

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication :

3 065 202

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

②① N° d'enregistrement national :

17 53331

⑤① Int Cl⁸ : **B 64 G 1/40** (2017.01), F 02 K 9/74

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ PROPULSEUR SPATIAL.

②② Date de dépôt : 18.04.17.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 19.10.18 Bulletin 18/42.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 17.07.20 Bulletin 20/29.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *CENTRE NATIONAL D'ETUDES
SPATIALES Etablissement public — FR.*

⑦② Inventeur(s) : MASSON FREDERIC et VILA
JEROME.

⑦③ Titulaire(s) : CENTRE NATIONAL D'ETUDES
SPATIALES Etablissement public.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET GERMAIN ET MAUREAU.

FR 3 065 202 - B1



Domaine Technique

[0001] De manière générale, l'invention concerne un système de propulsion spatiale hybride chimique-électrique.

Arrière-plan technologique

5 **[0002]** Les systèmes spatiaux utilisant de la propulsion électrique sont actuellement très étudiés, en vue, par exemple, d'une mission d'exploration et de colonisation humaine sur Mars, ou pour toute autre mission nécessitant des étages orbitaux à durée opérationnelle longue. En effet, des missions longues telles que l'exploration de planètes ou d'autres corps célestes (astéroïdes, comètes, etc.) ont des besoins
10 énergétiques drastiques et la propulsion électrique, très économe en carburant, permet de répondre au mieux à ces besoins. Cependant, la propulsion électrique reste très lente par rapport à la propulsion chimique plus classique.

[0003] Une étude de la NASA « Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0 » (NASA/SP-2009-566-ADD2, Mars 2014, Bret G. Drake et Kevin D.
15 Watts, éditeurs) analyse, conceptuellement, sur base des technologies actuelles, différentes approches possibles pour une mission sur Mars. En particulier, cette étude liste (section 3, p 152 : « Advanced In-space Transportation ») les différents systèmes de propulsion spatiale disponibles tels que la propulsion nucléaire cryogénique, la propulsion nucléaire électrique, la propulsion électrique solaire et la propulsion
20 chimique.

[0004] L'objectif de la présente invention est d'améliorer les solutions existantes de propulsion spatiale.

Description générale de l'invention

[0005] Un aspect de l'invention se rapporte à un système de propulsion spatiale
25 hybride chimique-électrique. Le système comprend un module de propulsion chimique (incluant un ou plusieurs moteurs-fusée, des réservoirs d'ergols chimiques, l'installation pour acheminer les ergols des réservoirs aux moteurs-fusée, etc.) comprenant une électropompe configurée pour pomper un carburant et/ou un comburant dans une chambre de combustion (débouchant dans une tuyère). Le
30 système de propulsion spatiale hybride comprend aussi un module de propulsion

électrique comprenant un système d'alimentation électrique pour ioniser et éjecter des atomes d'une masse propulsive. L'électropompe du système de propulsion est connectée au système d'alimentation électrique du module de propulsion électrique pour être alimentée en énergie électrique. Le module de propulsion électrique peut
5 inclure, en outre des panneaux solaires, des réservoirs de masse propulsive et un ou plusieurs propulseurs électriques (p.ex. des moteurs plasmiques ou ioniques.) Le système de propulsion spatiale hybride chimique-électrique permet donc un transfert d'énergie électrique entre le module de propulsion électrique et le module de propulsion chimique. Un transfert d'énergie peut être réalisé à certains instants d'une
10 mission. Selon la configuration du système de propulsion spatiale hybride chimique-électrique, le transfert d'énergie électrique peut être à sens unique du module de propulsion électrique vers le module de propulsion chimique ou bien bidirectionnel. Dans le deuxième cas, l'électropompe est entraînée par un moteur-générateur électrique.

15 **[0006]** Dans le contexte de ce document, un système de propulsion spatiale est un système de propulsion prévu pour propulser un engin spatial étant dans l'espace. Le système de propulsion spatiale hybride chimique-électrique selon un aspect de l'invention est particulièrement adapté pour être intégré p. ex. dans l'étage supérieur d'un lanceur ou dans un remorqueur spatial (« space tug » en anglais) qui effectue
20 plusieurs longues missions en orbite.

