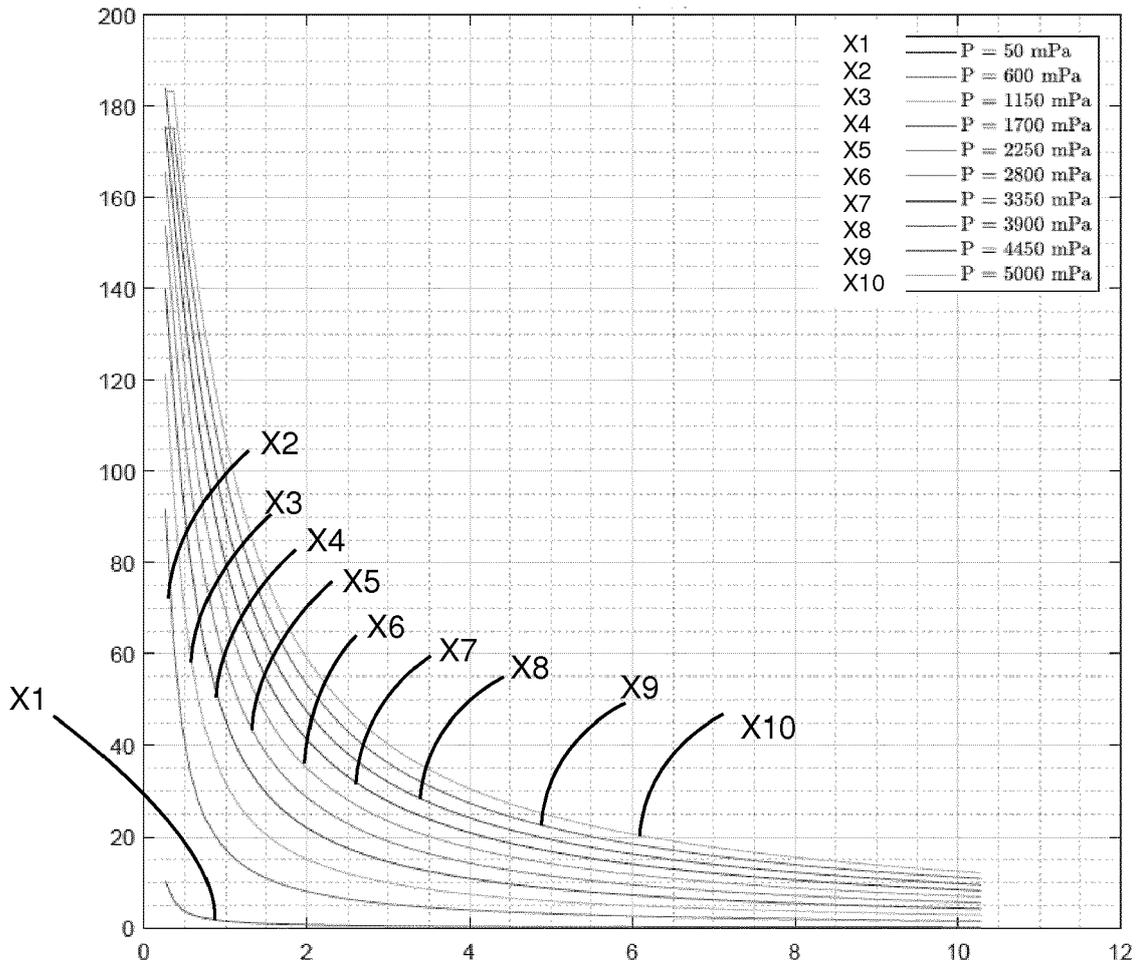


Fig.12A

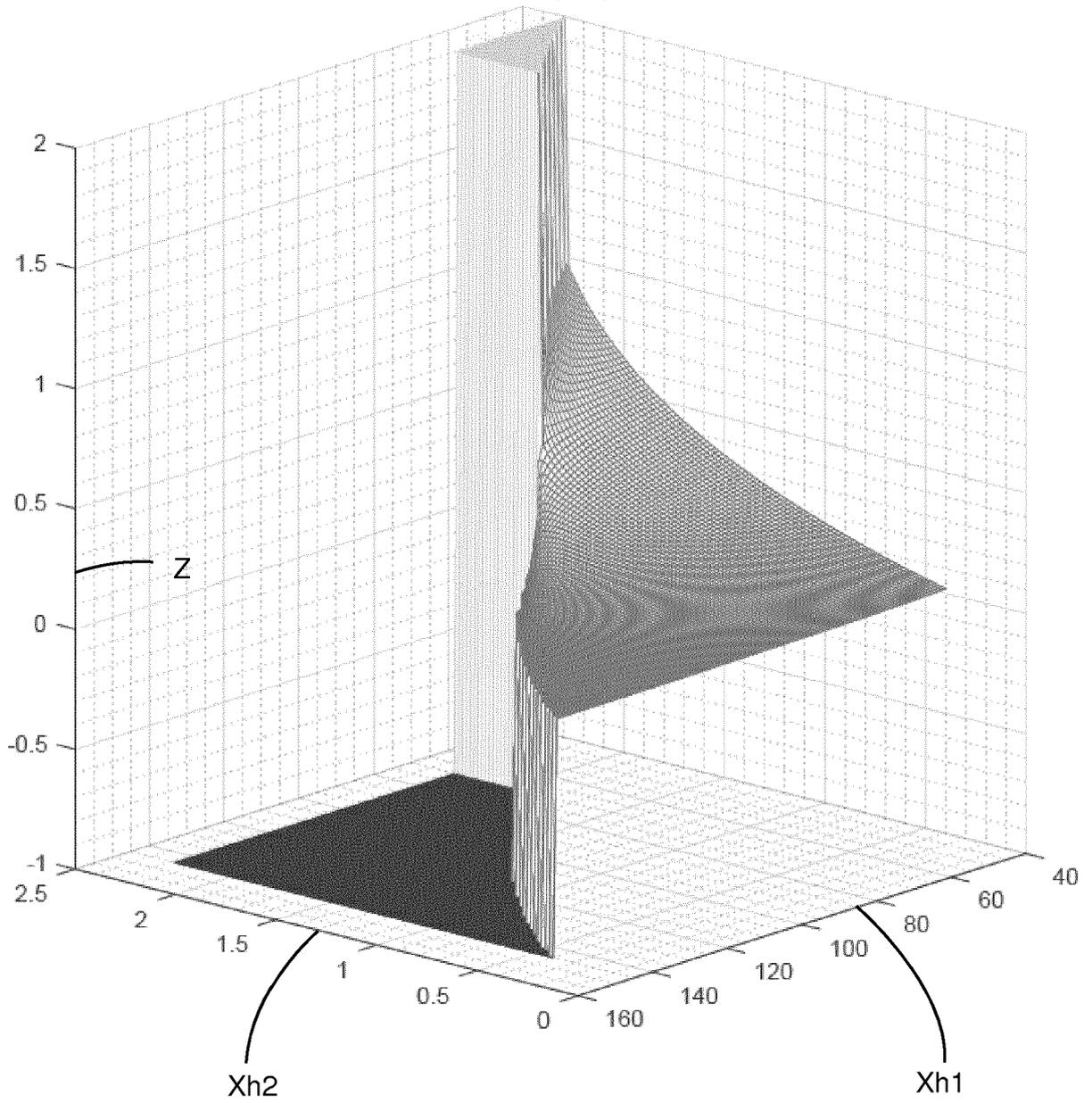


Fig.12B

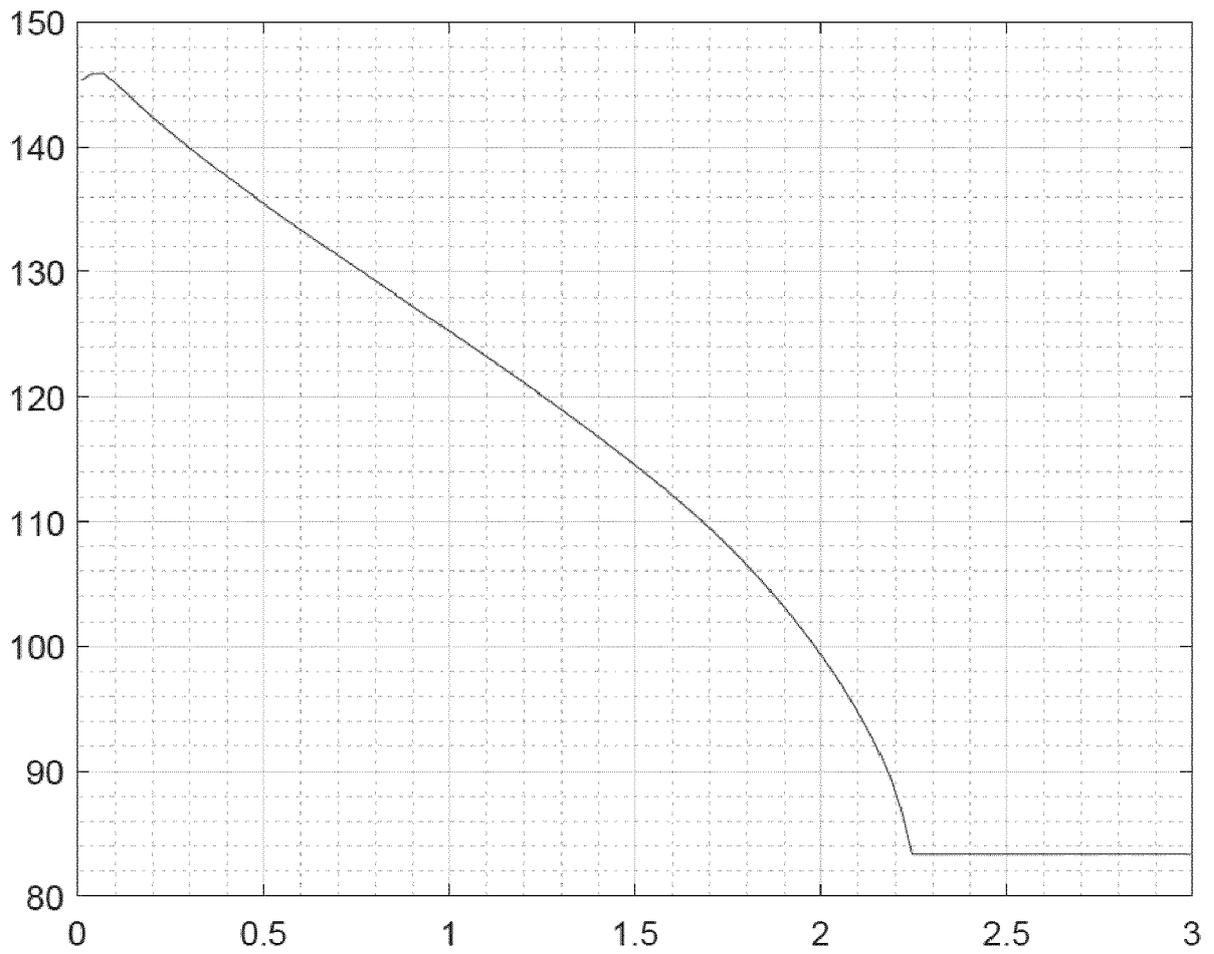


Fig.12C



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande  
EP 19 20 5154

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS   |   |  |                                      |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Catégorie   | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes   | Revendication concernée  | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)       |
| X   | H.NAKAI ET AL.: "Cryogenics for the KEKB Superconducting Crab Cavities", PROCEEDINGS OF IPAC'10 KYOTO JAPAN, juin 2010 (2010-06), pages 3834-3836, XP002794175,   | 1-3,7-13   | INV.<br>H05H7/20                     |
| A   | * abrégé; figures 1-3 *<br>* page 3835, colonne 2 - page 3836, colonne 2 *  | 4-6  |                                      |
| A   | -----<br>WO 2012/011017 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; MAZEN ALAMIR [FR] ET AL.) 26 janvier 2012 (2012-01-26)<br>* abrégé; revendications 1,4-9 *  | 1-13   |                                      |