[0007] La propulsion chimique permet de propulser un engin spatial grâce à l'éjection d'une masse propulsive à haute température, produite par une réaction exothermique entre un carburant et un comburant (combustion). La combustion se déroule dans une chambre de combustion et le(s) produit(s) de réaction sont ensuite détendus et
25 accélérés dans une tuyère attenante à la chambre de combustion.

[0008] Généralement, le carburant et le comburant (les ergols) sont injectés à haute pression dans la chambre de combustion en vue de leur combustion. La pression des ergols peut se situer dans une plage allant de plusieurs bars à plusieurs centaines de bars (p.ex. entre 10 et 400 bars), selon le type et la puissance du moteur-fusée.

30 **[0009]** L'électropompe permet de pomper le carburant et/ou le comburant et de mettre le carburant et/ou le comburant à la pression désirée pour l'injection dans la chambre de combustion. Dans le cadre du présent document, le terme

« électropompe » désigne une pompe ou un ensemble de pompes qui sont entraînées par un ou plusieurs moteurs électriques.

[0010] Le module de propulsion électrique (plus particulièrement le propulseur électrique) utilise de l'énergie électrique, fournie par le système d'alimentation électrique, pour propulser l'engin spatial. En effet, le module de propulsion électrique (plus particulièrement le propulseur électrique) est configuré pour ioniser et éjecter, grâce à l'énergie électrique fournie par le système d'alimentation électrique, les atomes d'une masse propulsive afin de propulser l'engin spatial. L'ionisation peut se faire, par exemple, par la traversée d'un nuage d'électrons, par une décharge électrique, par une source haute fréquence, par contact, par ondes électromagnétiques, etc. L'éjection peut être réalisée, par exemple, par une interaction entre les ions et un champ électrique et/ou un champ magnétique.

[0011] Selon un mode de réalisation, le module de propulsion chimique comprend une turbine configurée pour récupérer une partie de l'énergie de combustion générée dans la chambre de combustion.

[0012] Selon un mode de réalisation de l'invention, le module de propulsion chimique comprend un système de refroidissement de la chambre de combustion et/ou de la tuyère, dans lequel une partie du comburant et/ou du carburant est dirigée vers les parois de la chambre de combustion et/ou de la tuyère afin de les refroidir. L'énergie de combustion récupérée par le comburant et/ou carburant chaud peut alors être utilisée pour actionner la turbine. Alternativement ou additionnellement, le module de propulsion chimique peut comprendre une chambre de précombustion, dans laquelle une partie des ergols réagissent et libèrent de l'énergie pouvant faire fonctionner la turbine et/ou préchauffer les ergols.

[0013] Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, l'électropompe comprend un moteur-générateur couplé mécaniquement à la turbine pour réinjecter de l'énergie électrique dans le système d'alimentation électrique. Dans ce contexte, l'expression « moteur-générateur » désigne une machine électrique pouvant fonctionner en tant que générateur (convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique) et en tant que moteur (convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique). La turbine permet d'alimenter le moteur-générateur électrique de l'électropompe en mode générateur de puissance, et de transmettre de la puissance électrique du module de propulsion chimique vers le module de propulsion électrique.

[0014] Selon un mode de réalisation, le système d'alimentation électrique comprend une batterie (ou batterie d'accumulateurs).

[0015] Selon un mode de réalisation, le système d'alimentation électrique comprend un module de distribution et de gestion de l'énergie électrique.

5 **[0016]** Dans un mode de réalisation comprenant une batterie et un module de distribution et de gestion de l'énergie électrique, la batterie est préférablement connectée au module de distribution et de gestion de l'énergie électrique. Le module de distribution et de gestion de l'énergie électrique peut être configuré pour se servir de la batterie comme d'une batterie tampon.

10 **[0017]** Dans un mode de réalisation préféré, le module de propulsion chimique comprend un réservoir de carburant et un réservoir de comburant et le module de propulsion électrique comprend un réservoir de masse propulsive. Préférablement, le système de propulsion comprend un compartiment cryogénique commun aux réservoirs des modules de propulsion chimique et électrique. Le compartiment
15 cryogénique commun peut éventuellement être connecté au système d'alimentation électrique pour être alimenté en énergie électrique.

[0018] Selon un mode de réalisation, le carburant peut être sélectionné dans le groupe consistant en : oxygène (liquide ou gazeux), T-Stoff ou autre composé de peroxyde d'hydrogène, peroxyde d'azote et acide nitrique. Le carburant est, de
20 préférence sélectionné dans le groupe consistant en : hydrogène (liquide ou gazeux), hydrocarbure (p.ex. méthane, éthane, etc.) ou mélange d'hydrocarbures (p.ex. kérosène), C-Stoff ou autre composé d'éthanol, hydrazine et composé dérivé d'hydrazine. D'autres couples comburant-carburant sont également possibles.

[0019] Le kérosène est un mélange d'hydrocarbures contenant des alcanes (C_nH_{2n+2})
25 de formule chimique allant de $C_{10}H_{22}$ à $C_{14}H_{30}$. L'hydrazine (diazane) a une formule chimique N_2H_4 (formule semi-développée H_2N-NH_2). Le T-Stoff est composé d'une fraction oxydante à 80% de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 et 20% d'eau H_2O et de stabilisateurs (acide phosphorique, phosphate de sodium et 8-hydroxyquinoléine). Le C-Stoff est un mélange d'environ 57% de méthanol CH_3OH et 43% d'hydrate d'hydrazine
30 $N_2H_4 \cdot H_2O$ (fractions massiques) avec un catalyseur $K_3[Cu(CN)_4]$ (tripotassium tetracyanocuprate).

[0020] Selon un mode de réalisation, la masse propulsive comprend des atomes sélectionnés dans le groupe consistant en les espèces suivantes : xénon, krypton, bismuth, argon, iode, magnésium, zinc. Cette liste n'est pas exhaustive mais indique certaines espèces préférées. Selon un mode de réalisation préféré, exactement une

5 de ces espèces constitue la masse propulsive.

[0021] Optionnellement, le module de propulsion chimique du système de propulsion comprend un système d'actionneurs électriques, qui permet l'orientation de la tuyère, connecté au système d'alimentation électrique pour être alimenté en énergie électrique. Un tel « module de poussée vectorielle » est encore appelé « TVC »

10 (acronyme du terme anglais « thrust vector control »). Il sera apprécié que l'utilisation d'un TVC électrique permet de grandement réduire la complexité par rapport à un TVC hydraulique usuellement utilisé dans un module de propulsion chimique.

[0022] Préférentiellement, le système d'alimentation électrique comprend un ou plusieurs panneaux solaires.

[0023] Selon un mode de réalisation préféré, le système de propulsion décrit ci-dessus est intégré dans un engin spatial. Selon des modes de réalisation, l'engin spatial peut être un remorqueur spatial, l'étage supérieur d'un lanceur, une sonde spatiale ou une capsule spatiale. Une sonde spatiale est un engin spatial sans équipage lancé dans l'espace pour étudier différents objets célestes (Soleil,

20 planètes, ...). Une capsule spatiale est un engin spatial simple habité par un équipage.

[0024] Le système de propulsion spatiale proposé permet d'optimiser la performance mission (en termes de durée et masse de charge utile) d'un étage orbital ou d'un étage supérieur de lanceur, au prix d'une complexité système limitée (grâce à la liaison entre les baies propulsives chimique et électrique). Avec un tel système, la mission de

25 l'étage orbital comprendrait une alternance de phases propulsées en mode chimique et de phases propulsées en mode électrique. Si la propulsion électrique continue à assurer la majorité de l'impulsion totale de la mission (plus de 60%), l'impulsion spécifique moyenne reste proche des valeurs élevées qui sont atteintes par la propulsion électrique (2000 sec et plus). La propulsion chimique pourra être employée

30 lors des parties de la mission durant lesquelles l'accélération a une forte valeur ajoutée (début de mission ou la gravité est la plus forte, traversée des ceintures de Van Hallen, manœuvres au périégée, rendez-vous avec un satellite, etc.). La propulsion chimique permettra également de réduire la durée totale de la mission.

Brève description des dessins

[0025] D'autres particularités et caractéristiques de l'invention ressortiront de la description détaillée de certains modes de réalisation avantageux présentés ci-dessous, à titre d'illustration, avec référence aux dessins annexés qui montrent :

5 Fig. 1: un système de propulsion spatiale hybride chimique-électrique selon un premier mode de réalisation de l'invention ; et

Fig. 2: un système de propulsion spatiale hybride chimique-électrique selon un second mode de réalisation de l'invention.