| A   | -----<br>V.A.GORYASHKO ET AL.: "High-Precision Measurements of the Quality Factor of Superconducting Cavities at the FREIA Laboratory", PROCEEDINGS OF SFR2015, WHISTLER, BC, CANADA, décembre 2015 (2015-12), pages 810-813, XP002794176,<br>* le document en entier * | 1-13   |                                      |
| Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications  |   |  | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) |
|   |   |  | H05H                                 |
| Lieu de la recherche  |   | Date d'achèvement de la recherche  | Examineur                            |
| La Haye   |   | 10 mars 2020   | Crescenti, Massimo                   |
| CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES   |   |  |                                      |
| X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie<br>A : arrière-plan technologique<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire |   | T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br>.....<br>& : 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 19 20 5154

5 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 membres 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.

10-03-2020

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) | Date de<br>publication |
|---|------------------------|---|------------------------|
| WO 2012011017 A1                                | 26-01-2012             | EP 2596298 A1                           | 29-05-2013             |
|   |                        | FR 2963090 A1                           | 27-01-2012             |
|   |                        | US 2013139525 A1                        | 06-06-2013             |
|   |                        | WO 2012011017 A1                        | 26-01-2012             |
| -----   |                        |   |                        |

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.*

**Littérature non-brevet citée dans la description**

- **DE WENCAN XU ; S. BELOMESTNYKH ; H. HAHN.**  
Improvement of the Q-factor measurement in RF cavities. *BNL Technical Note, BNL-98894-(Ipac 13)*, 2013, 2489-2491 **[0003]**