Description détaillée de plusieurs modes de réalisation de l'invention

10 **[0026]** La Fig. 1 illustre un système de propulsion 10 spatiale hybride chimique-électrique d'un remorqueur spatial, selon un premier mode de réalisation préféré de l'invention. Le système de propulsion 10 comprend un module de propulsion chimique 12 et un module de propulsion électrique 14. La ligne pointillée verticale 16 délimite schématiquement les éléments du module de propulsion chimique 12 des
15 éléments du module de propulsion électrique 14.

[0027] Un remorqueur est un type d'étage orbital, c'est-à-dire un étage qui passe toute sa vie opérationnelle dans l'espace. Il peut être conçu pour interagir avec d'autres satellites et réaliser, p.ex. des rendez-vous coopératifs, des captures, des transports, des manœuvres de désorbitation, des échanges d'ergols et/ou d'énergie.
20 Généralement, la propulsion d'un tel remorqueur est électrique, ayant une impulsion spécifique (I_{sp}) élevée (de l'ordre de 2000 secondes pour un propulseur électrique au Krypton). L' I_{sp} élevée traduit le fait que la propulsion électrique consomme relativement peu de masse propulsive. Un aspect parfois considéré comme un désavantage des propulseurs électrique est le fait qu'ils ne génèrent qu'une poussée
25 relativement faible (de l'ordre de du Newton pour un propulseur électrique à effet Hall au Xénon).

[0028] Le système de propulsion 10 intègre, en plus, une propulsion chimique. La propulsion chimique a une I_{sp} modérée (de l'ordre de 350 secondes pour un couple comburant-carburant oxygène liquide-méthane) traduisant le fait qu'elle consomme
30 beaucoup de réactifs de combustion. Par contre, la poussée d'un propulseur chimique est importante (de l'ordre de 5 kN pour un couple comburant-carburant oxygène

liquide-méthane). La propulsion chimique est dès lors idéale lors de manœuvres dans lesquelles l'accélération a une forte valeur ajoutée (p. ex. dans une zone où la gravité est plus forte, lors de la traversée des ceintures de Van Hallen, lors de manœuvres au péri-gée, lors de rendez-vous, etc.).

5 **[0029]** Le système de propulsion 10 « marie » la propulsion chimique avec la propulsion électrique. Le système 10 permet de contourner certains aspects considérés comme désavantageux liés à chaque propulsion, utilisée seule. Le remorqueur spatial peut alors être propulsé par une propulsion chimique ou une propulsion électrique selon les besoins de sa mission. Typiquement, la propulsion
10 électrique est active pendant une grande partie de la mission du remorqueur (p.ex. 60% à 99% de l'impulsion totale de la mission) et la propulsion chimique prend le relais lors de manœuvres dans lesquelles l'accélération a une forte valeur ajoutée (p.ex. 1% à 40% de l'impulsion totale de la mission). Dans ce cas, l'Isp moyenne du système 10 sera proche de l'Isp du propulseur électrique mais la durée totale d'une mission sera
15 réduite par rapport à un système de propulsion ne comprenant qu'un propulseur électrique.

[0030] Le module de propulsion chimique 12 propulse le remorqueur spatial dans l'espace grâce à l'éjection des produits de combustion d'un comburant avec un carburant dans l'espace. La combustion se déroule dans une chambre de
20 combustion 18 dans laquelle sont injectés les ergols. Les produits de combustion sont éjectés au travers de la tuyère 20 attenante à la chambre de combustion.

[0031] Le module de propulsion chimique 12 comprend un réservoir de carburant 22 et un réservoir de comburant 24. Le carburant et le comburant sont pompés dans la chambre de combustion 18 par une électropompe 26, comprenant une pompe à
25 carburant 28 et une pompe à comburant 30. Une vanne de contrôle 32 de carburant et une vanne de contrôle 34 de comburant sont placées en aval (ou en amont) des pompes 28, 30 et en amont de la chambre de combustion 18 afin de réguler finement la pression et le débit des ergols.

[0032] De plus (en option), le module de propulsion chimique 12 comprend un module
30 de poussée vectorielle (TVC) électrique 36 permettant d'orienter l'éjection des gaz d'échappement dans l'espace afin de contrôler la vitesse angulaire du remorqueur spatial. Le module de poussée vectorielle électrique 36 oriente la tuyère 20 pour guider le flux de gaz d'échappement. Dans un autre mode de réalisation, au lieu d'orienter la

tuyère 20, le module de poussée vectorielle électrique 36 oriente des panneaux déflecteurs afin de guider le flux de gaz d'échappement.

[0033] Le module de propulsion électrique 14 propulse le remorqueur spatial par l'éjection d'atomes ionisés. Il comprend un réservoir de masse propulsive 38 connecté à un propulseur électrique 40. Le propulseur 40 peut être un propulseur électrothermique (p. ex. un moteur résistojet ou un moteur arcjet), un moteur électromagnétique (p. ex. un moteur magnétoplasmadynamique, un moteur à force pondéromotrice ou un moteur à plasma pulsé) ou un moteur électrostatique (p. ex. un moteur à émission de champ, un moteur ionique à grille, un moteur RIT (du terme anglais « Radiofrequency ionisation thruster ») ou un moteur à Effet Hall) ou tout autre moteur adapté pour un propulseur électrique.

[0034] Le propulseur 40 du module de propulsion électrique 14 est alimenté en énergie électrique provenant d'un système d'alimentation électrique 42.

[0035] Le système d'alimentation électrique 42 comprend un module de distribution et de gestion de l'énergie électrique 44 (« Power Management And Distribution » (PMAD) en anglais), une batterie 46 et des panneaux solaires 48. Les panneaux solaires 48 captent l'énergie solaire et la transforment en énergie électrique, qui peut éventuellement être stockée dans la batterie 46. En effet, la batterie 46 permet de stocker les surplus d'énergie pour la redistribuer au besoin, p. ex. pendant des phases d'éclipse ou en cas de plus importante consommation d'énergie.

[0036] En accord avec un aspect de l'invention, l'électropompe 26 est connectée au système d'alimentation électrique 42, en particulier au PMAD 44 pour être alimentée en énergie électrique. L'énergie électrique fournie par le PMAD 44 à l'électropompe 26 alimente le moteur 50 de celle-ci. Le moteur 50 est configuré pour entraîner la pompe à carburant 28 et la pompe à comburant 30.

[0037] Il sera apprécié que le système de propulsion 10 établit un pont entre la propulsion chimique et la propulsion électrique produisant un effet synergique entre ces deux propulsions. En effet, il réalise une hybridation entre la propulsion chimique et la propulsion électrique du fait que le système d'alimentation électrique 42 du propulseur électrique 14 alimente des éléments du propulseur chimique 12, en particulier l'électropompe 26.

[0038] Dans le mode de réalisation représenté à la Fig. 1, le moteur 50 de l'électropompe 26 entraîne les pompes 28, 30 au travers d'un système de transmission mécanique, ici illustré par un arbre de transmission 52.

[0039] Il sera apprécié que d'autres configurations de l'électropompe sont possibles.

5 P.ex., l'électropompe 26 pourrait être remplacée par des électropompes à entraînements séparés pour le carburant et pour le comburant.

[0040] Le module de poussée vectorielle 36 du module de propulsion chimique 12 est connecté système d'alimentation électrique 42 du propulseur électrique 14 pour être alimenté en énergie électrique.

10 **[0041]** Dans le mode de réalisation illustré, les réservoirs de carburant 22 et de comburant 24 ainsi que le réservoir de masse propulsive 38 se partagent un même compartiment cryogénique 54. Cette configuration permet de réduire l'impact de l'emploi de cryoréfrigérateurs pour les ergols chimiques sur la consommation d'énergie électrique. L'emploi de ces cryoréfrigérateurs est optionnel. Si les exigences de la
15 mission le permettent, carburant, comburant et masse propulsive peuvent être stockés à des températures non cryogéniques.

[0042] La Fig. 2 illustre un système de propulsion d'un remorqueur spatial selon deuxième mode de réalisation préféré de l'invention. Le système de propulsion du remorqueur spatial est similaire au système de propulsion illustré à la Fig. 1. Il diffère
20 cependant de celui-ci en ce qu'il comprend, en plus, une turbine 56, un circuit de refroidissement 58 de la chambre de combustion 60 et éventuellement de la tuyère 62. En outre, le moteur de l'électropompe est remplacé par moteur-générateur 64.

[0043] Il sera apprécié que le mode de réalisation illustré à la Fig. 2 permet de convertir une partie de l'énergie de combustion en énergie électrique utilisable par le
25 propulseur électrique. Il sera aussi apprécié que, selon ce mode de réalisation préféré, l'hybridation entre la propulsion chimique et la propulsion électrique permet la réalisation d'un transfert bidirectionnel d'énergie entre les deux propulsions.

[0044] Une partie du carburant (ou du comburant) est dirigée dans le circuit de refroidissement 58 en tant que fluide caloporteur afin de récupérer une partie de
30 l'énergie de combustion. Le flux de carburant (ou de comburant) injecté dans le système de refroidissement 58 est contrôlé par une vanne de contrôle 66.

[0045] Après avoir absorbé une partie de la chaleur, le fluide caloporteur chaud entraîne la turbine 56. L'énergie mécanique produite par la turbine 56 peut être utilisée pour entraîner les pompes 72, 74 et/ou par le moteur-générateur 64 pour générer de l'énergie électrique. Cette énergie électrique est mise à disposition du PMAD 68 du système d'alimentation électrique 70.

[0046] La partie du carburant ou comburant ayant entraîné la turbine peut être injectée dans la chambre de combustion 62 ou être évacuée d'une autre manière.

[0047] Il sera aussi apprécié que la surface des panneaux solaires pourrait être réduite par rapport à celle d'un remorqueur spatial (ou tout autre engin spatial) sans propulsion chimique grâce à la synergie entre le propulseur chimique et le propulseur électrique.

[0048] Alors que des modes de réalisation particuliers viennent d'être décrits en détail, l'homme du métier appréciera que diverses modifications et alternatives à ceux-là puissent être développées à la lumière de l'enseignement global apporté par la présente divulgation de l'invention. Par conséquent, les agencements et/ou procédés spécifiques décrits ci-dedans sont censés être donnés uniquement à titre d'illustration, sans intention de limiter la portée de l'invention.

Revendications

1. Un système de propulsion spatiale hybride chimique-électrique, comprenant un module de propulsion chimique ; et un module de propulsion électrique comprenant un système d'alimentation électrique pour ioniser et éjecter des atomes d'une masse propulsive ;
5 **caractérisé en ce que**
le module de propulsion chimique comprend une électropompe configurée pour pomper un carburant et/ou un comburant dans une chambre de combustion ; dans lequel l'électropompe est connectée au système d'alimentation électrique du module de propulsion électrique pour être alimentée en énergie électrique.
10
2. Le système de propulsion selon la revendication 1, dans lequel le module de propulsion chimique comprend une turbine configurée pour récupérer une partie de l'énergie de combustion générée dans la chambre de combustion.
3. Le système de propulsion selon la revendication 2, dans lequel l'électropompe
15 comprend un moteur-générateur couplé à la turbine pour réinjecter de l'énergie électrique dans le système d'alimentation électrique.
4. Le système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le système d'alimentation électrique comprend une batterie.
5. Le système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans
20 lequel le système d'alimentation électrique comprend un module de distribution et de gestion de l'énergie électrique.
6. Le système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le module de propulsion chimique comprend un réservoir de carburant et un réservoir de comburant et dans lequel le module de propulsion électrique
25 comprend un réservoir de masse propulsive.
7. Le système de propulsion selon la revendication 6, comprenant un compartiment cryogénique commun aux réservoirs des modules de propulsion chimique et électrique.
8. Le système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans
30 lequel le comburant est sélectionné dans le groupe consistant en : oxygène, T-Stoff ou autre composé de peroxyde d'hydrogène, peroxyde d'azote et acide

nitrique et dans lequel le carburant est sélectionné dans le groupe consistant en : hydrogène, hydrocarbure ou mélange d'hydrocarbures, C-Stoff ou autre composé d'éthanol, hydrazine et composé dérivé d'hydrazine.

- 5 9. Le système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel la masse propulsive comprend des atomes sélectionnés dans le groupe consistant en les espèces suivantes : xénon, krypton, bismuth, argon, iode, magnésium, zinc.
- 10 10. Le système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel le module de propulsion chimique comprend un module de poussée vectorielle électrique connecté au système d'alimentation électrique pour être alimenté en énergie électrique.
11. Le système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel le système d'alimentation électrique comprend un ou plusieurs panneaux solaires.
- 15 12. Un engin spatial comprenant un système de propulsion selon l'une quelconque des revendications 1 à 11.
13. L'engin spatial selon la revendication 12, l'engin spatial étant un remorqueur spatial.
- 20 14. L'engin spatial selon la revendication 12, l'engin spatial étant un étage supérieur d'un lanceur.
15. L'engin spatial selon la revendication 12, l'engin spatial étant une sonde spatiale ou une capsule spatiale.

Fig. 1

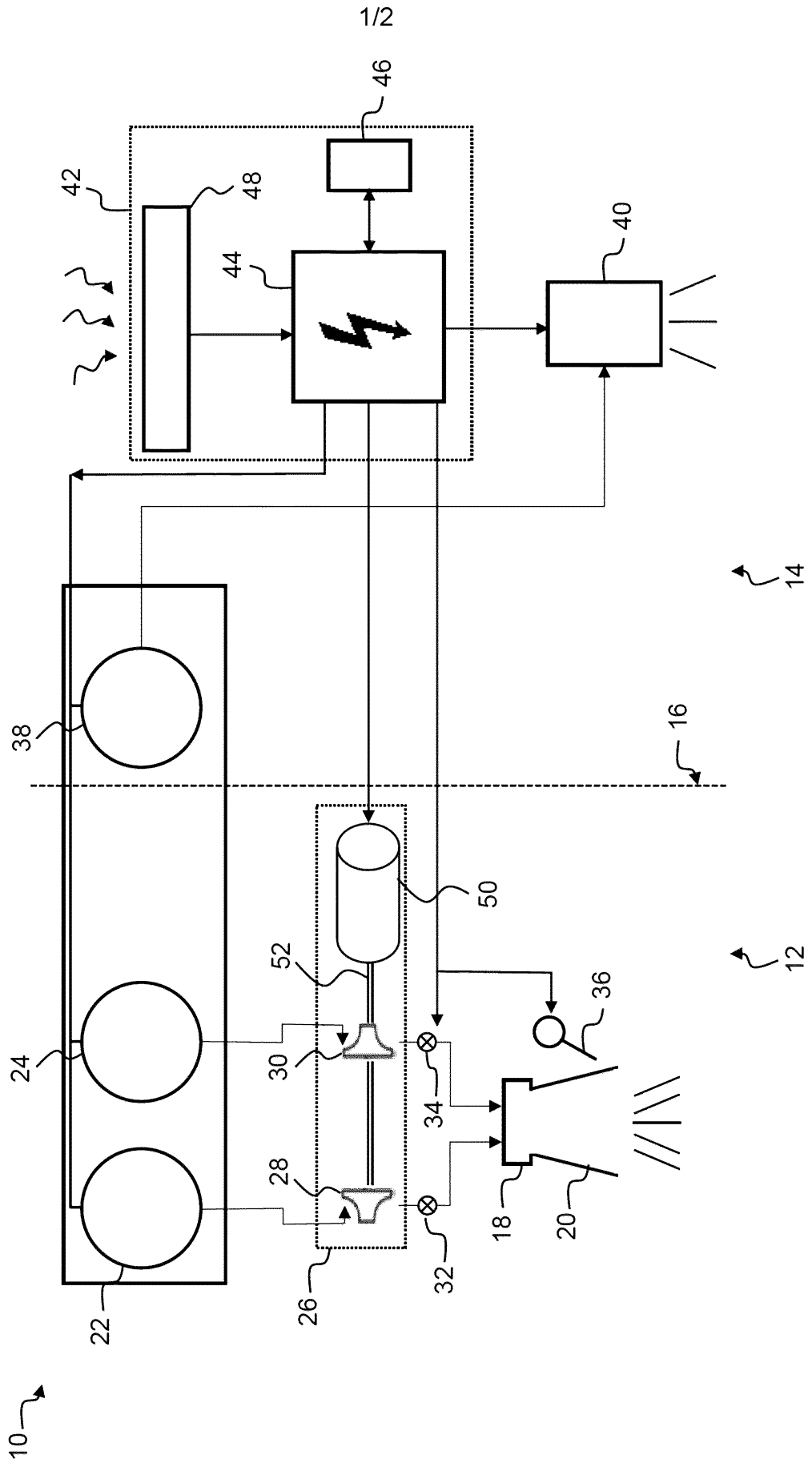
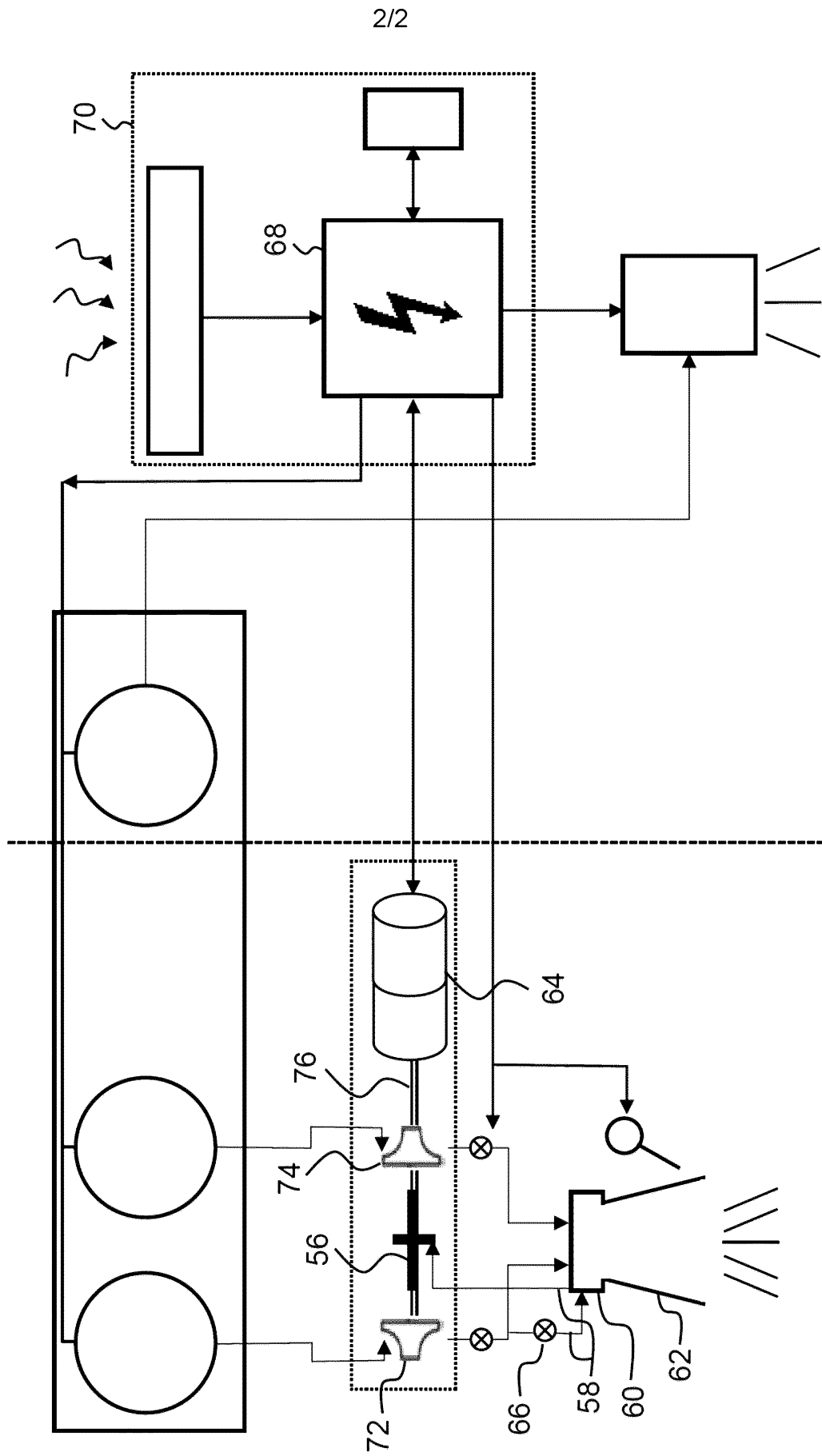


Fig. 2



2/2

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

FR 2 986 213 A1 (SNECMA [FR]; SME [FR]) 2 août 2013 (2013-08-02)

FR 2 636 095 A1 (AEROSPATIALE [FR]) 9 mars 1990 (1990-03-09)

FR 2 991 391 A1 (SNECMA [FR]) 6 décembre 2013 (2013-12-06)

US 2013/047578 A1 (GASCON NICOLAS CLAUDE [US] ET AL) 28 février 2013 (2013-02-28)

FR 3 024 436 A1 (SNECMA [FR]) 5 février 2016 (2016-02-05)

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT