

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE



Description

Titre de l'invention : Modes de moteur opérationnel

- [0001] La présente invention concerne un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, et un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz pour un aéronef. La présente description concerne en outre un procédé mis en œuvre par ordinateur pour déterminer un ou plusieurs paramètres de chargement de carburant pour un aéronef, un système de détermination de paramètres de chargement de carburant, un procédé de détermination d'une attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour une pluralité de missions, et un système de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte. La présente invention concerne en outre un procédé de chargement de carburant sur l'aéronef, et sur une pluralité d'aéronefs réalisant la pluralité de missions.
- [0002] Dans le secteur de l'aviation, on s'attend à une tendance à l'utilisation de carburants différents des carburateurs traditionnels à base de kérosène généralement utilisés actuellement.
- [0003] Selon un premier aspect, un moteur à turbine à gaz pour un aéronef est fourni, comprenant :
- [0004] un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale ; et
- [0005] un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux, le régulateur de distribution de carburant étant conçu pour recevoir du carburant à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première,
- [0006] dans lequel le régulateur de distribution de carburant est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0007] Les inventeurs ont déterminé qu'il peut être avantageux de fournir du carburant à partir de sources de carburant différentes ayant des caractéristiques différentes au régulateur de distribution de carburant, et de distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux de telle sorte que du carburant d'une caractéristique

différente est fourni dans des plages différentes du fonctionnement de la chambre de combustion. Cette alimentation en carburant plus souple vers la chambre de combustion peut permettre que le carburant qui présente des propriétés de combustion favorables, mais est limité en alimentation, soit utilisé lorsque ces propriétés favorables auront un effet plus important.

- [0008] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule peut être associé à un niveau de production de nvPM inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0009] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant à partir de la première source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à la fois dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale, et du carburant à partir de la seconde source de carburant aux injecteurs de carburant principaux pendant un fonctionnement dans la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0010] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant à partir de la première source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement dans au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule, et distribuer du carburant à partir de la seconde source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0011] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour basculer la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes entre le carburant provenant de la première source de carburant et le carburant provenant de la seconde source de carburant à un ou plusieurs points de fonctionnement au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule ou à une limite de celle-ci.
- [0012] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour basculer la distribution du carburant aux injecteurs de carburant pilotes entre le carburant provenant de la première source de carburant et le carburant provenant de la seconde source de carburant selon un signal de mode indiquant un changement de la plage de fonctionnement du système de combustion étagée. Le basculement peut se produire au niveau du point d'étagement entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0013] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour basculer de nouveau la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes entre le carburant

provenant de la première source de carburant et le carburant provenant de la seconde source de carburant à un point seuil au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule. Le carburant provenant de la seconde source peut être distribué aux injecteurs de carburant pilotes à des débits de carburant inférieurs au point seuil, et le carburant provenant de la première source est distribué aux injecteurs de carburant pilotes à des débits de carburant entre le seuil et la limite de la plage de fonctionnement à injection pilote seule.

- [0014] Le point seuil peut être un débit de carburant seuil auquel la production de nvPM par le moteur à turbine à gaz passe une quantité seuil des nvPM produites par le moteur à turbine à gaz pendant un fonctionnement dans lequel les injecteurs de carburant pilotes reçoivent du carburant ayant la seconde caractéristique de carburant
- [0015] En outre ou en variante, le point seuil peut être un débit de carburant seuil prédéfini qui est inférieur au débit de carburant à la limite entre le fonctionnement à injection pilote seule et le fonctionnement à injection pilote et principale d'une quantité prédéfinie. Le débit de carburant seuil prédéfini peut être soit un pourcentage du débit de carburant au point d'étagement, soit une valeur absolue de débit de carburant inférieure à celle au point d'étagement.
- [0016] Le régulateur de distribution de carburant peut comprendre un mélangeur de carburant conçu pour recevoir une alimentation en carburant à la fois à partir des première et seconde sources de carburant et sortir du carburant de la première source de carburant, du carburant de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci. Le mélangeur de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes.
- [0017] Le mélangeur de carburant peut être conçu pour distribuer un mélange de carburant à partir de la première source de carburant et du carburant à partir de la seconde source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0018] Le mélangeur de carburant peut être conçu pour distribuer un mélange de carburant aux injecteurs de carburant pilotes ayant un rapport de mélange variable du carburant de la première source de carburant et du carburant de la seconde source de carburant, dans lequel le rapport de mélange peut être modifié dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule en fonction du débit de carburant.
- [0019] La proportion du carburant de la première source de carburant comparativement à celle de la seconde source de carburant peut être réduite avec la réduction d'un débit de carburant au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0020] La dépendance de la proportion de carburant provenant de la première source de carburant comparativement à celle provenant de la seconde source de carburant par rapport au débit de carburant est déterminée selon un niveau obtenu souhaité de nvPM

à un débit de carburant particulier, et peut être déterminée de telle sorte que les nvPM ne dépassent pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz. La production de nvPM peut être réduite au minimum sur le cycle LTO.

- [0021] Le mélangeur de carburant peut être conçu pour mélanger du carburant afin d'obtenir un niveau souhaité de nvPM sous une ou plusieurs conditions de fonctionnement du moteur à turbine à gaz dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0022] Le régulateur de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes afin de réduire au minimum une fonction de coût dépendant d'un ou plusieurs paramètres d'impact des nvPM. Le ou les paramètres d'impact des nvPM peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
 - [0023] i) la hauteur au-dessus du niveau du sol à laquelle se déroule la production de nvPM ;
 - [0024] ii) l'emplacement (par exemple, la longitude et la latitude) de la production de nvPM ;
 - [0025] iii) les conditions météorologiques et/ou atmosphériques à un emplacement de la production de nvPM ;
 - [0026] iv) les impacts climatiques associés à l'emplacement de la production de nvPM ;
 - [0027] v) la masse et/ou la taille des particules de nvPM individuelles produites ;
 - [0028] vi) la production potentielle de traînées de condensation et/ou les caractéristiques des traînées de condensation ;
 - [0029] vii) l'impact de la qualité de l'air locale (LAQ) de la production de nvPM ; et/ou
 - [0030] viii) la masse et/ou le nombre de nvPM.
- [0031] Le rapport de mélange fourni par le mélangeur de carburant peut être déterminé au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
 - [0032] a) la quantité de carburant ayant la première composition de carburant disponible pour un vol proposé (par exemple, estimation ou mesure de la quantité de carburant dans les réservoirs de carburant composant les première et seconde sources de carburant) ;
 - [0033] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant pilotes pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant ; et/ou
 - [0034] c) un paramètre de limite de composition de carburant (par exemple, une limite de certification, une composition de carburant disponible pour l'avitaillement, des limites d'aéronef/moteur).
- [0035] Selon un deuxième aspect, l'invention concerne un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, le moteur à turbine à gaz comprenant un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des in-

jecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée pouvant fonctionner dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale, le procédé comprenant :

- [0036] la régulation d'une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première,
- [0037] dans lequel la régulation de la distribution de carburant comprend la distribution du carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0038] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule peut être associé à un niveau de production de nvPM inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0039] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre la distribution du carburant à partir de la première source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à la fois dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale, et du carburant à partir de la seconde source de carburant aux injecteurs de carburant principaux pendant un fonctionnement dans la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0040] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre la distribution du carburant à partir de la première source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement dans au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule, et la distribution du carburant à partir de la seconde source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0041] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre le basculement de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes entre le carburant provenant de la première source de carburant et le carburant provenant de la seconde source de carburant à un ou plusieurs points de fonctionnement au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule ou à une limite de celle-ci.

- [0042] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre le basculement de la distribution du carburant aux injecteurs de carburant pilotes entre le carburant provenant de la première source de carburant et le carburant provenant de la seconde source de carburant selon un signal de mode indiquant un changement de la plage de fonctionnement du système de combustion étagée.
- [0043] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre en outre la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes entre le carburant provenant de la première source de carburant et le carburant provenant de la seconde source de carburant à un point seuil au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0044] Le point seuil peut être un débit de carburant seuil auquel la production de nvPM par le moteur à turbine à gaz passe une quantité seuil des nvPM produites par le moteur à turbine à gaz pendant un fonctionnement dans lequel les injecteurs de carburant pilotes reçoivent du carburant ayant la seconde caractéristique de carburant.
- [0045] En outre ou en variante, le point seuil peut être un débit de carburant seuil prédéfini qui est inférieur au débit de carburant à la limite entre le fonctionnement à injection pilote seule et le fonctionnement à injection pilote et principale d'une quantité prédéfinie.
- [0046] La régulation de l'alimentation en carburant peut comprendre :
- [0047] le mélange d'une alimentation en carburant à la fois des première et seconde sources de carburant pour former un carburant mélangé consistant en carburant provenant de la première source de carburant, carburant provenant de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci ; et
- [0048] la distribution du carburant mélangé aux injecteurs de carburant pilotes.
- [0049] La distribution du carburant mélangé peut comprendre la distribution d'un mélange de carburant provenant de la première source de carburant et de carburant provenant de la seconde source de carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0050] La distribution du carburant mélangé peut comprendre la distribution d'un mélange de carburant aux injecteurs de carburant pilotes ayant un rapport de mélange variable de carburant provenant de la première source de carburant et de carburant provenant de la seconde source de carburant, dans lequel le rapport de mélange est modifié dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule selon le débit de carburant.
- [0051] La proportion du carburant de la première source de carburant comparativement à celle de la seconde source de carburant peut être réduite avec la réduction d'un débit de carburant au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0052] La dépendance de la proportion de carburant provenant de la première source de carburant comparativement à celle provenant de la seconde source de carburant par

rapport au débit de carburant peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier, et peut être déterminée de telle sorte que les nvPM ne dépassent pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz.

- [0053] Le mélange du carburant peut comprendre le mélange de carburant afin d'atteindre un niveau souhaité de nvPM dans une ou plusieurs conditions de fonctionnement du moteur à turbine à gaz dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0054] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre la distribution du carburant aux injecteurs de carburant pilotes afin de réduire au minimum une fonction de coût dépendant d'un ou plusieurs paramètres d'impact des nvPM. Le ou les paramètres d'impact des nvPM peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
 - [0055] i) la hauteur au-dessus du niveau du sol à laquelle se déroule la production de nvPM ;
 - [0056] ii) l'emplacement de la production de nvPM ;
 - [0057] iii) les conditions météorologiques et/ou atmosphériques à l'emplacement de la production de nvPM ;
 - [0058] iv) les impacts climatiques associés à l'emplacement de la production de nvPM ;
 - [0059] v) la masse et/ou la taille des particules de nvPM individuelles produites ;
 - [0060] vi) la production potentielle de traînées de condensation et/ou les caractéristiques des traînées de condensation ;
 - [0061] vii) l'impact de la qualité de l'air locale (LAQ) de la production de nvPM ; et/ou
 - [0062] viii) la masse et/ou le nombre de nvPM.
- [0063] Le mélange du carburant peut comprendre le mélange du carburant à un rapport de mélange déterminé au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
 - [0064] a) la quantité de carburant ayant la première composition de carburant disponible pour un vol proposé ;
 - [0065] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant pilotes pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant ; et/ou
 - [0066] c) un paramètre de limite de composition de carburant.
- [0067] Selon un autre aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz selon le premier aspect, et éventuellement une ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus.
- [0068] Selon un troisième aspect, l'invention concerne un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, comprenant :

- [0069] un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée pouvant fonctionner dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle un carburant est distribué uniquement aux injecteurs de carburant pilotes, et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle un carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux ; et
- [0070] un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux, le régulateur de distribution de carburant étant conçu pour recevoir du carburant à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première, dans lequel :
- [0071] le système de combustion étagée est conçu pour basculer entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale à un point d'étagement qui correspond à un mode de fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur, le point d'étagement définissant une limite entre une première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur ; et
- [0072] le régulateur de distribution de carburant est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.
- [0073] Les inventeurs ont déterminé qu'il peut être avantageux de faire fonctionner un système de combustion étagée de sorte qu'il est en mode d'injection pilote seule pendant au moins une partie de son fonctionnement en régime de croisière, tout en fournissant sélectivement du carburant à partir de deux sources différentes à la chambre de combustion pendant le fonctionnement en régime de croisière. Les inventeurs ont déterminé qu'en réglant le point d'étagement de sorte que le fonctionnement en régime de croisière plus faible peut avoir lieu dans le mode à injection pilote seule, certaines émissions du moteur peuvent être réduites et l'efficacité de combustion améliorée. En combinaison avec l'utilisation sélective de carburants ayant des caractéristiques différentes, les inventeurs ont déterminé que des effets désavantageux sur les émissions qui autrement entraîneraient un déplacement du point d'étagement peuvent être atténués. Ceci donne donc une amélioration globale de l'efficacité de la combustion et une réduction des émissions par une combinaison de

ces facteurs.

- [0074] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut être associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.
- [0075] La première caractéristique de carburant peut correspondre à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut avoir une proportion plus élevée de SAF comparativement au carburant distribué pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.
- [0076] La première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie ultérieure d'un segment de croisière d'un vol, et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie relativement antérieure du segment de croisière.
- [0077] La première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé du moteur et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé du moteur.
- [0078] Le régulateur de distribution de carburant peut comprendre un mélangeur de carburant conçu pour recevoir une alimentation en carburant à la fois à partir des première et seconde sources de carburant et sortir du carburant de la première source de carburant, du carburant de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci. Le mélangeur de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes, et éventuellement aux injecteurs de carburant principaux.
- [0079] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de production de nvPM à un débit de carburant particulier au sein de la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur, et peut être déterminée de telle sorte que la production de nvPM ne dépasse pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz.
- [0080] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant

comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut être déterminée au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :

- [0081] a) la quantité de carburant ayant la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant disponible pour un vol proposé ;
- [0082] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant pilotes pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant ; et/ou
- [0083] c) un paramètre de limite de composition de carburant.
- [0084] Selon un quatrième aspect, l'invention concerne un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, le moteur à turbine à gaz comprenant un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle le carburant est distribué uniquement aux injecteurs de carburant pilotes, et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle le carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux, le procédé comprenant :
- [0085] la régulation d'une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première ;
- [0086] le basculement entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale à un point d'étagement pendant un mode de fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur pour définir une première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur ; et
- [0087] la distribution du carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.
- [0088] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut être associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de

carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.

[0089] La première caractéristique de carburant peut correspondre à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut avoir une proportion plus élevée de SAF comparativement au carburant distribué pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.

[0090] La première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie ultérieure d'un segment de croisière d'un vol, et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie relativement antérieure du segment de croisière.

[0091] La première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé du moteur et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé du moteur.

[0092] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre la distribution du carburant à partir de la première source de carburant, du carburant à partir de la seconde source de carburant, ou d'un mélange de ceux-ci à l'aide d'un mélangeur de carburant. Le mélangeur de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes, et éventuellement aux injecteurs de carburant principaux.

[0093] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de production de nvPM à un débit de carburant particulier au sein de la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur, et peut être déterminée de telle sorte que les nvPM ne dépassent pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz.

[0094] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut être déterminée au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :

[0095] a) la quantité de carburant ayant la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant disponible pour un vol proposé ;

[0096] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant pilotes

pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant ; et/ou

[0097] c) un paramètre de limite de composition de carburant.

[0098] Selon un autre aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz selon le troisième aspect, et éventuellement une ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus.

[0099] Selon un cinquième aspect, l'invention concerne un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, comprenant :

[0100] un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée pouvant fonctionner dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle un carburant est distribué seulement aux injecteurs de carburant pilotes, et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle un carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux à une vitesse relative définie par un rapport d'étagement à injection pilote et principale ; et

[0101] un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux, le régulateur de distribution de carburant étant conçu pour recevoir du carburant à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première, dans lequel :

[0102] le système de combustion étagée est en outre exploitable dans une plage de fonctionnement de transition entre les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale ;

[0103] dans la plage de fonctionnement de transition du carburant est distribué aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à un rapport d'étagement de transition qui est différent du rapport d'étagement d'injection pilote et principale ; et

[0104] le régulateur de distribution de carburant est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant la plage de fonctionnement de transition ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.

[0105] Les inventeurs ont déterminé qu'une région de transition qui peut être incluse permet une transition entre le rapport d'étagement d'injection pilote seule (100:0) et le rapport d'étagement d'injection pilote et principale choisi. Les inventeurs ont déterminé qu'en configurant le système de combustion étagée pour fonctionner dans une plage de

transition entre un fonctionnement à injection pilote et un fonctionnement à injection pilote et principale, la quantité d'émission de CO et de HC mise en œuvre dans cette plage de réglages de puissance du moteur peut être réduite. Les inventeurs ont également déterminé que tout changement préjudiciable aux émissions du moteur obtenues de la région de transition peut être atténué au moins en partie en utilisant du carburant ayant une caractéristique de carburant différente dans la plage de fonctionnement de transition comparativement à celle utilisée dans au moins un fonctionnement à injection pilote et principale.

- [0106] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué au moins aux injecteurs de carburant pilotes pendant la plage de fonctionnement de transition peut être associé à un niveau de production de nvPM inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0107] La première caractéristique de carburant peut correspondre à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué pendant la plage de fonctionnement de transition peut avoir une proportion de SAF plus élevée comparativement au carburant distribué pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0108] Le rapport d'étagement de transition peut présenter une variation continue avec une puissance moteur changeante à l'intérieur d'au moins une partie de la plage de fonctionnement de transition.
- [0109] La variation continue peut être telle que, dans la plage de fonctionnement de transition, la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant pilotes diminue avec l'augmentation de la puissance du moteur et la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant principaux augmente avec l'augmentation de la puissance du moteur.
- [0110] Le rapport d'étagement de transition peut avoir une valeur intermédiaire constante au sein d'au moins une partie de la plage de fonctionnement de transition qui est différente du rapport d'étagement d'injection pilote et principale. La valeur intermédiaire constante peut être comprise entre celle de la plage d'injection pilote seule et celle de la plage d'injection pilote et principale.
- [0111] Le rapport d'étagement de transition peut varier entre une série de valeurs intermédiaires constantes (c'est-à-dire différentes les unes des autres), chacune étant

différente du rapport d'étagement d'injection pilote et principale. Chaque valeur intermédiaire constante peut être comprise entre celle de la plage d'injection pilote seule et celle de la plage d'injection pilote et principale.

[0112] Le régulateur de distribution de carburant peut comprendre un mélangeur de carburant conçu pour recevoir une alimentation en carburant à la fois à partir des première et seconde sources de carburant et sortir du carburant de la première source de carburant, du carburant de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci. Le mélangeur de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes, et éventuellement aux injecteurs de carburant principaux.

[0113] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de production de nvPM à un débit de carburant particulier au sein de la plage de fonctionnement de transition, et peut être déterminée de telle sorte que la production de nvPM ne dépasse pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz.

[0114] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant pendant la plage de fonctionnement de transition peut être déterminée au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :

[0115] a) la quantité de carburant ayant la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant disponible pour un vol proposé ;

[0116] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant ; et/ou

[0117] c) un paramètre de limite de composition de carburant.

[0118] Selon un sixième aspect, l'invention concerne un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, le moteur à turbine à gaz comprenant un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle le carburant est distribué uniquement aux injecteurs de carburant pilotes, et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle le carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux à une vitesse relative définie par un rapport d'étagement à injection pilote et principale, le procédé comprenant :

[0119] la régulation d'une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant

ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première,

- [0120] le fonctionnement du système de combustion étagée dans une plage de fonctionnement de transition entre les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale dans lesquelles du carburant est fourni aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à un rapport d'étagement de transition qui est différent du rapport d'étagement à injection pilote et principale,
- [0121] dans lequel la régulation de la distribution de carburant comprend la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant la plage de fonctionnement de transition ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0122] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué au moins aux injecteurs de carburant pilotes pendant la plage de fonctionnement de transition peut être associé à un niveau de production de nvPM inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0123] La première caractéristique de carburant peut correspondre à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué pendant la plage de fonctionnement de transition peut avoir une proportion plus élevée de SAF comparativement au carburant distribué pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0124] Le rapport d'étagement de transition peut présenter une variation continue avec une puissance moteur changeante à l'intérieur d'au moins une partie de la plage de fonctionnement de transition.
- [0125] La variation continue peut être telle que, dans la plage de fonctionnement de transition, la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant pilotes diminue avec l'augmentation de la puissance du moteur et la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant principaux augmente avec l'augmentation de la puissance du moteur.
- [0126] Le rapport d'étagement de transition peut avoir une valeur intermédiaire constante au sein d'au moins une partie de la plage de fonctionnement de transition qui est différente

du rapport d'étagement d'injection pilote et principale, et éventuellement se situe entre celle de la plage d'injection pilote seule et celle de la plage d'injection pilote et principale.

- [0127] Le rapport d'étagement de transition peut varier entre une série de valeurs intermédiaires constantes, chacune étant différente du rapport d'étagement d'injection pilote et principale, et éventuellement chacune se situant entre celle de la plage d'injection pilote seule et celle de la plage d'injection pilote et principale.
- [0128] La régulation de la distribution de carburant peut comprendre la distribution du carburant à partir de la première source de carburant, du carburant à partir de la seconde source de carburant, ou d'un mélange de ceux-ci, à l'aide d'un mélangeur de carburant. Le mélangeur de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes, et éventuellement aux injecteurs de carburant principaux.
- [0129] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de production de nvPM à un débit de carburant particulier dans la plage de fonctionnement de transition. La proportion de carburant peut être déterminée de telle sorte que la production de nvPM ne dépasse pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz.
- [0130] La proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant pendant la plage de fonctionnement de transition peut être déterminée au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
 - [0131] a) la quantité de carburant ayant la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant disponible pour un vol proposé ;
 - [0132] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant ; et/ou
 - [0133] c) un paramètre de limite de composition de carburant.
- [0134] Selon un autre aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz selon le cinquième aspect, et éventuellement une ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus.
- [0135] Selon un septième aspect, l'invention concerne un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, comprenant :
 - [0136] un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée pouvant fonctionner

dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle un carburant est distribué uniquement aux injecteurs de carburant pilotes, et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle un carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux ; et

- [0137] un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux, le régulateur de distribution de carburant étant conçu pour recevoir du carburant à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première, dans lequel :
- [0138] le système de combustion étagée est conçu pour fonctionner dans un mode d'accélération dans lequel l'accélération du moteur à partir d'un mode de fonctionnement à l'état stabilisé est provoquée ; et
- [0139] Le régulateur de distribution de carburant est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux, pendant un fonctionnement dans au moins une partie du mode d'accélération, ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé.
- [0140] Pour réduire la production de quantités excessives de nvPM lors de l'accélération, on sait basculer vers un mode de fonctionnement d'« accélération » d'un moteur à turbine à gaz dans lequel se produit le point d'étagement à un réglage de puissance moteur plus faible. Les inventeurs ont observé que le basculement vers un tel mode d'accélération connu peut toutefois présenter un certain nombre d'inconvénients. Par exemple, une augmentation des émissions de HC et de CO peut être provoquée. Dans un mode d'accélération de la présente demande le régulateur de distribution de carburant est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant (c'est-à-dire les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux) ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant (c'est-à-dire les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux) pendant au moins une partie du mode de fonctionnement en régime stabilisé. Les inventeurs ont déterminé que des émissions de nvPM accrues lorsque le moteur fonctionne en mode d'accélération peuvent être évitées ou réduites en utilisant un carburant avec des caractéristiques différentes de celui qui est utilisé pendant un fonctionnement à l'état stabilisé. Ceci peut permettre au point d'étagement lors du mode d'accélération de rester identique ou similaire à celui du mode de fonctionnement à l'état stabilisé, évitant ou réduisant/limitant une augmentation désavantageuse des émissions de HC ou de CO.
- [0141] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production

de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Le carburant distribué au moins aux injecteurs de carburant pilotes pendant le mode d'accélération peut être associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant un fonctionnement dans le mode à l'état stabilisé.

- [0142] La première caractéristique de carburant peut correspondre à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué pendant le mode d'accélération peut avoir une proportion plus élevée de SAF.
- [0143] Le système de combustion étagée peut être conçu pour basculer entre un fonctionnement dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale à un point d'étagement.
- [0144] Le point d'étagement peut être à une puissance moteur identique ou supérieure dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé.
- [0145] Le point d'étagement peut être à une puissance moteur inférieure dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé et est à une puissance plus élevée qu'un point d'étagement par défaut selon lequel le système de combustion étagée est commandé lorsque du carburant d'une caractéristique différente ne peut pas être fourni au système de combustion.
- [0146] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération qui a une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant principaux pendant un fonctionnement à injection pilote et principale dans le mode de fonctionnement à l'état stabilisé du moteur.
- [0147] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant pendant la plage de fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération ayant une caractéristique de carburant déterminée en fonction d'un paramètre de commande dont dépend la production de nvPM par le moteur.
- [0148] Le paramètre de commande peut être un rapport carburant-air dans une chambre de combustion du système de combustion étagée.
- [0149] À mesure que le rapport carburant-air diminue, la proportion de carburant associée à la faible production de nvPM distribué aux injecteurs de carburant pilotes peut également être diminuée.
- [0150] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour basculer la distribution de carburant vers les injecteurs de carburant principaux et/ou pilotes vers celui ayant une caractéristique de carburant différente à un point de départ d'une période de fonctionnement dans le mode d'accélération.

- [0151] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour revenir à la distribution de carburant ayant la même caractéristique de carburant que celui distribué dans le mode à l'état stabilisé après une transition vers un fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0152] Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant le mode d'accélération à une vitesse supérieure à celle suffisante pour maintenir le fonctionnement à l'état stabilisé du moteur.
- [0153] Selon un huitième aspect, l'invention concerne un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, le moteur à turbine à gaz comprenant un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle le carburant est distribué uniquement aux injecteurs de carburant pilotes, et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle le carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux, le procédé comprenant :
 - [0154] la régulation d'une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à partir d'une première source de carburant contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première ;
 - [0155] le fonctionnement du système de combustion étagée dans un mode d'accélération dans lequel l'accélération du moteur à partir d'un mode de fonctionnement à l'état stabilisé est provoquée ; et
 - [0156] la distribution de carburant vers les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux, pendant le fonctionnement dans au moins une partie du mode d'accélération, ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé.
- [0157] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué au moins aux injecteurs de carburant pilotes pendant le mode d'accélération peut être associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant un fonctionnement dans le mode à l'état stabilisé.
- [0158] La première caractéristique de carburant peut correspondre à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué pendant le mode d'accélération peut

avoir une proportion plus élevée de SAF.

- [0159] Le système de combustion étagée peut être conçu pour basculer entre un fonctionnement dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale à un point d'étagement.
- [0160] Le point d'étagement peut être à une puissance moteur identique ou supérieure dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé.
- [0161] Le point d'étagement peut être à une puissance moteur inférieure dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé, et peut être à une puissance supérieure à un point d'étagement par défaut selon lequel le système de combustion étagée est commandé lorsque du carburant d'une caractéristique différente ne peut pas être fourni au système de combustion.
- [0162] Le carburant peut être distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération qui a une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant principaux pendant un fonctionnement à injection pilote et principale dans le mode de fonctionnement à l'état stabilisé du moteur.
- [0163] La distribution de carburant aux injecteurs de carburant peut comprendre la distribution du carburant pendant la plage de fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération ayant des caractéristiques de carburant basées sur un paramètre de commande dont dépend la production de nvPM par le moteur. Le paramètre de commande peut être un rapport carburant-air dans une chambre de combustion du système de combustion étagée. À mesure que le rapport carburant-air diminue, la proportion de carburant associée à la faible production de nvPM distribué aux injecteurs de carburant pilotes peut également être diminuée.
- [0164] La distribution de carburant aux injecteurs de carburant peut comprendre le basculement de la distribution de carburant vers les injecteurs de carburant principaux et/ou pilotes vers celui ayant une caractéristique de carburant différente à un point de départ d'une période de fonctionnement dans le mode d'accélération.
- [0165] La distribution de carburant aux injecteurs de carburant peut comprendre le retour à la distribution de carburant ayant la même caractéristique de carburant que celui distribué dans le mode à l'état stabilisé après une transition vers un fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0166] Pendant le mode d'accélération du carburant peut être distribué aux injecteurs de carburant à une vitesse supérieure à celle suffisante pour maintenir le fonctionnement à l'état stabilisé.
- [0167] Selon un autre aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz selon le septième aspect, et éventuellement une ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus.

- [0168] Selon un neuvième aspect, l'invention concerne un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, comprenant :
- [0169] un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale ; et
- [0170] un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux ;
- [0171] un module de détermination de caractéristiques de carburant configuré pour déterminer une ou plusieurs caractéristiques de carburant du carburant en cours de distribution dans le système de combustion étagée ; et
- [0172] un dispositif de commande configuré pour déterminer un point d'étagement définissant le point auquel le système de combustion étagée est basculé entre un fonctionnement à injection pilote seule et un fonctionnement à injection pilote et principale, le point d'étagement étant déterminé en fonction de la ou des caractéristiques de carburant déterminées, et le dispositif de commande étant configuré pour commander le système de combustion étagée en fonction du point d'étagement déterminé.
- [0173] Les inventeurs ont déterminé que le point d'étagement selon lequel un système de combustion étagée est commandé peut être déterminé en fonction des caractéristiques du carburant fourni à la chambre de combustion. Comme indiqué ci-dessus en liaison avec les troisième, quatrième, septième et huitième aspects, le point d'étagement peut être commandé dans les cas où le carburant de caractéristiques différentes est disponible pour réduire certaines émissions du moteur.
- [0174] La ou les caractéristiques de carburant peuvent indiquer que le carburant est associé à un niveau de production de nvPM inférieur comparativement à du kérosène fossile.
- [0175] La ou les caractéristiques de carburant peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0176] (i) un pourcentage de carburant d'aviation durable dans le carburant ;
- [0177] (ii) une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant ; et/ou
- [0178] (iii) une teneur en naphtalène du carburant.
- [0179] Le dispositif de commande peut être configuré pour déterminer le point d'étagement de telle sorte qu'un point d'étagement associé à une ou plusieurs caractéristiques de carburant qui indiquent que le carburant est associé à une production de nvPM faible correspond à un réglage de puissance moteur plus élevé comparativement à un point d'étagement associé à une ou plusieurs caractéristiques de carburant qui indiquent que le carburant est associé à une production de nvPM relativement plus élevée.
- [0180] Le point d'étagement déterminé peut être un point d'étagement de régime de croisière, et le dispositif de commande peut être configuré pour commander le système

de combustion en utilisant le point d'étagement déterminé pendant une condition de fonctionnement en régime de croisière du moteur.

- [0181] Le dispositif de commande peut être configuré pour déterminer le point d'étagement de telle sorte que le système de combustion étagée est conçu pour basculer entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale à un point d'étagement qui correspond à un mode de fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur, le point d'étagement définissant une limite entre une première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.
- [0182] La première plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie ultérieure d'un segment de croisière d'un vol, et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie relativement antérieure du segment de croisière.
- [0183] La première plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé du moteur et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur correspond à un fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé du moteur.
- [0184] Le point d'étagement déterminé peut être un point d'étagement d'accélération de moteur, et le dispositif de commande peut être configuré pour commander le système de combustion étagée en utilisant le point d'étagement déterminé pendant une condition de fonctionnement d'accélération du moteur. Le point d'étagement d'accélération de moteur peut être déterminé pour être identique (par exemple, réglé pour être identique) à un point d'étagement de régime de croisière en réponse à la ou aux caractéristiques de carburant.
- [0185] Selon un dixième aspect, l'invention concerne un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, le moteur à turbine à gaz comprenant un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée pouvant fonctionner dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale, le procédé comprenant :
 - [0186] la détermination d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant d'un carburant en cours de distribution dans le système de combustion étagée ;
 - [0187] la détermination d'un point d'étagement, définissant le point auquel le système de combustion étagée est basculé entre le fonctionnement à injection pilote seule et le fonctionnement à injection pilote et principale, en fonction de la ou des caractéristiques de carburant déterminées ; et
 - [0188] la commande du système de combustion étagée selon le point d'étagement déterminé.

- [0189] La ou les caractéristiques de carburant peuvent indiquer que le carburant est associé à un niveau de production de nvPM inférieur comparativement à du kérosène fossile.
- [0190] La ou les caractéristiques de carburant incluent l'un quelconque ou plusieurs parmi :
- [0191] (i) un pourcentage de carburant d'aviation durable dans le carburant ;
- [0192] (ii) une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant ; et/ou
- [0193] (iii) une teneur en naphthalène du carburant.
- [0194] La détermination du point d'étagement peut comprendre la détermination du point d'étagement de telle sorte qu'un point d'étagement associé à une ou plusieurs caractéristiques de carburant qui indiquent que le carburant est associé à une production de nvPM faible correspond à un réglage de puissance moteur plus élevé par rapport à un point d'étagement associé à une ou plusieurs caractéristiques de carburant qui indiquent que le carburant est associé à une production de nvPM relativement plus élevée.
- [0195] Le point d'étagement déterminé peut être un point d'étagement de régime de croisière, et le système de combustion peut être commandé en utilisant le point d'étagement déterminé pendant une condition de fonctionnement en régime de croisière du moteur.
- [0196] Le point d'étagement peut être déterminé de telle sorte que le système de combustion étagée est conçu pour basculer entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale à un point d'étagement qui correspond à un mode de fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur. Le point d'étagement peut définir une limite entre une première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur.
- [0197] La première plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie ultérieure d'un segment de croisière d'un vol, et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie relativement antérieure du segment de croisière.
- [0198] La première plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé du moteur et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé du moteur.
- [0199] Le point d'étagement déterminé peut être un point d'étagement d'accélération de moteur, et le système de combustion étagée peut être commandé en utilisant le point d'étagement déterminé pendant une condition de fonctionnement d'accélération du moteur. Le point d'étagement d'accélération de moteur peut être déterminé pour être identique à un point d'étagement de régime de croisière en réponse aux une ou plusieurs caractéristiques de carburant.

- [0200] Selon un onzième aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz selon le neuvième aspect, et éventuellement une ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus.
- [0201] Selon un douzième aspect, l'invention concerne un moteur à turbine à gaz pour un aéronef, comprenant :
- [0202] un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale ;
- [0203] un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux ;
- [0204] un module de détermination de caractéristiques de carburant configuré pour déterminer une ou plusieurs caractéristiques de carburant du carburant en cours de distribution dans le système de combustion étagée ; et
- [0205] un dispositif de commande configuré pour déterminer un rapport d'étagement définissant le rapport entre le flux de carburant de l'injecteur de carburant pilote et le flux de carburant de l'injecteur de carburant principal, le rapport d'étagement étant déterminé en fonction de la ou des caractéristiques du carburant, et le dispositif de commande étant configuré pour commander le système de combustion étagée en fonction du rapport d'étagement déterminé.
- [0206] Les inventeurs ont déterminé que le rapport d'étagement peut être déterminé en fonction de la ou des caractéristiques de carburant afin de gérer plus efficacement les émissions du moteur. Ceci peut, par exemple, permettre au rapport d'étagement d'être ajusté pour réduire la production de CO et de HC d'une manière qui autrement conduirait à des niveaux élevés de production de nvPM comme indiqué en liaison avec le cinquième et le sixième aspect ci-dessus.
- [0207] La ou les caractéristiques de carburant peuvent indiquer que le carburant est associé à un niveau de production de nvPM inférieur comparativement à du kérosène fossile.
- [0208] La ou les caractéristiques de carburant peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0209] (i) un pourcentage de carburant d'aviation durable dans le carburant ;
- [0210] (ii) une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant ; et/ou
- [0211] (iii) une teneur en naphtalène du carburant.
- [0212] Le dispositif de commande peut être configuré pour :
- [0213] commander le système de combustion étagée pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale selon un rapport d'étagement à injection pilote et principale, et dans lequel le rapport d'étagement déterminé selon la ou les caractéristiques de carburant est un rapport d'étagement de transition ; et

- [0214] commander le système de combustion étagée de sorte qu'il est actionné dans une plage de fonctionnement de transition entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale, dans lequel, à l'intérieur de la plage de fonctionnement de transition, le système de combustion étagée est commandé selon le rapport d'étagement de transition, le rapport d'étagement de transition étant différent du rapport d'étagement d'injection pilote et principale.
- [0215] Le rapport d'étagement de transition peut présenter une variation continue avec une puissance moteur changeante à l'intérieur de la plage de fonctionnement de transition.
- [0216] La variation continue peut être telle que la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant pilotes diminue avec l'augmentation de la puissance du moteur. La proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant principaux peut diminuer avec l'augmentation de la puissance du moteur dans la plage de fonctionnement de transition.
- [0217] Le rapport d'étagement de transition peut varier entre une série de valeurs intermédiaires constantes, chacune étant différente du rapport d'étagement à injection pilote et principale. Chaque valeur intermédiaire peut être comprise entre celle de la plage d'injection pilote seule et celle de la plage d'injection pilote et principale.
- [0218] Selon un treizième aspect, l'invention concerne un moteur à turbine à gaz comprenant un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée pouvant fonctionner dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale, le procédé comprenant :
- [0219] la détermination d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant d'un carburant en cours de distribution dans le système de combustion étagée ;
- [0220] la détermination d'un rapport d'étagement définissant le rapport entre le flux de carburant de l'injecteur de carburant pilote et le flux de carburant de l'injecteur de carburant principal, le rapport d'étagement étant déterminé selon la ou les caractéristiques de carburant ; et
- [0221] la commande du système de combustion étagée selon le rapport d'étagement déterminé.
- [0222] La ou les caractéristiques de carburant peuvent indiquer que le carburant est associé à un niveau de production de nvPM inférieur comparativement à du kérosène fossile.
- [0223] La ou les caractéristiques de carburant peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0224] (i) un pourcentage de carburant d'aviation durable dans le carburant ;
- [0225] (ii) une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant ; et/ou

- [0226] (iii) une teneur en naphthalène du carburant.
- [0227] La détermination du rapport d'étagement peut comprendre la détermination d'un rapport d'étagement de transition ; et
- [0228] la commande du système de combustion étagée peut comprendre la commande du système de combustion étagée de sorte qu'il est actionné dans une plage de fonctionnement de transition entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Dans la plage de fonctionnement de transition le système de combustion étagée peut être commandé selon le rapport d'étagement de transition, le rapport d'étagement de transition peut être différent d'un rapport d'étagement à injection pilote et principale selon lequel la chambre de combustion étagée est commandée pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0229] Le rapport d'étagement de transition peut présenter une variation continue avec une puissance moteur changeante à l'intérieur de la plage de fonctionnement de transition.
- [0230] La variation continue peut être telle que la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant pilotes diminue avec l'augmentation de la puissance du moteur, et la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant principaux augmente avec l'augmentation de la puissance du moteur dans la plage de fonctionnement de transition.
- [0231] Le rapport d'étagement de transition peut varier entre une série de valeurs intermédiaires constantes, chacune étant différente du rapport d'étagement à injection pilote et principale. Chaque valeur intermédiaire peut être comprise entre celle de la plage d'injection pilote seule et celle de la plage d'injection pilote et principale.
- [0232] Selon un quatorzième aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz selon le treizième aspect, et éventuellement une ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus.
- [0233] Selon un quinzième aspect, l'invention concerne un procédé mis en œuvre par ordinateur pour déterminer une attribution de carburant pour un aéronef, dans lequel :
- [0234] l'aéronef comprend une première source de carburant conçue pour contenir un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et une seconde source de carburant conçue pour contenir un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première ;
- [0235] l'aéronef comprend un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz alimentés par du carburant provenant des première et seconde sources de carburant ;
- [0236] le ou les moteurs à turbine à gaz comprennent chacun un système de combustion

étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale ;

- [0237] le ou les moteurs à turbine à gaz comprennent chacun un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à partir de la première source de carburant et de la seconde source de carburant,
- [0238] le procédé comprenant :
- [0239] l'obtention d'une description de mission proposée comprenant une liste de points de fonctionnement pour le ou les moteurs à turbine à gaz pendant la mission ;
- [0240] l'obtention de paramètres d'impact des nvPM (matières particulaires non volatiles) pour le ou les moteurs à turbine à gaz, les paramètres d'impact étant associés à chaque point de fonctionnement de la mission proposée en utilisant du carburant provenant de la première source de carburant, du carburant provenant de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci ;
- [0241] le calcul d'un ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant pour chaque point de fonctionnement de la mission proposée défini dans la description de mission en fonction des paramètres d'impact des nvPM ; et
- [0242] la détermination d'une attribution de carburant en fonction de l'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant.
- [0243] Les inventeurs ont déterminé que par le calcul de l'attribution de carburant de cette façon, le carburant peut être attribué à une mission de sorte que le carburant ayant les caractéristiques requises peut être fourni à l'aéronef pour qu'il réalise la mission proposée tout en réduisant l'impact des nvPM. Ceci peut permettre une meilleure utilisation des caractéristiques du carburant disponible dans la réduction des nvPM comparativement à un chargement d'une quantité définie de différents types de carburant disponibles, quelle que soit la mission à réaliser en utilisant ce carburant.
- [0244] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant.
- [0245] En outre ou en variante, la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant peuvent être un pourcentage de SAF présent dans le carburant respectif.
- [0246] Chaque point de fonctionnement de la description de mission peut inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi : une ou plusieurs conditions de fonctionnement dans lesquelles les moteurs à turbine à gaz doivent fonctionner, une ou plusieurs valeurs de débit de carburant correspondant à un point de fonctionnement, et/ou une durée de fonctionnement à un point de fonctionnement correspondant.

- [0247] Les paramètres d'impact des nvPM peuvent inclure un paramètre d'impact des nvPM définissant une quantité de nvPM produite par le moteur à turbine à gaz respectif pour différentes caractéristiques de carburant respectives comprenant le premier carburant, le second carburant, ou un mélange de ceux-ci à chaque point de fonctionnement de la description de vol.
- [0248] L'attribution de carburant peut inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0249] i) une quantité de carburant attribuée à chacune des première et seconde sources de carburant ;
- [0250] ii) la première caractéristique de carburant ;
- [0251] iii) la seconde caractéristique de carburant ; et/ou
- [0252] iv) un rapport de mélange de carburant.
- [0253] Le procédé peut en outre comprendre la détermination d'un ou plusieurs paramètres d'utilisation de carburant correspondant à l'attribution de carburant. Les paramètres d'utilisation de carburant peuvent définir la façon d'utiliser le carburant lors de la mission définie par la description de mission. Le ou les paramètres d'utilisation de carburant peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0254] i) une planification de mélange selon laquelle du carburant provenant de la première source de carburant et de la seconde source de carburant est mélangé par le régulateur de distribution de carburant ;
- [0255] ii) une planification de basculement selon laquelle le régulateur de distribution de carburant est configuré pour basculer entre une distribution de carburant à partir de la première source de carburant et de la seconde source de carburant ;
- [0256] iii) une attribution de réservoirs de carburant prévus dans l'aéronef pour former la première source de carburant et la seconde source de carburant ; et/ou
- [0257] iv) un réglage de vanne d'isolement pour des réservoirs de carburant formant la première source de carburant et la seconde source de carburant.
- [0258] L'ensemble optimisé de la ou des caractéristiques de carburant peut en outre être déterminé en fonction d'un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0259] i) la plage réalisable de caractéristiques de carburant qui peut être fournie par le régulateur de distribution de carburant ;
- [0260] ii) une quantité totale d'un carburant non par défaut attribué à la mission ;
- [0261] iii) une exigence totale de carburant pour la mission ;
- [0262] iv) les capacités des réservoirs de carburant de l'aéronef ; et/ou
- [0263] v) des restrictions sur la façon dont les réservoirs de carburant d'aéronef peuvent être attribués à la première ou à la seconde source de carburant.
- [0264] Le calcul de l'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant peut comprendre la réduction au minimum d'une fonction de coût dépendant du ou des paramètres d'impact des nvPM.

- [0265] Le ou les paramètres d'impact des nvPM peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0266] i) la hauteur au-dessus du niveau du sol à laquelle se déroule la production de nvPM ;
- [0267] ii) l'emplacement de la production de nvPM ;
- [0268] iii) les conditions météorologiques et/ou atmosphériques à un emplacement de la production de nvPM ;
- [0269] iv) les impacts climatiques associés à l'emplacement de la production de nvPM ;
- [0270] v) la masse/taille des particules de nvPM individuelles produites ;
- [0271] vi) la production potentielle de traînées de condensation et/ou les caractéristiques des traînées de condensation ;
- [0272] vii) l'impact de la qualité de l'air locale (LAQ) de la production de nvPM ; et/ou
- [0273] viii) la quantité de nvPM produites (par ex. masse et/ou nombre).
- [0274] Selon un seizième aspect, l'invention concerne un procédé de chargement de carburant sur un aéronef, comprenant :
- [0275] la détermination d'une attribution de carburant en utilisant le procédé selon le quinzième aspect et éventuellement l'une quelconque ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus ; et
- [0276] le chargement du carburant sur l'aéronef en fonction de l'attribution de carburant.
- [0277] Selon un dix-septième aspect, l'invention concerne un support non transitoire lisible par ordinateur sur lequel sont stockées des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un processeur, amènent le processeur à mettre en œuvre le procédé du quinzième aspect et éventuellement une ou plusieurs quelconques déclarations associées ci-dessus.
- [0278] Selon un dix-huitième aspect, l'invention concerne un système de détermination d'attribution de carburant pour déterminer une attribution de carburant pour un aéronef, le système de détermination d'attribution de carburant comprenant un dispositif informatique configuré pour mettre en œuvre le procédé du quinzième aspect et éventuellement une ou plusieurs quelconques déclarations associées ci-dessus.
- [0279] Selon un dix-neuvième aspect, l'invention concerne un système de détermination d'attribution de carburant pour déterminer une attribution de carburant pour un aéronef, dans lequel :
- [0280] l'aéronef comprend une première source de carburant conçue pour contenir un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et une seconde source de carburant conçue pour contenir un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première ;
- [0281] l'aéronef comprend un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz alimentés par du carburant provenant des première et seconde sources de carburant ;

- [0282] le ou les moteurs à turbine à gaz comprennent chacun un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale ;
- [0283] le ou les moteurs à turbine à gaz comprennent chacun un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à partir de la première source de carburant et de la seconde source de carburant,
- [0284] le système de détermination de paramètres de chargement de carburant comprenant :
- [0285] un module d'obtention de description de mission configuré pour obtenir une description de mission proposée comprenant une liste de conditions de fonctionnement pour le ou les moteurs à turbine à gaz pendant la mission ;
- [0286] un module d'obtention de paramètres d'impact configuré pour obtenir des paramètres d'impact des nvPM pour le ou les moteurs à turbine à gaz, les paramètres d'impact étant associés à chaque point de fonctionnement de la mission proposée en utilisant des compositions de carburant qui incluent du carburant provenant de la première source de carburant, du carburant provenant de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci ;
- [0287] un module de calcul de caractéristiques de carburant configuré pour calculer un ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant pour chaque point de fonctionnement de la mission proposée définie dans la description de mission en fonction des paramètres d'impact des nvPM ; et
- [0288] un module de détermination d'attribution de carburant configuré pour déterminer une attribution de carburant en fonction de l'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant.
- [0289] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant.
- [0290] En outre ou en variante, la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant peuvent être un pourcentage de SAF présent dans le carburant respectif.
- [0291] Chacun des points de fonctionnement de la description de mission obtenue par le module d'obtention de description de mission peut inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi : une ou plusieurs conditions de fonctionnement dans lesquelles les moteurs à turbine à gaz doivent fonctionner, une ou plusieurs valeurs de débit de carburant correspondant à un point de fonctionnement, et/ou une durée de fonctionnement à un point de fonctionnement correspondant.
- [0292] Les paramètres d'impact des nvPM obtenus par le module d'obtention de paramètres

d'impact peuvent inclure un paramètre d'impact des nvPM définissant une quantité de nvPM produite par le moteur à turbine à gaz respectif pour différentes caractéristiques de carburant respectives comprenant le premier carburant, le second carburant, ou un mélange de ceux-ci à chaque point de fonctionnement de la description de mission.

[0293] L'attribution de carburant déterminée par le module de détermination d'attribution de carburant peut inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :

[0294] i) une quantité de carburant attribuée à chacune des première et seconde sources de carburant ;

[0295] ii) la première caractéristique de carburant ;

[0296] iii) la seconde caractéristique de carburant ; et/ou

[0297] iv) un rapport de mélange de carburant.

[0298] Le système de détermination d'attribution de carburant peut en outre comprendre un module de détermination de paramètres d'utilisation de carburant configuré pour déterminer un ou plusieurs paramètres d'utilisation de carburant correspondant à l'attribution de carburant, les paramètres d'utilisation de carburant définissant de quelle façon le carburant doit être utilisé pendant la mission définie par la description de mission.

[0299] Le ou les paramètres d'utilisation de carburant peuvent éventuellement inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :

[0300] i) une planification de mélange selon laquelle du carburant provenant de la première source de carburant et de la seconde source de carburant est mélangé par le régulateur de distribution de carburant ;

[0301] ii) une planification de basculement selon laquelle le régulateur de distribution de carburant est configuré pour basculer entre une distribution de carburant à partir de la première source de carburant et de la seconde source de carburant ;

[0302] iii) une attribution de réservoirs de carburant prévus dans l'aéronef pour former la première source de carburant et la seconde source de carburant ; et/ou

[0303] iv) un réglage de vanne d'isolement pour des réservoirs de carburant formant la première source de carburant et la seconde source de carburant.

[0304] L'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant déterminées par le module de calcul de caractéristiques de carburant peut en outre être déterminé en fonction d'un ou plusieurs éléments quelconques parmi :

[0305] i) la plage réalisable de caractéristiques de carburant qui peut être fournie par le régulateur de distribution de carburant ;

[0306] ii) une quantité totale d'un carburant non par défaut attribué à la mission ;

[0307] iii) une exigence totale de carburant pour la mission ;

[0308] iv) les capacités des réservoirs de carburant de l'aéronef ; et/ou

[0309] v) des restrictions sur la façon dont les réservoirs de carburant d'aéronef peuvent être

attribués à la première ou à la seconde source de carburant.

- [0310] Le module de calcul de caractéristiques de carburant peut être configuré pour calculer l'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant en réduisant au minimum une fonction de coût dépendant du ou des paramètres d'impact des nvPM.
- [0311] Le ou les paramètres d'impact des nvPM peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
 - [0312] i) la hauteur au-dessus du niveau du sol à laquelle se déroule la production de nvPM ;
 - [0313] ii) l'emplacement de la production de nvPM ;
 - [0314] iii) les conditions météorologiques et/ou atmosphériques à un emplacement de la production de nvPM ;
 - [0315] iv) les impacts climatiques associés à l'emplacement de la production de nvPM ;
 - [0316] v) la masse des particules de nvPM produites ;
 - [0317] vi) la production potentielle de traînées de condensation et/ou les caractéristiques des traînées de condensation ;
 - [0318] vii) l'impact de la qualité de l'air locale (LAQ) de la production de nvPM ; et/ou
 - [0319] viii) la quantité de nvPM produites (par exemple masse/nombre).
- [0320] Selon un vingtième aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant :
 - [0321] une première source de carburant conçue pour contenir un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et une seconde source de carburant conçue pour contenir un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première ;
 - [0322] un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz alimentés par du carburant provenant des première et seconde sources de carburant, dans lequel :
 - [0323] le ou les moteurs à turbine à gaz comprennent chacun un système de combustion étagée ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux, le système de combustion étagée étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale ;
 - [0324] le ou les moteurs à turbine à gaz comprennent chacun un régulateur de distribution de carburant conçu pour commander une distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à partir de la première source de carburant, de la seconde source de carburant, ou d'un mélange de ceux-ci ; et
 - [0325] un système de détermination d'attribution de carburant selon le dix-huitième ou dix-neuvième aspect et éventuellement l'une quelconque ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus.
 - [0326] Selon un vingt et unième aspect, l'invention concerne un procédé mis en œuvre par ordinateur pour déterminer une attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour une

pluralité de missions effectuées par une pluralité d'aéronefs, la pluralité de missions étant alimentée en carburant à partir d'une source de carburant comprenant une quantité d'un carburant par défaut et une quantité d'un carburant non par défaut, l'attribution de carburant indiquant la quantité du carburant non par défaut et le carburant par défaut à attribuer à chaque mission de la pluralité de missions, le carburant par défaut et le carburant non par défaut ayant une ou plusieurs caractéristiques de carburant différentes les unes des autres, le procédé comprenant :

- [0327] l'obtention d'une attribution de carburant proposée initiale pour chaque mission de la pluralité de missions ;
- [0328] la réalisation d'une optimisation à l'échelle de la flotte dans laquelle l'attribution de carburant proposée de chaque mission de la pluralité de missions est modifiée dans les limites des contraintes du carburant par défaut et/ou non par défaut disponible total de la source de carburant pour réduire au minimum une somme de paramètres d'impact des nvPM par mission sur la totalité de la pluralité de missions, chaque mission de la pluralité de missions étant associée à un paramètre respectif d'impact des nvPM par mission déterminé selon une utilisation de carburant pour cette mission, l'utilisation de carburant définissant de quelle façon l'attribution de carburant pour la mission respective doit être utilisée pendant cette mission ; et
- [0329] la détermination de l'attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour la pluralité de missions en fonction de l'optimisation à l'échelle de la flotte.
- [0330] Les inventeurs ont déterminé que le carburant disponible pour une pluralité de missions peut être partagé intelligemment entre ces missions afin d'utiliser avantageusement des types de carburant différents disponibles. Cela permet de partager le carburant moins disponible entre les missions afin de l'utiliser plus efficacement, par exemple de telle sorte que l'impact global des nvPM des missions est réduit.
- [0331] Le carburant non par défaut peut être associé à un niveau de production de nvPM inférieur à celui du carburant par défaut.
- [0332] Le carburant non par défaut peut être formé à partir d'un mélange d'un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, différente de la première.
- [0333] Les première et seconde caractéristiques de carburant peuvent être un pourcentage de SAF au sein du carburant respectif. Le carburant non par défaut peut être un carburant riche en SAF et le carburant par défaut peut être un carburant relativement pauvre en SAF (c'est-à-dire ayant une teneur en SAF inférieure comparativement au carburant riche en SAF).
- [0334] La réalisation de l'optimisation à l'échelle de la flotte peut comprendre :
- [0335] i) la réalisation d'une optimisation en boucle externe dans laquelle l'attribution de carburant d'une ou plusieurs missions de la pluralité de missions est modifiée pour

réduire la somme des paramètres d'impact des nvPM par mission de la pluralité de missions ; et

- [0336] ii) la réalisation d'une optimisation en boucle interne dans laquelle l'utilisation de carburant pour chaque mission de la pluralité de missions est obtenue en fonction des contraintes de l'attribution de carburant modifiée pour déterminer une nouvelle utilisation de carburant proposée pour chaque mission de la pluralité de missions.
- [0337] Les étapes i) et ii) peuvent être répétées jusqu'à ce qu'une utilisation optimisée de carburant pour chaque mission de la pluralité de missions soit déterminée ce qui correspond à une somme réduite au minimum des paramètres d'impact des nvPM par mission.
- [0338] L'optimisation en boucle interne peut comprendre l'obtention d'une solution préalablement préparée pour l'utilisation de carburant pour une mission respective.
- [0339] L'attribution de carburant proposée pour chaque mission de la pluralité de missions peut être obtenue en obtenant une utilisation optimisée de carburant pour la mission respective définissant de quelle façon le carburant doit être utilisé pour réduire au minimum le paramètre d'impact des nvPM par mission pour cette mission.
- [0340] L'utilisation optimisée de carburant pour chaque mission peut être obtenue en effectuant une optimisation par mission.
- [0341] L'optimisation par mission peut comprendre, pour chaque mission respective :
- [0342] la détermination d'un type et/ou de capacités opérationnelles d'une chambre de combustion utilisée par l'aéronef respectif utilisé pour la mission ;
- [0343] la détermination d'une exigence totale de carburant pour la mission respective ;
- [0344] la détermination d'une quantité de carburant requise pour chaque type d'injecteur de carburant fourni dans la chambre de combustion pour la mission respective où plus d'un type d'injecteur est fourni ;
- [0345] la détermination de la dépendance d'émissions de nvPM pour chaque point de fonctionnement de moteur de la mission en utilisant du carburant ayant les caractéristiques du carburant par défaut, du carburant non par défaut, ou d'un mélange de ceux-ci ; et
- [0346] la détermination d'un usage optimisé de carburant qui réduit au minimum les émissions de nvPM totales pour la mission respective.
- [0347] La détermination d'un type de chambre de combustion utilisé par l'aéronef peut comprendre le fait de déterminer si l'aéronef comprend une chambre de combustion étagée à mélange pauvre ou une chambre de combustion à mélange riche.
- [0348] Si la chambre de combustion est une chambre de combustion étagée à mélange pauvre ayant des injecteurs de carburant pilotes et principaux, la détermination d'une quantité de carburant requise pour chaque type d'injecteur de carburant peut comprendre :
- [0349] a) la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs pilotes

- pendant un fonctionnement à injection pilote et principale ; et/ou
- [0350] b) la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à injection pilote seule ; et/ou
- [0351] c) la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes fonctionnant dans une plage seuil du fonctionnement à des débits de carburant inférieurs à celui du point d'étagement.
- [0352] L'optimisation à l'échelle de la flotte peut être basée sur :
- [0353] un pourcentage d'un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant dans le carburant par défaut définissant le pourcentage le plus faible possible de carburant ayant la première caractéristique de carburant qui peut servir à la combustion ; et/ou
- [0354] un pourcentage du premier carburant ayant la première caractéristique de carburant dans le carburant non par défaut définissant le pourcentage le plus élevé possible de carburant ayant la première caractéristique de carburant qui peut servir à la combustion ; et/ou
- [0355] la quantité de carburant non par défaut disponible pour la pluralité de missions.
- [0356] Selon un vingt-deuxième aspect, l'invention concerne un procédé de chargement de carburant sur une pluralité d'aéronefs effectuant une pluralité de missions, la pluralité de missions étant alimentée en carburant à partir d'une source de carburant comprenant une quantité d'un carburant par défaut et une quantité d'un carburant non par défaut, le procédé comprenant :
- [0357] la détermination d'une attribution de carburant pour la pluralité de missions en utilisant le procédé du vingt et unième aspect et éventuellement l'une quelconque ou plusieurs des déclarations associées ci-dessus ; et
- [0358] le chargement du carburant sur la pluralité d'aéronefs en fonction de l'attribution de carburant.
- [0359] Selon un vingt-troisième aspect, l'invention concerne un support non transitoire lisible par ordinateur sur lequel sont stockées des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un processeur, amènent le processeur à mettre en œuvre le procédé du vingt et unième aspect et éventuellement une ou plusieurs quelconques déclarations associées ci-dessus.
- [0360] Selon un vingt-quatrième aspect, l'invention concerne un système de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour déterminer une attribution de carburant pour une flotte pour une pluralité de missions, le système de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte comprenant un dispositif informatique configuré pour mettre en œuvre le procédé du vingt et unième aspect et éventuellement une ou plusieurs quelconques déclarations associées ci-dessus.
- [0361] Selon un vingt-cinquième aspect, l'invention concerne un système de détermination

d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour déterminer une attribution de carburant pour une pluralité de missions effectuées par une pluralité d'aéronefs, la pluralité de missions étant alimentée en carburant à partir d'une source de carburant comprenant une quantité d'un carburant par défaut et une quantité d'un carburant non par défaut, l'attribution de carburant indiquant la quantité du carburant non par défaut et du carburant par défaut à attribuer à chaque mission de la pluralité de missions, le carburant par défaut et le carburant non par défaut ayant une ou plusieurs caractéristiques de carburant différentes les unes des autres, le procédé comprenant :

- [0362] un module d'obtention d'attribution de carburant proposée initiale configuré pour obtenir une attribution de carburant proposée initiale pour chaque mission de la pluralité de missions ;
- [0363] un module d'optimisation à l'échelle de la flotte configuré pour réaliser une optimisation à l'échelle de la flotte dans laquelle l'attribution de carburant proposée de chaque mission de la pluralité de missions est modifiée dans les limites des contraintes du carburant par défaut et/ou non par défaut disponible total de la source de carburant pour réduire au minimum une somme de paramètres d'impact des nvPM par mission sur la totalité de la pluralité de missions, chaque mission de la pluralité de missions étant associée à un paramètre d'impact des nvPM par mission respectif déterminé selon une utilisation de carburant proposée pour cette mission, l'utilisation de carburant définissant de quelle façon l'attribution de carburant pour la mission respective doit être utilisée pendant cette mission ; et
- [0364] un module de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte configuré pour déterminer l'attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour la pluralité de missions en fonction de l'optimisation à l'échelle de la flotte.
- [0365] Le carburant non par défaut peut être associé à un niveau de production de nvPM inférieur à celui du carburant par défaut.
- [0366] Le carburant non par défaut peut être formé à partir d'un mélange d'un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, différente de la première.
- [0367] Les première et seconde caractéristiques de carburant peuvent être un pourcentage de SAF au sein du carburant respectif, et dans lequel le carburant non par défaut est un carburant riche en SAF et le carburant par défaut peut être un carburant relativement pauvre en SAF.
- [0368] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut être configuré pour réaliser les étapes suivantes :
- [0369] i) la réalisation d'une optimisation en boucle externe dans laquelle l'attribution de carburant d'une ou plusieurs de la pluralité de missions est modifiée pour réduire la somme des paramètres d'impact des nvPM par mission de la pluralité de missions ; et

- [0370] ii) la réalisation d'une optimisation en boucle interne dans laquelle l'utilisation de carburant pour chaque mission de la pluralité de missions est obtenue en fonction des contraintes de l'attribution de carburant modifiée pour déterminer une nouvelle utilisation de carburant proposée pour chaque mission de la pluralité de missions.
- [0371] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut être configuré pour répéter les étapes i) et ii) jusqu'à ce qu'une utilisation optimisée de carburant pour chaque mission de la pluralité de missions soit déterminée ce qui correspond à une somme réduite au minimum des paramètres d'impact des nvPM par mission.
- [0372] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut être configuré pour réaliser l'optimisation en boucle interne en obtenant une solution préalablement préparée pour l'utilisation de carburant pour une mission respective.
- [0373] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut être configuré pour obtenir l'attribution de carburant proposée pour chaque mission de la pluralité de missions en obtenant une utilisation optimisée de carburant pour la mission respective définissant de quelle façon le carburant doit être utilisé afin de réduire au minimum le paramètre d'impact des nvPM par mission pour cette mission.
- [0374] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut être configuré pour obtenir l'utilisation optimisée de carburant pour chaque mission en effectuant une optimisation par mission, l'optimisation par mission comprenant éventuellement, pour chaque mission :
 - [0375] la détermination d'un type et/ou de capacités opérationnelles d'une chambre de combustion utilisée par l'aéronef respectif utilisé pour la mission ;
 - [0376] la détermination d'une exigence totale de carburant pour la mission respective ;
 - [0377] la détermination d'une quantité de carburant requise pour chaque type d'injecteur de carburant fourni dans la chambre de combustion pour la mission respective où plus d'un type d'injecteur est fourni ;
 - [0378] la détermination de la dépendance d'émissions de nvPM pour chaque point de fonctionnement de moteur de mission de la mission en utilisant du carburant ayant les caractéristiques du carburant par défaut, du carburant non par défaut, ou d'un mélange de ceux-ci ; et
 - [0379] la détermination d'un usage optimisé de carburant qui réduit au minimum les émissions de nvPM totales pour la mission respective.
- [0380] La détermination d'un type de chambre de combustion utilisé par l'aéronef peut comprendre le fait de déterminer si l'aéronef comprend une chambre de combustion étagée à mélange pauvre ou une chambre de combustion à mélange riche.
- [0381] Si la chambre de combustion est une chambre de combustion étagée à mélange pauvre ayant des injecteurs de carburant pilotes et principaux, la détermination d'une quantité de carburant requise pour chaque type d'injecteur de carburant peut

comprendre :

- [0382] la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à injection pilote et principale ; et/ou
- [0383] la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à injection pilote seule ; et/ou
- [0384] la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes fonctionnant dans une plage seuil du fonctionnement à des débits de carburant inférieurs à celui du point d'étagement.
- [0385] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut être configuré pour baser l'optimisation à l'échelle de la flotte sur :
- [0386] un pourcentage d'un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant dans le carburant par défaut définissant le pourcentage le plus faible possible de carburant ayant la première caractéristique de carburant qui peut servir à la combustion ; et/ou
- [0387] un pourcentage du premier carburant ayant la première caractéristique de carburant dans le carburant non par défaut définissant le pourcentage le plus élevé possible de carburant ayant la première caractéristique de carburant qui peut servir à la combustion ; et/ou
- [0388] la quantité de carburant non par défaut disponible pour la pluralité de missions.
- [0389] La présente description peut s'appliquer à une quelconque configuration pertinente de moteur à turbine à gaz. Un tel moteur à turbine à gaz peut être, par exemple, un moteur à turbine à gaz à turboréacteur à double flux, un moteur à turbine à gaz à rotor ouvert (dans lequel l'hélice n'est pas entourée par une nacelle), un turbopropulseur ou un turboréacteur. Un quelconque tel moteur peut être pourvu ou non d'une chambre de post-combustion.
- [0390] Un moteur à turbine à gaz selon un quelconque aspect de la présente invention peut comprendre un noyau de moteur comprenant une turbine, une chambre de combustion, un compresseur, et un arbre de noyau reliant la turbine au compresseur. Un tel moteur à turbine à gaz peut comprendre une soufflante (comportant des aubes de soufflante). Une telle soufflante peut être située en amont du noyau du moteur. En variante, dans certains exemples, le moteur à turbine à gaz peut comprendre une soufflante située en aval du noyau de moteur, par exemple lorsque le moteur à turbine à gaz est un rotor ouvert ou un turbopropulseur (auquel cas la soufflante peut être appelée hélice).
- [0391] Lorsque le moteur à turbine à gaz est un rotor ouvert ou un turbopropulseur, le moteur à turbine à gaz peut comprendre deux étages d'hélices contrarotatives fixés à une turbine de puissance libre par l'intermédiaire d'un arbre et entraînés par celle-ci. Les hélices peuvent tourner dans des sens opposés de sorte que l'une tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre dans le sens antihoraire autour de l'axe de

rotation du moteur. En variante, le moteur à turbine à gaz peut comprendre un étage d'hélice et un étage d'aube directrice configuré en aval de l'étage d'hélice. L'étage d'aube directrice peut être de pas variable. Ainsi, les turbines à haute pression, à pression intermédiaire et à puissance libre respectivement peuvent entraîner des compresseurs à haute pression et pression intermédiaire et des hélices par des arbres d'interconnexion appropriés. Ainsi, les hélices peuvent fournir la majeure partie de la poussée propulsive.

- [0392] Lorsque le moteur à turbine à gaz est un rotor ouvert ou un turbopropulseur, un ou plusieurs des étages d'hélice peuvent être entraînés par une boîte d'engrenages. La boîte d'engrenages peut être du type décrit ici.
- [0393] Un moteur selon la présente invention peut être un turboréacteur à double flux. Un tel moteur peut être un turboréacteur à double flux à entraînement direct dans lequel la soufflante est directement reliée à la turbine d'entraînement de soufflante, par exemple sans boîte d'engrenages. Dans un tel turboréacteur à double flux à entraînement direct, on peut dire que la soufflante tourne à la même vitesse de rotation que la turbine d'entraînement de soufflante.
- [0394] Un moteur selon la présente invention peut être un turboréacteur à double flux à boîte d'engrenages. Dans un tel agencement, le moteur présente une soufflante qui est entraînée par l'intermédiaire d'une boîte d'engrenages. Ainsi, un tel moteur à turbine à gaz peut comprendre une boîte d'engrenages qui reçoit une entrée depuis l'arbre de noyau et sort un entraînement vers la soufflante de façon à entraîner la soufflante à une vitesse de rotation plus basse que celle de l'arbre de noyau. L'entrée vers la boîte d'engrenages peut être directement à partir de l'arbre de noyau, ou indirectement à partir de l'arbre de noyau, par exemple par l'intermédiaire d'un arbre et/ou engrenage droit. L'arbre de noyau peut solidariser la turbine et le compresseur, de telle sorte que la turbine et le compresseur tournent à la même vitesse (la soufflante tournant à une vitesse plus basse).
- [0395] Le moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici peut avoir n'importe quelle architecture générale appropriée. Par exemple, le moteur à turbine à gaz peut avoir un nombre quelconque souhaité d'arbres qui relient des turbines et des compresseurs, par exemple, un, deux ou trois arbres. Strictement à titre d'exemple, la turbine reliée à l'arbre de noyau peut être une première turbine, le compresseur relié à l'arbre de noyau peut être un premier compresseur, et l'arbre de noyau peut être un premier arbre de noyau. Le noyau de moteur peut comprendre en outre une deuxième turbine, un deuxième compresseur, et un deuxième arbre de noyau reliant la deuxième turbine au deuxième compresseur. La deuxième turbine, le deuxième compresseur et le deuxième arbre de noyau peuvent être conçus pour tourner à une vitesse de rotation plus élevée que celle du premier arbre de noyau.

- [0396] Dans un tel agencement, le deuxième compresseur peut être positionné axialement en aval du premier compresseur. Le deuxième compresseur peut être conçu pour recevoir (par exemple recevoir directement, par exemple via un conduit généralement annulaire) un flux du premier compresseur.
- [0397] La boîte d'engrenages peut être conçue pour être entraînée par l'arbre de noyau qui est configuré pour tourner (par exemple lors de l'utilisation) à la vitesse de rotation la plus basse (par exemple le premier arbre de noyau dans l'exemple ci-dessus). Par exemple, la boîte d'engrenages peut être conçue pour être entraînée uniquement par l'arbre de noyau qui est configuré pour tourner (par exemple lors de l'utilisation) à la vitesse de rotation la plus basse (par exemple uniquement le premier arbre de noyau, et non le deuxième arbre de noyau, dans l'exemple ci-dessus). En variante, la boîte d'engrenages peut être conçue pour être entraînée par un ou plusieurs arbres, par exemple les premier et/ou deuxième arbres dans l'exemple ci-dessus.
- [0398] La boîte d'engrenages peut être une boîte de réduction (en ce que la sortie vers la soufflante est une vitesse de rotation plus basse que l'entrée provenant de l'arbre de noyau). Un quelconque type de boîte d'engrenages peut être utilisé. Par exemple, la boîte d'engrenages peut être une boîte d'engrenages « planétaires » ou « épicycloïdaux planétaires », telle que décrite plus en détail ailleurs ici. Une telle boîte d'engrenages peut être un seul étage. En variante, une telle boîte d'engrenages peut être une boîte d'engrenages composés, par exemple une boîte d'engrenages planétaires composés (qui peut avoir l'entrée sur l'engrenage solaire et la sortie sur la couronne, et ainsi être appelé boîte d'engrenages « épicycloïdaux planétaires composés »), par exemple ayant deux étages de réduction.
- [0399] La boîte d'engrenages peut avoir un quelconque rapport de réduction souhaité (défini comme étant la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée divisée par la vitesse de rotation de l'arbre de sortie), par exemple supérieur à 2,5, par exemple dans la plage de 3 à 4,2, ou 3,2 à 3,8, par exemple de l'ordre de ou d'au moins 3, 3,1, 3,2, 3,3, 3,4, 3,5, 3,6, 3,7, 3,8, 3,9, 4, 4,1 ou 4,2. Le rapport d'engrenage peut être, par exemple, entre deux quelconques des valeurs de la phrase précédente. Strictement à titre d'exemple, la boîte d'engrenages peut être une boîte d'engrenages « épicycloïdaux planétaires » ayant un rapport de réduction dans la plage de 3,1 ou 3,2 à 3,8. Strictement à titre d'exemple supplémentaire, la boîte d'engrenages peut être une boîte d'engrenages « épicycloïdaux planétaires » ayant un rapport de réduction dans la plage de 3,0 à 3,1. Strictement à titre d'exemple supplémentaire, la boîte d'engrenages peut être une boîte d'engrenages « planétaires » ayant un rapport de réduction dans la plage de 3,6 à 4,2. Dans certains agencements, le rapport d'engrenage peut être en dehors de ces plages.
- [0400] Dans un quelconque moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici, le carburant d'une composition donnée ou d'un mélange donné est fourni à une chambre

de combustion, qui peut être disposée en aval de la soufflante et du ou des compresseurs par rapport à la voie d'écoulement (par exemple axialement en aval). Par exemple, la chambre de combustion peut être directement en aval du (par exemple en sortie du) deuxième compresseur, où un deuxième compresseur est disposé. À titre d'exemple supplémentaire, le flux en sortie de la chambre de combustion peut être fourni à l'entrée de la deuxième turbine, où une deuxième turbine est disposée. La chambre de combustion peut être disposée en amont de la ou des turbines.

[0401] Le ou chaque compresseur (par exemple le premier compresseur et le deuxième compresseur comme décrit ci-dessus) peut comprendre un nombre quelconque d'étages, par exemple de multiples étages. Chaque étage peut comprendre une rangée d'aubes rotoriques et une rangée d'aubes statoriques, qui peuvent être des aubes statoriques variables (en ce que leur angle d'incidence peut être variable). La rangée d'aubes rotoriques et la rangée d'aubes statoriques peuvent être décalées axialement l'une de l'autre. Par exemple, le moteur à turbine à gaz peut être un moteur à turbine à gaz à turboréacteur à double flux à entraînement direct comprenant 13 ou 14 étages de compresseur (en plus de la soufflante). Un tel moteur peut par exemple comprendre 3 étages dans le premier compresseur (ou compresseur « à basse pression ») et soit 10, soit 11 étages dans le deuxième compresseur (ou compresseur « à haute pression »). À titre d'exemple supplémentaire, le moteur à turbine à gaz peut être un moteur à turbine à gaz « à engrenages » (dans lequel la soufflante est entraînée par un premier arbre de noyau par l'intermédiaire d'une boîte d'engrenages) comprenant 11, 12 ou 13 étages de compresseur (en plus de la soufflante). Un tel moteur peut comprendre 3 ou 4 étages dans le premier compresseur (ou compresseur « à basse pression ») et 8 ou 9 étages dans le deuxième compresseur (ou compresseur « à haute pression »). À titre d'exemple supplémentaire, le moteur à turbine à gaz peut être un moteur à turbine à gaz « à engrenages » ayant 4 étages dans le premier compresseur (ou compresseur « à basse pression ») et 10 étages dans le deuxième compresseur (ou compresseur « à haute pression »).

[0402] La ou chaque turbine (par exemple la première turbine et la deuxième turbine comme décrit ci-dessus) peut comprendre un nombre quelconque d'étages, par exemple de multiples étages. Chaque étage peut comprendre une rangée d'aubes rotoriques et une rangée d'aubes statoriques. La rangée d'aubes rotoriques et la rangée d'aubes statoriques peuvent être décalées axialement l'une de l'autre. La deuxième turbine (ou turbine « à haute pression ») peut comprendre 2 étages dans un quelconque agencement (par exemple qu'il s'agisse d'un moteur à engrenages ou à entraînement direct). Le moteur à turbine à gaz peut être un moteur à turbine à gaz à entraînement direct comprenant une première turbine (ou turbine « à basse pression ») ayant 5, 6 ou 7 étages. En variante, le moteur à turbine à gaz peut être un moteur à turbine à gaz « à

engrenages » comprenant une première turbine (ou turbine « à basse pression ») ayant 3 ou 4 étages.

[0403] Chaque aube de soufflante peut être définie comme ayant une envergure radiale s'étendant à partir d'un pied (ou moyeu) à un emplacement de lavage au gaz radialement interne, ou une position d'envergure de 0 %, jusqu'à une extrémité à une position d'envergure de 100 %. Le rapport du rayon de l'aube de soufflante au niveau du moyeu au rayon de l'aube de soufflante au niveau de l'extrémité peut être inférieur à (ou de l'ordre de) un quelconque nombre parmi : 0,4, 0,39, 0,38, 0,37, 0,36, 0,35, 0,34, 0,33, 0,32, 0,31, 0,3, 0,29, 0,28, 0,27, 0,26, ou 0,25. Le rapport du rayon de l'aube de soufflante au niveau du moyeu au rayon de l'aube de soufflante au niveau de l'extrémité peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures), par exemple dans la plage de 0,28 à 0,32 ou 0,29 à 0,30. Ces rapports peuvent couramment être appelés rapport moyeu à extrémité. Le rayon au niveau du moyeu et le rayon au niveau de l'extrémité peuvent tous deux être mesurés au niveau de la partie bord d'attaque (ou axialement le plus vers l'avant) de l'aube. Le rapport moyeu à extrémité fait, bien entendu, référence à la partie lavée par les gaz de l'aube de soufflante, c'est-à-dire la partie radialement à l'extérieur d'une quelconque plate-forme.

[0404] Le rayon de la soufflante peut être mesuré entre la ligne centrale du moteur et l'extrémité d'une aube de soufflante au niveau de son bord d'attaque. Le diamètre de soufflante (qui peut simplement être le double du rayon de la soufflante) peut être supérieur à (ou de l'ordre de) un quelconque nombre parmi : 140 cm, 170 cm, 180 cm, 190 cm, 200 cm, 210 cm, 220 cm, 230 cm, 240 cm, 250 cm (environ 100 pouces), 260 cm, 270 cm (environ 105 pouces), 280 cm (environ 110 pouces), 290 cm (environ 115 pouces), 300 cm (environ 120 pouces), 310 cm, 320 cm (environ 125 pouces), 330 cm (environ 130 pouces), 340 cm (environ 135 pouces), 350 cm, 360 cm (environ 140 pouces), 370 cm (environ 145 pouces), 380 (environ 150 pouces) cm, 390 cm (environ 155 pouces), 400 cm, 410 cm (environ 160 pouces) ou 420 cm (environ 165 pouces). Le diamètre de soufflante peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures), par exemple dans la plage de 240 cm à 280 cm ou 330 cm à 380 cm. Strictement à titre d'exemple non limitatif, le diamètre de soufflante peut être dans la plage de 170 cm à 180 cm, 190 cm à 200 cm, 200 cm à 210 cm, 210 cm à 230 cm, 290 cm à 300 cm ou 340 cm à 360 cm.

[0405] La vitesse de rotation de la soufflante peut varier lors de l'utilisation. Généralement, la vitesse de rotation est plus faible pour des soufflantes de plus grand diamètre. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la vitesse de rotation de la soufflante dans

des conditions de régime de croisière peut être inférieure à 3 500 tr/min, par exemple inférieure à 2 500 tr/min, par exemple inférieure à 2 300 tr/min. Strictement à titre d'exemple non limitatif supplémentaire, la vitesse de rotation de la soufflante dans des conditions de régime de croisière pour un moteur à turbine à gaz « à engrenages » ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 200 cm à 210 cm peut être dans la plage de 2 750 à 2 900 tr/min. Strictement à titre d'exemple non limitatif supplémentaire, la vitesse de rotation de la soufflante dans des conditions de régime de croisière pour un moteur à turbine à gaz « à engrenages » ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 210 cm à 230 cm peut être dans la plage de 2 500 à 2 800 tr/min. Strictement à titre d'exemple non limitatif supplémentaire, la vitesse de rotation de la soufflante dans des conditions de régime de croisière pour un moteur à turbine à gaz « à engrenages » ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 340 cm à 360 cm peut être dans la plage de 1 500 à 1 800 tr/min. Strictement à titre d'exemple non limitatif supplémentaire, la vitesse de rotation de la soufflante dans des conditions de régime de croisière pour un moteur à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 190 cm à 200 cm peut être dans la plage de 3 600 à 3 900 tr/min. Strictement à titre d'exemple non limitatif supplémentaire, la vitesse de rotation de la soufflante dans des conditions de régime de croisière pour un moteur à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 2 000 à 2 800 tr/min.

[0406] Lors de l'utilisation du moteur à turbine à gaz, la soufflante (avec des aubes de soufflante associées) tourne autour d'un axe de rotation. Cette rotation entraîne le déplacement de l'extrémité de l'aube de soufflante avec une vitesse U_{tip} . Le travail réalisé par les aubes de soufflante 23 sur le flux conduit à une élévation d'enthalpie dH du flux. Le chargement d'une extrémité de soufflante peut être défini comme étant dH/U_{tip}^2 , où dH est l'élévation d'enthalpie (par exemple l'élévation d'enthalpie moyenne 1-D) sur la soufflante et U_{tip} est la vitesse (translationnelle) de l'extrémité de soufflante, par exemple au niveau du bord d'attaque de l'extrémité (qui peut être définie comme étant le rayon d'extrémité de soufflante au niveau du bord d'attaque multiplié par la vitesse angulaire). Le chargement d'extrémité de soufflante dans des conditions de régime de croisière peut être supérieur à (ou de l'ordre de) l'un quelconque nombre parmi : 0,28, 0,29, 0,30, 0,31, 0,32, 0,33, 0,34, 0,35, 0,36, 0,37, 0,38, 0,39 ou 0,4 (toutes les valeurs étant sans dimension). Le chargement d'extrémité de soufflante peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures), par exemple dans la plage de 0,28 à 0,31, ou 0,29 à 0,3 (par exemple pour un moteur à turbine à gaz à engrenages).

[0407] Des moteurs à turbine à gaz selon la présente invention peuvent avoir n'importe quel

taux de dilution souhaité, où le taux de dilution est défini comme étant le rapport du débit massique du flux à travers le conduit de dérivation au débit massique du flux à travers le noyau dans des conditions de régime de croisière. Dans certains agencements le taux de dilution peut être supérieur à (ou de l'ordre de) un quelconque nombre parmi : 9, 9,5, 10, 10,5, 11, 11,5, 12, 12,5, 13, 13,5, 14, 14,5, 15, 15,5, 16, 16,5, 17, 17,5, 18, 18,5, 19, 19,5 ou 20. Le taux de dilution peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures), par exemple dans la plage de 12 à 16, 13 à 15, ou 13 à 14. Strictement à titre d'exemple non limitatif, le taux de dilution d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct selon la présente description peut être dans la plage de 9:1 à 11:1. Strictement à titre d'exemple non limitatif, le taux de dilution d'un moteur à turbine à gaz à engrenage selon la présente description peut être dans la plage de 12:1 à 15:1. Le conduit de dérivation peut être sensiblement annulaire. Le conduit de dérivation peut être radialement à l'extérieur du moteur de base. La surface radialement externe du conduit de dérivation peut être définie par une nacelle et/ou un carter de soufflante.

[0408] Le rapport de pression global d'un moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici peut être défini comme étant le rapport de la pression de stagnation à la sortie du compresseur à la plus haute pression (avant entrée dans la chambre de combustion) à la pression de stagnation en amont de la soufflante. À titre d'exemple non limitatif, le rapport de pression global d'un moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici en régime de croisière peut être supérieur à (ou de l'ordre de) un quelconque nombre parmi : 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75. Le rapport de pression global peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures), par exemple dans la plage de 50 à 70. Strictement à titre d'exemple non limitatif, le rapport de pression global dans des conditions de régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 200 cm à 210 cm peut être dans la plage de 40 à 45. Strictement à titre d'exemple non limitatif, le rapport de pression global dans des conditions de régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 210 cm à 230 cm peut être dans la plage de 45 à 55. Strictement à titre d'exemple non limitatif, le rapport de pression global dans des conditions de régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 340 cm à 360 cm peut être dans la plage de 50 à 60. Strictement à titre d'exemple non limitatif, le rapport de pression global dans des conditions de régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 50 à 60.

[0409] La poussée spécifique d'un moteur peut être définie comme étant la poussée nette du moteur divisée par le débit massique total à travers le moteur. Dans certains exemples, une poussée spécifique peut dépendre, pour une condition de poussée donnée, de la composition spécifique du carburant fourni à la chambre de combustion. Dans des conditions de régime de croisière, la poussée spécifique d'un moteur décrit et/ou revendiqué ici peut être inférieure à (ou de l'ordre de) un nombre quelconque parmi : 110 Nkg⁻¹ s, 105 Nkg⁻¹ s, 100 Nkg⁻¹ s, 95 Nkg⁻¹ s, 90 Nkg⁻¹ s, 85 Nkg⁻¹ s ou 80 Nkg⁻¹ s. La poussée spécifique peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures), par exemple dans la plage de 80 Nkg⁻¹ s à 100 Nkg⁻¹ s ou 85 Nkg⁻¹ s à 95 Nkg⁻¹ s. De tels moteurs peuvent être particulièrement efficaces comparativement aux moteurs à turbine à gaz classiques. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée spécifique d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 200 cm à 210 cm peut être dans la plage de 90 Nkg⁻¹ s à 95 Nkg⁻¹ s. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée spécifique d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 210 cm à 230 cm peut être dans la plage de 80 Nkg⁻¹ s à 90 Nkg⁻¹ s. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée spécifique d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 340 cm à 360 cm peut être dans la plage de 70 Nkg⁻¹ s à 90 Nkg⁻¹ s. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée spécifique d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 90 Nkg⁻¹ s à 120 Nkg⁻¹ s.

[0410] Un moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici peut avoir n'importe quelle poussée maximale souhaitée. Strictement à titre d'exemple non limitatif, une turbine à gaz telle que décrite et/ou revendiquée ici peut être capable de produire une poussée maximale d'au moins (ou de l'ordre de) un quelconque nombre suivant : 100 kN, 110 kN, 120 kN, 130 kN, 140 kN, 150 kN, 160 kN, 170 kN, 180 kN, 190 kN, 200 kN, 250 kN, 300 kN, 350 kN, 400 kN, 450 kN, 500 kN, ou 550 kN. La poussée maximale peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures). Strictement à titre d'exemple non limitatif, une turbine à gaz telle que décrite et/ou revendiquée ici peut être capable de produire une poussée maximale dans la plage de 330 kN à 420 kN, par exemple de 350 kN à 400 kN. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée maximale d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 200 cm à 210 cm peut être dans la plage de 140 kN à 160 kN. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée maximale d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de

soufflante dans la plage de 210 cm à 230 cm peut être dans la plage de 150 kN à 200 kN. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée maximale d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 340 cm à 360 cm peut être dans la plage de 370 kN à 500 kN. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la poussée maximale d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 370 kN à 500 kN. La poussée évoquée ci-dessus peut être la poussée nette maximale dans des conditions atmosphériques standard au niveau de la mer plus 15 degrés C (pression ambiante 101,3 kPa, température 30 degrés C), avec le moteur statique.

[0411] Lors de l'utilisation, la température du flux à l'entrée de la turbine à haute pression peut être particulièrement élevée. Cette température, que l'on peut appeler TET, peut être mesurée à la sortie de la chambre de combustion, par exemple immédiatement en amont de la première aube de turbine, qui peut elle-même être appelée aube directrice de tuyère. Dans certains exemples, la TET peut dépendre, pour une condition de poussée donnée, de la composition spécifique du carburant fournie à la chambre de combustion. En régime de croisière, la TET peut être au moins (ou de l'ordre de) un quelconque nombre parmi : 1 400 K, 1 450 K, 1 500 K, 1 550 K, 1 600 K ou 1 650 K. Ainsi, strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET en régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 200 cm à 210 cm peut être dans la plage de 1 540 K à 1 600 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET en régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 210 cm à 230 cm peut être dans la plage de 1 590 K à 1 650 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET en régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 340 cm à 360 cm peut être dans la plage de 1 600 K à 1 660 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET en régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 1 590 K à 1 650 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET en régime de croisière d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 1 570 K à 1 630 K.

[0412] La TET en régime de croisière peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures). La TET maximale lors de l'utilisation du moteur peut être, par exemple, au moins (ou de l'ordre de) un quelconque nombre parmi : 1 700 K, 1 750 K, 1 800 K, 1 850 K, 1 900 K, 1 950 K, 2 000 K, 2 050 K ou 2 100 K. Ainsi, strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET maximale d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de

200 cm à 210 cm peut être dans la plage de 1 890 K à 1 960 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET maximale d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 210 cm à 230 cm peut être dans la plage de 1 890 K à 1 960 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET maximale d'un moteur à turbine à gaz à engrenages ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 340 cm à 360 cm peut être dans la plage de 1 890 K à 1 960 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET maximale d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 1 935 K à 1 995 K. Strictement à titre d'exemple non limitatif, la TET maximale d'un moteur à turbine à gaz à entraînement direct ayant un diamètre de soufflante dans la plage de 300 cm à 340 cm peut être dans la plage de 1 890 K à 1 950 K. La TET maximale peut être dans une plage inclusive délimitée par deux quelconques des valeurs de la phrase précédente (c'est-à-dire que les valeurs peuvent former des limites supérieures ou inférieures), par exemple dans la plage de 1 800 K à 1 950 K. La TET maximale peut se produire, par exemple, dans une condition de poussée élevée, par exemple dans une condition maximale au décollage (MTO).

[0413] Une partie d'aube de soufflante et/ou de profil aérodynamique d'une aube de soufflante décrite et/ou revendiquée ici peut être fabriquée à partir de n'importe quel matériau approprié ou combinaison de matériaux appropriée. Par exemple au moins une partie de l'aube de soufflante et/ou du profil aérodynamique peut être fabriquée au moins en partie à partir d'un composite, par exemple un composite à matrice métallique et/ou un composite à matrice organique, tel qu'un composite en fibres de carbone. À titre d'exemple supplémentaire au moins une partie de l'aube de soufflante et/ou du profil aérodynamique peut être fabriquée au moins en partie à partir d'un métal, tel qu'un métal à base de titane ou un matériau à base d'aluminium (tel qu'un alliage aluminium-lithium) ou un matériau à base d'acier. L'aube de soufflante peut comprendre au moins deux régions fabriquées à l'aide de matériaux différents. Par exemple, l'aube de soufflante peut avoir un bord d'attaque de protection, qui peut être fabriqué en utilisant un matériau mieux apte à résister à un impact (par exemple venant d'oiseaux, de glace ou d'un autre matériau) que le reste de l'aube. Un tel bord d'attaque peut, par exemple, être fabriqué à l'aide de titane ou d'un alliage à base de titane. Ainsi, à titre d'exemple uniquement, l'aube de soufflante peut avoir un corps à base de fibres de carbone ou d'aluminium (tel qu'un alliage de lithium et aluminium) avec un bord d'attaque en titane.

[0414] Une soufflante telle que décrite et/ou revendiquée ici peut comprendre une partie centrale, à partir de laquelle les aubes de soufflante peuvent s'étendre, par exemple dans une direction radiale. Les aubes de soufflante peuvent être fixées à la partie

centrale de n'importe quelle manière souhaitée. Par exemple, chaque aube de soufflante peut comprendre un accessoire qui peut venir en prise avec une fente correspondante dans le moyeu (ou disque). Strictement à titre d'exemple, un tel accessoire peut se présenter sous la forme d'une queue d'aronde qui peut s'emboîter dans et/ou venir en prise avec une fente correspondante dans le moyeu pour fixer l'aube de soufflante au moyeu/disque. Par exemple, les aubes de soufflante peuvent faire partie intégrante d'une partie centrale. Un tel agencement peut être appelé disque à aubes ou anneau à aubes. Un quelconque procédé adapté peut être utilisé pour fabriquer un tel disque à aubes ou anneau à aubes. Par exemple, au moins une partie des aubes de soufflante peut être usinée à partir d'un bloc et/ou au moins une partie des aubes de soufflante peut être fixée au moyeu/disque par soudage, notamment un soudage par friction linéaire.

- [0415] Les moteurs à turbine à gaz décrits et/ou revendiqués ici peuvent ou non être dotés d'une tuyère à section variable (VAN). Une telle tuyère à section variable peut permettre de faire varier l'aire de sortie du conduit de dérivation lors de l'utilisation. Les principes généraux de la présente invention peuvent s'appliquer à des moteurs avec ou sans VAN.
- [0416] La soufflante d'une turbine à gaz telle que décrite et/ou revendiquée ici peut avoir un nombre souhaité quelconque d'aubes de soufflante, par exemple, 14, 16, 18, 20, 22, 24 ou 26 aubes de soufflante. Lorsque les aubes de soufflante ont un corps en composite de fibres de carbone, il peut y avoir 16 ou 18 aubes de soufflante. Lorsque les aubes de soufflante ont un corps métallique (par exemple en aluminium-lithium ou alliage de titane), il peut y avoir 18, 20 ou 22 aubes de soufflante.
- [0417] Tel qu'utilisés ici, les termes ralenti, roulage, décollage, montée, régime de croisière, descente, approche et atterrissage ont la signification conventionnelle et sont aisément compris par l'homme du métier. Ainsi, pour un moteur à turbine à gaz donné pour un aéronef, l'homme du métier reconnaîtra immédiatement chaque terme pour désigner une phase de fonctionnement du moteur au sein d'une mission donnée d'un aéronef auquel le moteur à turbine à gaz est destiné à être fixé.
- [0418] À cet égard, le ralenti au sol peut se référer à une phase de fonctionnement du moteur où l'aéronef est stabilisé et en contact avec le sol, mais où le moteur doit fonctionner. Au ralenti, le moteur peut être en train de produire entre 3 % et 9 % de la poussée disponible du moteur. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 5 % et 8 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 6 % et 7 % de la poussée disponible. Le roulage peut faire référence à une phase de fonctionnement du moteur où l'aéronef est propulsé le long du sol par la poussée produite par le moteur. Lors du roulage, le moteur peut être en train de produire entre

5 % et 15 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 6 % et 12 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 7 % et 10 % de la poussée disponible. Le décollage peut faire référence à une phase de fonctionnement du moteur où l'aéronef est propulsé par la poussée produite par le moteur. À un stade initial de la phase de décollage, l'aéronef peut être propulsé alors que l'aéronef est en contact avec le sol. À un stade ultérieur de la phase de décollage, l'aéronef peut être propulsé alors que l'aéronef n'est pas en contact avec le sol. Lors du décollage, le moteur peut être en train de produire entre 90 % et 100 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 95 % et 100 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire 100 % de la poussée disponible.

[0419] La montée peut faire référence à une phase de fonctionnement du moteur où l'aéronef est propulsé par la poussée produite par le moteur. Lors de la montée, le moteur peut être en train de produire entre 75 % et 100 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 80 % et 95 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 85 % et 90 % de la poussée disponible. À cet égard, la montée peut se référer à une phase de fonctionnement au sein d'un cycle de vol d'aéronef entre le décollage et l'arrivée aux conditions de régime de croisière. En outre ou en variante, la montée peut se référer à un point nominal dans un cycle de vol d'aéronef entre le décollage et l'atterrissage, lorsqu'une augmentation relative d'altitude est requise, ce qui peut nécessiter une demande de poussée supplémentaire du moteur.

[0420] Telles qu'utilisées ici, les conditions de régime de croisière ont la signification conventionnelle et sont aisément comprises par l'homme du métier. Ainsi, pour un moteur à turbine à gaz donné pour un aéronef, l'homme du métier reconnaîtra immédiatement les conditions de régime de croisière comme étant le point de fonctionnement du moteur en milieu de régime de croisière d'une mission donnée (qui peut être appelée dans le secteur la « mission économique ») d'un aéronef auquel le moteur à turbine à gaz est destiné à être attaché. À cet égard, le milieu du régime de croisière est le point dans un cycle de vol d'aéronef auquel 50 % du carburant total qui est brûlé entre le haut de la montée et le début de la descente ont été brûlés (ce qui peut être approximé par le point milieu en termes de temps et/ou de distance) entre le haut de la montée et le début de la descente. Les conditions en régime de croisière définissent ainsi un point de fonctionnement du moteur à turbine à gaz qui fournit une poussée qui assurerait un fonctionnement à l'état stabilisé (c'est-à-dire maintenant une altitude

constante et un nombre de Mach constant) en milieu de croisière d'un aéronef auquel est destiné à être fixé, en tenant compte du nombre de moteurs fournis à cet aéronef. Par exemple lorsqu'un moteur est conçu pour être fixé à un aéronef qui a deux moteurs du même type, dans des conditions de régime de croisière le moteur fournit la moitié de la poussée totale qui serait requise pour un fonctionnement à l'état stabilisé de cet aéronef en milieu de croisière.

- [0421] En d'autres termes, pour un moteur à turbine à gaz donné pour un aéronef, des conditions de régime de croisière sont définies comme étant le point de fonctionnement du moteur qui fournit une poussée spécifiée (requis pour fournir (en combinaison avec n'importe quels autres moteurs sur l'aéronef) un fonctionnement à l'état stabilisé de l'aéronef auquel il est destiné à être fixé à un nombre de Mach de milieu de régime de croisière donné) dans les conditions atmosphériques de milieu de régime de croisière (définies par l'International Standard Atmosphere selon la norme ISO 2533 à l'altitude de milieu de régime de croisière). Pour n'importe quel moteur à turbine à gaz donné pour un aéronef, la poussée en milieu de croisière, les conditions atmosphériques et le nombre de Mach sont connus, et donc le point de fonctionnement du moteur dans les conditions de régime de croisière est clairement défini.
- [0422] Strictement à titre d'exemple, la vitesse d'avancement à la condition de régime de croisière peut être n'importe quel point dans la plage de Mach 0,7 à 0,9, par exemple 0,75 à 0,85, par exemple 0,76 à 0,84, par exemple 0,77 à 0,83, par exemple 0,78 à 0,82, par exemple 0,79 à 0,81, par exemple de l'ordre de Mach 0,8, de l'ordre de Mach 0,85 ou dans la plage de 0,8 à 0,85. Toute vitesse unique au sein de ces plages peut faire partie de la condition de régime de croisière. Pour certains aéronefs, les conditions de régime de croisière peuvent être en dehors de ces plages, par exemple en dessous de Mach 0,7 ou au-dessus de Mach 0,9.
- [0423] Strictement à titre d'exemple, les conditions de régime de croisière peuvent correspondre à des conditions atmosphériques standard (selon l'International Standard Atmosphere, ISA) à une altitude qui est dans la plage de 10 000 m à 15 000 m, par exemple dans la plage de 10 000 m à 12 000 m, par exemple dans la plage de 10 400 m à 11 600 m (autour de 38 000 pieds), par exemple dans la plage de 10 500 m à 11 500 m, par exemple dans la plage de 10 600 m à 11 400 m, par exemple dans la plage de 10 700 m (environ 35 000 pieds) à 11 300 m, par exemple dans la plage de 10 800 m à 11 200 m, par exemple dans la plage de 10 900 m à 11 100 m, par exemple de l'ordre de 11 000 m. Les conditions de régime de croisière peuvent correspondre à des conditions atmosphériques standard à n'importe quelle altitude donnée dans ces plages.
- [0424] Strictement à titre d'exemple, les conditions de régime de croisière peuvent correspondre à un point de fonctionnement du moteur qui fournit un niveau de poussée

requis connu (par exemple une valeur dans la plage de 30 kN à 35 kN) à un nombre de Mach vers l'avant de 0,8 et des conditions atmosphériques standard (selon l'International Standard Atmosphere) à une altitude de 38 000 pieds (11 582 m). Strictement à titre d'exemple supplémentaire, les conditions de régime de croisière peuvent correspondre à un point de fonctionnement du moteur qui fournit un niveau de poussée requis connu (par exemple une valeur dans la plage de 50 kN à 65 kN) à un nombre de Mach vers l'avant de 0,85 et des conditions atmosphériques standard (selon l'International Standard Atmosphere) à une altitude de 35 000 pieds (10 668 m).

- [0425] Lors de l'utilisation, un moteur à turbine à gaz décrit et/ou revendiqué ici peut fonctionner aux conditions de régime de croisière définies ailleurs ici. De telles conditions de régime de croisière peuvent être déterminées par les conditions de régime de croisière (par exemple les conditions de milieu de régime de croisière) d'un aéronef sur lequel au moins un (par exemple 2 ou 4) moteur à turbine à gaz peut être monté afin de fournir une poussée de propulsion.
- [0426] En outre, l'homme du métier reconnaîtra immédiatement la descente et/ou l'approche pour faire référence à une phase de fonctionnement au sein d'un cycle de vol d'aéronef entre le régime de croisière et l'atterrissage de l'aéronef. Lors de la descente et/ou de l'approche, le moteur peut être en train de produire entre 20 % et 50 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 25 % et 40 % de la poussée disponible. Dans des exemples non limitatifs supplémentaires, le moteur peut être en train de produire entre 30 % et 35 % de la poussée disponible. En outre ou en variante, la descente peut se référer à un point nominal dans un cycle de vol d'aéronef entre le décollage et l'atterrissage, lorsqu'une diminution relative d'altitude est requise, ce qui peut nécessiter une demande de poussée réduite du moteur.
- [0427] Selon un aspect, l'invention concerne un aéronef comprenant un moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici. L'aéronef selon cet aspect est l'aéronef pour lequel le moteur à turbine à gaz est destiné à être fixé. Ainsi, les conditions de régime de croisière selon cet aspect correspondent au milieu du régime de croisière de l'aéronef, tel que défini ailleurs ici.
- [0428] Selon un aspect, l'invention concerne un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici. Le fonctionnement peut être dans n'importe quelle condition appropriée, qui peut être telle que définie ailleurs ici (par exemple en termes de poussée, de conditions atmosphériques et de nombre de Mach).
- [0429] Selon un aspect, l'invention concerne un procédé de fonctionnement d'un aéronef comprenant un moteur à turbine à gaz tel que décrit et/ou revendiqué ici. Le fonctionnement selon cet aspect peut inclure (ou peut être) un fonctionnement dans n'importe quelle condition appropriée, par exemple le milieu du régime de croisière de

l'aéronef, tel que défini ailleurs dans la description.

- [0430] L'homme du métier aura à l'esprit que, sauf lorsqu'ils sont réciproquement exclusifs, une caractéristique ou un paramètre décrit en liaison avec l'un quelconque des aspects ci-dessus peut être appliqué(e) à n'importe quel autre aspect. En outre, sauf lorsqu'ils sont réciproquement exclusifs, une quelconque caractéristique ou un quelconque paramètre décrit ici peut être appliqué(e) à n'importe quel aspect et/ou combiné(e) à une quelconque autre caractéristique ou un quelconque autre paramètre décrit ici.
- [0431] Des modes de réalisation vont maintenant être décrits à titre d'exemple uniquement, en référence aux figures, dans lesquelles :
- [0432] la [Fig.1] est une vue latérale en coupe d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0433] la [Fig.2] est une vue latérale en coupe rapprochée d'une partie amont d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0434] la [Fig.3] est une vue partiellement écorchée d'une boîte d'engrenages pour un moteur à turbine à gaz ;
- [0435] la [Fig.4] est une vue schématique d'un aéronef comportant deux sources de carburant ;
- [0436] la [Fig.5] est une vue schématique d'un système de combustion d'un moteur à turbine à gaz relié à deux sources de carburant ;
- [0437] la [Fig.6] illustre une relation entre le débit de carburant et le nombre de nvPM ;
- [0438] la [Fig.7] illustre des dépendances du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant pour diverses compositions de carburant ;
- [0439] la [Fig.8] illustre une autre dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant pour diverses compositions de carburant ;
- [0440] la [Fig.9] représente une vue schématique d'un autre système de combustion ;
- [0441] la [Fig.10] illustre la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant pour l'agencement de la [Fig.9] ;
- [0442] la [Fig.11] illustre un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0443] la [Fig.12] représente une vue schématique d'un autre système de combustion ;
- [0444] la [Fig.13] illustre la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant pour l'agencement de la [Fig.12] ;
- [0445] la [Fig.14] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0446] la [Fig.15] illustre un autre exemple de la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant pour l'agencement de la [Fig.12] ;
- [0447] la [Fig.16] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0448] la [Fig.17] représente une vue schématique d'un autre système de combustion ;
- [0449] la [Fig.18] illustre la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant pour l'agencement représenté à la [Fig.17] ;
- [0450] la [Fig.19] illustre une région de nombres de nvPM réalisables en fonction du débit

de carburant pour l'agencement représenté à la [Fig.17] ;

- [0451] la [Fig.20] illustre une autre dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant pour l'agencement représenté à la [Fig.17] ;
- [0452] la [Fig.21] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0453] la [Fig.22] illustre la dépendance de l'indice d'émission (EI) du monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC) non brûlés sur le réglage de la puissance du moteur ;
- [0454] la [Fig.23] illustre la dépendance de l'indice d'émission (EI) du monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC) non brûlés par rapport au réglage de la puissance du moteur avec un point d'étagement (SP) réglé pour définir les première et seconde plages de fonctionnement en régime de croisière ;
- [0455] la [Fig.24] illustre la dépendance de l'indice d'émission de nvPM par rapport au réglage de la puissance du moteur ;
- [0456] la [Fig.25] illustre la dépendance de l'indice d'émission de nvPM par rapport au réglage de la puissance du moteur pour illustrer le résultat de l'utilisation sélective d'un carburant d'une caractéristique différente pendant un premier fonctionnement en régime de croisière de moteur ;
- [0457] la [Fig.26] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0458] la [Fig.27] illustre la dépendance de l'indice d'émission (EI) de CO et de HC par rapport au réglage de la puissance du moteur pour illustrer l'effet d'une plage de fonctionnement de transition entre une plage de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale ;
- [0459] la [Fig.28] illustre la dépendance de l'indice d'émission de nvPM par rapport au réglage de la puissance du moteur pour illustrer en outre l'effet de la plage de fonctionnement de transition ;
- [0460] la [Fig.29] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0461] la [Fig.30] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0462] la [Fig.31] représente une vue schématique d'un autre système de combustion ;
- [0463] la [Fig.32] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0464] la [Fig.33] illustre un autre procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz ;
- [0465] la [Fig.34] illustre un procédé de détermination d'un ou plusieurs paramètres de chargement de carburant ;
- [0466] la [Fig.35] illustre un procédé de chargement de carburant sur un aéronef ;
- [0467] la [Fig.36] montre une vue schématique d'un système de détermination de paramètres de chargement de carburant ;
- [0468] la [Fig.37] illustre un procédé de détermination d'une attribution de carburant optimisée à l'échelle de la flotte pour une pluralité de vols ;
- [0469] la [Fig.38] illustre une optimisation par vol pour déterminer une utilisation optimisée de carburant ;

- [0470] la [Fig.39] illustre un procédé de chargement de carburant sur une pluralité d'aéronefs ;
- [0471] la [Fig.40] montre une vue schématique d'un système de détermination de paramètres d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte ; et
- [0472] la [Fig.41] montre une vue schématique d'un dispositif informatique.
- [0473] La [Fig.1] illustre un moteur à turbine à gaz 10 ayant un axe de rotation principal 9. Le moteur 10 comprend une entrée d'air 12 et un ventilateur de propulsion 23 qui génère deux flux d'air : un flux d'air central A et un flux d'air de dérivation B. Le moteur à turbine à gaz 10 comprend une partie centrale 11 qui reçoit le flux d'air central A. La partie centrale 11 comprend, en série de flux axial, un compresseur à basse pression 14, un compresseur à haute pression 15, un équipement de combustion 16, une turbine à haute pression 17, une turbine à basse pression 19 et une tuyère d'échappement centrale 20. Une nacelle 21 entoure le moteur à turbine à gaz 10 et définit un conduit de dérivation 22 et une tuyère d'échappement de dérivation 18. Le flux d'air de dérivation B s'écoule à travers le conduit de dérivation 22. La soufflante 23 est fixée à et entraînée par la turbine basse pression 19 par l'intermédiaire d'un arbre 26 et d'une boîte d'engrenages épicycloïdaux 30.
- [0474] Lors de l'utilisation, le flux d'air central A est accéléré et comprimé par le compresseur à basse pression 14 et dirigé dans le compresseur à haute pression 15 où une compression supplémentaire se produit. L'air comprimé évacué du compresseur à haute pression 15 est dirigé dans l'équipement de combustion 16 où il est mélangé avec du carburant F et le mélange est brûlé. L'équipement de combustion 16 peut être appelé chambre de combustion 16, les expressions « équipement de combustion 16 » et « chambre de combustion 16 » étant utilisées de manière interchangeable ici. Les produits de combustion chauds obtenus se détendent à travers les turbines haute pression et basse pression 17, 19 et entraînent de ce fait celles-ci, avant d'être évacués à travers la tuyère 20 pour fournir une certaine poussée propulsive. La turbine à haute pression 17 entraîne le compresseur à haute pression 15 par un arbre d'interconnexion approprié 27. La soufflante 23 fournit généralement la majeure partie de la poussée propulsive. La boîte d'engrenages épicycloïdaux 30 est une boîte de réduction.
- [0475] Un agencement donné à titre d'exemple pour un moteur à turbine à gaz à soufflante à engrenages 10 est illustré à la [Fig.2]. La turbine à basse pression 19 (voir [Fig.1]) entraîne l'arbre 26, qui est accouplé à une roue solaire, ou engrenage solaire, 28 de l'agencement d'engrenages épicycloïdaux 30. Radialement vers l'extérieur de l'engrenage solaire 28 et s'engrenant avec celui-ci se trouve une pluralité d'engrenages satellites 32 qui sont accouplés ensemble par un porte-satellites 34. Le porte-satellites 34 contraint les engrenages satellites 32 à se précéder autour de l'engrenage solaire 28 en synchronisme tout en permettant que chaque engrenage satellite 32 tourne

autour de son propre axe. Le porte-satellites 34 est accouplé par l'intermédiaire de liaisons 36 à la soufflante 23 afin d'entraîner sa rotation autour de l'axe de moteur 9. Radialement vers l'extérieur des engrenages satellites 32 et s'engrenant avec ceux-ci se trouve un anneau ou couronne 38 qui est accouplé, par l'intermédiaire de liaisons 40, à une structure de support stationnaire 24.

[0476] Il convient de noter que les expressions « turbine à basse pression » et « compresseur à basse pression », telles qu'utilisées ici, peuvent être prises pour désigner les étages de turbine de plus basse pression et les étages de compresseur de plus basse pression (c'est-à-dire ne comportant pas la soufflante 23) respectivement et/ou les étages de turbine et de compresseur qui sont reliés ensemble par l'arbre d'interconnexion 26 avec la vitesse de rotation la plus basse dans le moteur (c'est-à-dire ne comportant pas l'arbre de sortie de boîte d'engrenages qui entraîne la soufflante 23). Dans certains documents de la littérature, la « turbine à basse pression » et le « compresseur à basse pression » mentionnés ici peuvent en variante être appelés « turbine à pression intermédiaire » et « compresseur à pression intermédiaire ». Lorsqu'une telle nomenclature de rechange est utilisée, la soufflante 23 peut être appelée premier étage de compression, ou étage de compression la plus basse.

[0477] La boîte d'engrenages épicycloïdaux 30 est illustrée à titre d'exemple plus en détail à la [Fig.3]. Chacun de l'engrenage solaire 28, des engrenages satellites 32 et de la couronne 38 comprend des dents autour de leur périphérie pour s'engrener avec les autres engrenages. Cependant, pour plus de clarté uniquement, des parties données à titre d'exemple des dents sont illustrées à la [Fig.3]. Quatre engrenages satellites 32 sont illustrés, bien qu'il apparaitra évident à l'homme du métier que plus ou moins d'engrenages satellites 32 peuvent être fournis dans le champ d'application de l'invention revendiquée. Des applications pratiques d'une boîte d'engrenages épicycloïdaux planétaires 30 comprennent généralement au moins trois engrenages satellites 32.

[0478] La boîte d'engrenages épicycloïdaux 30 illustrée à titre d'exemple sur les Figures 2 et 3 est du type planétaire, en ce que le porte-satellites 34 est accouplé à un arbre de sortie par l'intermédiaire de liaisons 36, avec la couronne 38 fixe. Cependant, tout autre type approprié de boîte d'engrenages épicycloïdaux 30 peut être utilisé. À titre d'exemple supplémentaire, la boîte d'engrenages épicycloïdaux 30 peut être un agencement en étoile, dans lequel le porte-satellites 34 est maintenu fixe, la couronne (ou anneau) 38 étant autorisée à tourner. Dans un tel agencement la soufflante 23 est entraînée par la couronne 38. À titre d'autre exemple supplémentaire, la boîte d'engrenages 30 peut être une boîte d'engrenages différentiels dans lequel la couronne 38 et le porte-satellites 34 sont tous deux autorisés à tourner.

[0479] On comprendra que l'agencement illustré aux Figures 2 et 3 est donné à titre

d'exemple uniquement, et diverses variantes sont dans le champ d'application de la présente description. Strictement à titre d'exemple, un quelconque agencement approprié peut être utilisé pour localiser la boîte d'engrenages 30 dans le moteur 10 et/ou pour raccorder la boîte d'engrenages 30 au moteur 10. À titre d'exemple supplémentaire, les raccordements (tels que les liaisons 36, 40 dans l'exemple de la [Fig.2]) entre la boîte d'engrenages 30 et d'autres parties du moteur 10 (telles que l'arbre d'entrée 26, l'arbre de sortie et la structure fixe 24) peuvent avoir n'importe quel degré souhaité de rigidité ou de flexibilité. À titre d'exemple supplémentaire, n'importe quel agencement approprié des paliers entre des parties rotatives et stationnaires du moteur (par exemple entre les arbres d'entrée et de sortie de la boîte d'engrenages et les structures fixes, notamment le carter de boîte d'engrenages) peut être utilisé, et l'invention n'est pas limitée à l'agencement donné à titre d'exemple de la [Fig.2]. Par exemple, lorsque la boîte d'engrenages 30 a un agencement en étoile (décrit ci-dessus), l'homme du métier comprendra aisément que l'agencement des liaisons de sortie et de support et des emplacements de paliers serait généralement différent de celui illustré à titre d'exemple à la [Fig.2].

[0480] Ainsi, la présente description s'étend à un moteur à turbine à gaz ayant n'importe quel agencement de styles de boîte d'engrenages (par exemple en étoile ou planétaire), de structures de support, d'agencement d'arbre d'entrée et de sortie, et d'emplacements de paliers.

[0481] Éventuellement, la boîte d'engrenages peut entraîner des éléments supplémentaires et/ou différents (par exemple le compresseur à pression intermédiaire et/ou un surpresseur).

[0482] D'autres moteurs à turbine à gaz auxquels la présente description peut être appliquée peuvent avoir des configurations différentes. Par exemple, de tels moteurs peuvent avoir un nombre différent de compresseurs et/ou de turbines et/ou un nombre différent d'arbres d'interconnexion. À titre d'exemple supplémentaire, le moteur à turbine à gaz représenté à la [Fig.1] a une tuyère à flux divisé 18, 20, ce qui signifie que le flux à travers le conduit de dérivation 22 a sa propre tuyère 18 qui est distincte de la tuyère de moteur central 20 et radialement à l'extérieur de celle-ci. Cependant, ceci n'est pas limitatif, et tout aspect de la présente description peut également s'appliquer à des moteurs dans lesquels le flux à travers le conduit de dérivation 22 et le flux à travers le noyau 11 sont mélangés, ou combinés, avant (ou en amont) d'une seule tuyère, qui peut être appelée tuyère à flux mixte. Une ou les deux tuyères (qu'il s'agisse d'un flux mixte ou divisé) peuvent avoir une surface fixe ou variable.

[0483] Alors que l'exemple décrit se rapporte à un turboréacteur à double flux, la description peut s'appliquer, par exemple, à tout type de moteur à turbine à gaz, tel qu'un rotor ouvert (dans lequel l'étage de soufflante n'est pas entouré par une nacelle) ou un turbo-

propulseur, par exemple. Dans certains agencements, le moteur à turbine à gaz 10 peut ne pas comprendre de boîte d'engrenages 30.

- [0484] La géométrie du moteur à turbine à gaz 10, et des composants associés, est définie par un système d'axe classique, comprenant une direction axiale (qui est alignée sur l'axe de rotation 9), une direction radiale (dans la direction de bas en haut à la [Fig.1]), et une direction circonférentielle (perpendiculaire à la page dans la vue de la [Fig.1]). Les directions axiale, radiale et circonférentielle sont perpendiculaires entre elles.
- [0485] Le carburant F fourni à l'équipement de combustion 16 peut comprendre un carburant hydrocarboné fossile, tel que du kérosène. Ainsi, le carburant F peut comprendre des molécules provenant d'une ou plusieurs des familles chimiques des n-alcanes, isoalcanes, cycloalcanes et composés aromatiques. En outre ou en variante, le carburant F peut comprendre des hydrocarbures renouvelables produits à partir de ressources biologiques ou non biologiques, autrement connus sous le nom de carburant d'aviation durable (SAF). Dans chacun des exemples fournis, le carburant F peut comprendre un ou plusieurs éléments à l'état de traces incluant, par exemple, le soufre, l'azote, l'oxygène, des matières inorganiques et des métaux.
- [0486] Des performances fonctionnelles d'une composition donnée, ou d'un mélange de carburant à utiliser dans une mission donnée, peuvent être définies, au moins en partie, par la capacité du carburant à entretenir le cycle de Brayton du moteur à turbine à gaz 10. Des paramètres définissant des performances fonctionnelles peuvent inclure, par exemple, une énergie spécifique ; une densité énergétique ; une stabilité thermique ; et, des émissions incluant des matières particulaires. Une énergie spécifique relativement plus élevée (c'est-à-dire une énergie par unité de masse), exprimée en MJ/kg, peut réduire au moins partiellement le poids au décollage, ce qui permet potentiellement une amélioration relative du rendement de carburant. Une densité énergétique relativement plus élevée (c'est-à-dire une énergie par unité de volume), exprimée en MJ/L, peut réduire au moins partiellement le volume de carburant au décollage, ce qui peut être particulièrement important pour des missions à volume limité ou des fonctionnements militaires impliquant un ravitaillement. Une stabilité thermique relativement plus élevée (c'est-à-dire une inhibition du carburant à dégrader ou coke sous contrainte thermique) peut permettre au carburant de soutenir des températures élevées dans le moteur et les injecteurs de carburant, ce qui permet potentiellement d'apporter des améliorations relatives au rendement de combustion. La réduction des émissions, y compris des matières particulaires, peut permettre de réduire la formation de traînées de condensation, tout en réduisant l'impact environnemental d'une mission donnée. D'autres propriétés du carburant peuvent également être déterminantes pour les performances fonctionnelles. Par exemple, un point de congélation relativement inférieur (°C) peut permettre des missions à long rayon

d'action pour optimiser les profils de vol ; les concentrations aromatiques minimales (%) peuvent assurer un gonflement suffisant de certains matériaux utilisés dans la construction de joints toriques et de joints qui ont été préalablement exposés aux carburants à fortes teneurs en composés aromatiques ; et, une tension de surface maximale (mN/m) peut assurer une fragmentation de pulvérisation et une atomisation suffisantes du carburant.

- [0487] Le rapport du nombre d'atomes d'hydrogène au nombre d'atomes de carbone dans une molécule peut influencer l'énergie spécifique d'une composition donnée, ou du mélange de carburant. Les carburants ayant des rapports plus élevés des atomes d'hydrogène aux atomes de carbone peuvent avoir des énergies spécifiques plus élevées en l'absence de contrainte de liaison. Par exemple, les carburants hydrocarbonés fossiles peuvent comprendre des molécules d'environ 7 à 18 atomes de carbone, une partie significative d'une composition donnée étant issue de molécules ayant 9 à 15 atomes de carbone, avec une moyenne de 12 atomes de carbone.
- [0488] Un certain nombre de mélanges de carburants d'aviation durables ont été approuvés pour utilisation, comprenant entre 10 % et 50 % de carburant d'aviation durable (le reste comprenant un ou plusieurs carburants hydrocarbonés fossiles, tels que le kérosène), avec des compositions supplémentaires en attente d'approbation. Toutefois, l'industrie aéronautique s'attend à ce que l'utilisation de mélanges de carburants d'aviation durables allant jusqu'à (et incluant) 100 % de carburant d'aviation durable aviation (SAF) soit approuvée pour utilisation.
- [0489] Les carburants d'aviation durables peuvent comprendre un ou plusieurs parmi des n-alcanes, des isoalcanes, des cycloalcanes et des composés aromatiques, et peuvent être produits, par exemple, à partir d'un ou plusieurs gaz de synthèse (syngas) ; des lipides (par exemple, des matières grasses, des huiles et des graisses) ; des sucres ; et des alcools. Ainsi, les carburants d'aviation durables peuvent comprendre une teneur inférieure en composés aromatiques et/ou en soufre, par rapport aux carburants hydrocarbonés fossiles. En outre ou en variante, des carburants d'aviation durables peuvent comprendre un taux d'isoalcane et/ou de cycloalcane plus élevé, par rapport aux carburants hydrocarbonés fossiles. Ainsi, dans certains exemples, des carburants d'aviation durables peuvent comprendre une densité comprise entre 90 % et 98 % de celle du kérosène et/ou un pouvoir calorifique compris entre 101 % et 105 % de celui du kérosène.
- [0490] Grâce au moins en partie à la structure moléculaire des carburants d'aviation durables, les carburants d'aviation durables peuvent avoir des effets bénéfiques incluant, par exemple, un ou plusieurs parmi une énergie spécifique plus élevée (malgré, dans certains exemples, une densité énergétique inférieure) ; une capacité thermique spécifique plus élevée ; une stabilité thermique plus élevée ; un pouvoir lu-

brifiant plus élevé ; une viscosité plus faible ; une tension de surface plus faible ; un point de congélation plus faible ; des émissions de suie plus faibles ; et, des émissions de CO₂ plus faibles, par rapport aux carburants hydrocarbonés fossiles (par exemple lorsqu'ils sont brûlés dans l'équipement de combustion 16). Ainsi, par rapport aux carburants hydrocarbonés fossiles, tels que le kérosène, les carburants d'aviation durables peuvent conduire à une diminution relative de la consommation spécifique de carburant, et/ou une diminution relative des coûts de maintenance.

[0491] Système de carburant d'aéronef et caractéristiques de carburant

[0492] Un aéronef 1 comprenant deux moteurs à turbine à gaz 10 selon l'un quelconque des exemples décrits ici est illustré à la [Fig.4]. Dans cet exemple, l'aéronef 1 comprend deux moteurs à turbine à gaz 10, mais dans d'autres exemples il peut comprendre un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz. L'aéronef 1 comprend en outre un système de carburant d'aéronef situé à bord de l'aéronef approprié à fournir du carburant F à chacun des moteurs à turbine à gaz 10 pour être brûlé dans l'équipement de combustion de moteur 16 tel que décrit ci-dessus. Le système de carburant d'aéronef est conçu pour fournir du carburant à un système de carburant de moteur prévu sur chacun des moteurs à turbine à gaz 10. Le système de carburant de moteur et le système de carburant d'aéronef forment ensemble le système d'alimentation en carburant de l'aéronef 1.

[0493] Le système de carburant d'aéronef comprend deux sources de carburant, une première source de carburant 302 et une seconde source de carburant 304 (ayant un ombrage différent à la [Fig.4]). Aux fins de la présente demande l'expression « source de carburant » désigne soit 1) un seul réservoir de carburant, soit 2) une pluralité de réservoirs de carburant qui peuvent ou non être fluidiquement interconnectés. Chacune des sources de carburant est conçue pour fournir des sources de carburant distinctes, c'est-à-dire que la première source de carburant peut contenir un premier carburant ayant une ou des caractéristiques différentes d'un second carburant contenu dans la seconde source de carburant. Les première et seconde sources de carburant ne sont donc pas accouplées fluidiquement l'une à l'autre de manière à séparer les différents carburants (au moins dans des conditions normales d'exploitation comme indiqué ailleurs ici).

[0494] Le système de carburant d'aéronef peut comprendre une pluralité de réservoirs de carburant qui peuvent être en communication fluidique de manière sélective dans différents agencements pour former les première et seconde sources de carburant. Les réservoirs de carburant peuvent comprendre des vannes d'arrêt associées de sorte que différentes combinaisons de réservoirs peuvent être regroupées dans différentes configurations. Dans de tels exemples, il peut y avoir plusieurs façons d'attribuer des réservoirs individuels de carburant à la première source de carburant et à la seconde

source de carburant. Dans d'autres exemples l'attribution de réservoirs de carburant à chacune des sources de carburant peut être fixe. Dans le présent exemple, le volume total de réservoirs de carburant formant la première source de carburant 302 est inférieur ou égal au volume des réservoirs de carburant formant la seconde source de carburant 304. Ceci peut toutefois ne pas être le cas pour d'autres exemples.

[0495] Dans le présent exemple, les première et seconde sources de carburant 302, 304 comprennent une pluralité de réservoirs de carburant d'aile 53, où au moins un réservoir de carburant d'aile est situé dans l'aile gauche et au moins un réservoir de carburant d'aile est situé dans l'aile droite, et un réservoir de carburant central 55 situé principalement dans le fuselage de l'aéronef 1. Chacun du réservoir de carburant central 55 et des réservoirs de carburant d'aile 53 peut comprendre une pluralité de réservoirs de carburant interconnectés fluidiquement non représentés sur les figures. Comme le montre l'ombrage à la [Fig.4], les réservoirs 53 de carburant d'aile forment la première source de carburant 302, la seconde source de carburant 304 étant formée par le réservoir de carburant central 55, dans le présent exemple.

[0496] À des fins d'équilibrage, un ou plusieurs réservoirs de carburant dans l'aile gauche peuvent être en communication fluide avec un ou plusieurs réservoirs de carburant dans l'aile droite. Ceci est réalisable soit par le biais d'un réservoir de carburant central (si ce réservoir ne fait pas partie de l'autre source de carburant), soit en contournant le ou les réservoirs de carburant centraux, soit les deux (pour une flexibilité et une sécurité maximales).

[0497] Dans un autre exemple, la seconde source de carburant 304 comprend des réservoirs de carburant d'aile et un réservoir de carburant central, tandis que la première source de carburant 302 comprend un réservoir de carburant central supplémentaire. L'interconnexion fluide entre les réservoirs de carburant d'aile et le réservoir de carburant central de la seconde source de carburant peut être prévue pour équilibrer l'aéronef.

[0498] Dans certains exemples, l'attribution de réservoirs de carburant disponibles sur l'aéronef peut être contrainte de telle sorte que la première source de carburant et la seconde source de carburant 302, 304 sont chacune sensiblement symétriques par rapport à la ligne centrale de l'aéronef. Dans les cas où une attribution asymétrique des réservoirs de carburant est autorisée, un moyen de transfert de carburant approprié est prévu entre des réservoirs de carburant de la première source de carburant et/ou entre des réservoirs de carburant de la seconde source de carburant de telle sorte que la position du centre de masse de l'aéronef peut être maintenue dans des limites latérales acceptables tout au long du vol.

[0499] Un réservoir de carburant d'équilibrage pourrait dans certains exemples faire partie de la première source de carburant 302, ou dans d'autres exemples faire partie de la

seconde source de carburant 304. L'attribution de réservoirs de carburant à la première source de carburant 302 et à la seconde source de carburant 304 peut être contrainte de telle sorte que ni la première source de carburant 302 ni la seconde source de carburant 304 ne comprennent uniquement le réservoir de carburant d'équilibrage.

- [0500] Alors que les exemples décrits dans la présente demande ne comportent qu'une première et une seconde source de carburant 302, 304, dans d'autres exemples des sources de carburant supplémentaires peuvent être fournies de sorte que du carburant provenant d'un nombre quelconque de sources, ayant chacune une caractéristique ou des caractéristiques de carburant différentes peut être fourni à la chambre de combustion par l'intermédiaire du régulateur de distribution de carburant.
- [0501] Les première et seconde sources de carburant 302, 304 peuvent être utilisées pour stocker du carburant ayant des caractéristiques différentes. Ceci peut permettre de fournir du carburant ayant des caractéristiques différentes à l'équipement de combustion 16 comme cela sera décrit plus en détail dans les divers exemples ci-dessous.
- [0502] Telle qu'utilisée ici, l'expression « caractéristiques de carburant » désigne des propriétés de carburant intrinsèques ou inhérentes telles que la composition du carburant, des propriétés invariables telles que le volume ou la température. Des exemples de caractéristiques de carburant incluent un ou plusieurs parmi :
- [0503] i. le pourcentage de carburant d'aviation durable (SAF) dans le carburant, ou une indication que le carburant est un carburant fossile, par exemple du kérosène fossile, ou un SAF pur ;
- [0504] ii. des paramètres d'une distribution d'hydrocarbures du carburant, tels que :
- [0505] ● la teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant, et éventuellement également/en variante la teneur en hydrocarbures multi-aromatiques du carburant ;
- [0506] ● le rapport hydrogène sur carbone (H/C) du carburant ;
- [0507] ● des informations de composition en % pour certains ou tous les hydrocarbures présents ;
- [0508] iii. la présence ou le pourcentage d'un élément particulier ou d'une espèce particulière, notamment :
- [0509] ● le pourcentage d'espèces azotées dans le carburant ;
- [0510] ● la présence ou le pourcentage d'une espèce de traceur ou d'élément à l'état de trace dans le carburant (par exemple une substance à l'état de trace présente de manière inhérente dans le carburant qui peut varier entre les carburants et ainsi être utilisée pour identifier un carburant, et/ou une substance ajoutée volontairement pour agir comme traceur) ;
- [0511] ● la teneur en naphtalène du carburant ;
- [0512] ● la teneur en soufre du carburant ;

- [0513] ● la teneur en cycloparaffine du carburant ;
- [0514] ● la teneur en oxygène du carburant ;
- [0515] iv. une ou plusieurs propriétés du carburant lors de l'utilisation dans un moteur à turbine à gaz 10, telles que :
- [0516] ● le taux d'émissions de matières particulaires non volatiles (nvPM) ou des émissions de CO₂ à la combustion (une valeur peut être fournie pour une chambre de combustion spécifique fonctionnant dans des conditions particulières pour comparer les carburants de façon juste ; une valeur mesurée peut être ajustée en ce sens en fonction des propriétés et des conditions de la chambre de combustion) ;
- [0517] ● le niveau de calaminage du carburant ;
- [0518] v. une ou plusieurs propriétés du carburant lui-même, indépendamment d'une utilisation dans un moteur ou une combustion, telles que :
- [0519] ● la stabilité thermique du carburant (par exemple la température de claquage thermique) ; et
- [0520] ● une ou plusieurs propriétés physiques telles que la densité, la viscosité, la valeur calorifique, la température de congélation et/ou la capacité thermique.
- [0521] L'aéronef 1 peut être ravitaillé en reliant une source de ravitaillement 60, telle que celle fournie par un camion de carburant aéroportuaire, un stockage de carburant fixe, ou un pipeline permanent, à un orifice de raccordement 62 de la conduite de carburant de l'aéronef, par l'intermédiaire d'une conduite de carburant 61. Une quantité souhaitée de carburant peut être transférée de la source de ravitaillement 60 aux un ou plusieurs réservoirs 53, 55 de l'aéronef 1. Dans l'exemple présent dans lequel des réservoirs 53, 55 différents doivent être remplis de carburants différents, de multiples orifices 62 de raccordement de la conduite de carburant sont prévus. La source de ravitaillement 60 présente donc dans cet exemple deux carburants, ayant des caractéristiques de carburant différentes, dans des récipients séparés 60a, 60b (par exemple un carburant par défaut et non par défaut comme décrit plus loin) dans des réservoirs séparés. Dans d'autres exemples, des vannes peuvent être utilisées pour diriger le carburant de manière appropriée s'il est reçu depuis un seul orifice de raccordement.
- [0522] Les caractéristiques de carburant peuvent être obtenues par soit :
- [0523] (i) la détection physique et/ou chimique d'une ou plusieurs caractéristiques d'un carburant, soit pendant le fonctionnement de l'aéronef (par exemple sur l'aile), soit lorsque l'aéronef est en cours de ravitaillement ;
- [0524] (iii) la réception de données, par exemple à partir d'une entrée fournie au niveau d'une interface utilisateur, ou de données transmises à l'aéronef 1.
- [0525] Les caractéristiques de carburant peuvent être détectées de différentes manières, à la fois directe (par exemple à partir de données de capteur correspondant à la caractéristique de carburant en question) et indirecte (par exemple par inférence ou calcul à

partir d'autres caractéristiques ou mesures). Les caractéristiques peuvent être déterminées comme étant des valeurs relatives comparativement à un autre carburant, ou en tant que valeurs absolues. Par exemple, un ou plusieurs des procédés de détection suivants peuvent être utilisés :

- [0526] • La teneur en composés aromatiques ou en cycloparaffine du carburant peut être déterminée en fonction de mesures du gonflement d'un composant capteur réalisées à partir d'un matériau d'étanchéité tel qu'un matériau de scellement au nitrile.
- [0527] • Des substances ou espèces à l'état de traces, soit présentes naturellement dans le carburant, soit ajoutées pour jouer le rôle de traceur, peuvent être utilisées pour déterminer les caractéristiques du carburant telles que le pourcentage de carburant d'aviation durable dans le carburant ou si le carburant est du kérosène ou non.
- [0528] • Les mesures du mode vibratoire d'un cristal piézoélectrique exposé au carburant peuvent être utilisées comme base pour la détermination de différentes caractéristiques de carburant incluant la teneur en composés aromatiques du carburant, la teneur en oxygène du carburant, et la stabilité thermique ou le niveau de calaminage du carburant (par exemple en mesurant l'accumulation de dépôts de surface sur le cristal piézoélectrique ce qui va entraîner un changement de mode vibratoire).
- [0529] • Diverses caractéristiques de carburant peuvent être déterminées en collectant des paramètres de performances du moteur à turbine à gaz 10 pendant une première période de fonctionnement (notamment pendant le décollage) puis pendant une seconde période de fonctionnement (par exemple pendant la croisière) comparant ces paramètres collectés à des valeurs attendues si l'on utilise du carburant de propriétés connues.
- [0530] • Différentes caractéristiques de carburant comprenant la teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant peuvent être déterminées en fonction de mesures de capteur de la présence, de l'absence ou du degré de formation d'une traînée de condensation par la turbine à gaz 10 lors de son fonctionnement.
- [0531] • Les caractéristiques de carburant incluant la teneur en hydrocarbures aromatiques peuvent être déterminées en fonction d'une mesure de spectroscopie UV-Vis effectuée sur le carburant.
- [0532] • Différentes caractéristiques de carburant incluant la teneur en soufre, la teneur en naphthalène, la teneur en hydrogène aromatique et le rapport hydrogène sur carbone peuvent être déterminées par la mesure de substances présentes dans les gaz d'échappement émis par le moteur à turbine à gaz 10 lors de son utilisation.
- [0533] • La valeur calorifique du carburant peut être déterminée lors du fonctionnement de l'aéronef 1 en fonction de mesures prises lorsque le carburant est brûlé, par exemple en utilisant le débit de carburant et la vitesse d'arbre ou le changement de température sur l'ensemble de la chambre de combustion 16.

- [0534] • Diverses caractéristiques de carburant peuvent être déterminées en faisant un changement opérationnel conçu pour affecter le fonctionnement du moteur à turbine à gaz 10, en détectant une réponse au changement opérationnel ; et en déterminant la ou les caractéristiques de carburant du carburant en fonction de la réponse au changement opérationnel.
- [0535] • Diverses caractéristiques de carburant peuvent être déterminées par rapport aux caractéristiques de carburant d'un premier carburant en changeant un carburant introduit dans le moteur à turbine à gaz 10 du premier carburant à un second carburant, et en déterminant la ou les caractéristiques de carburant du second carburant en fonction d'un changement d'une relation entre T30 et T40 ou T41 (la relation étant indicative de l'augmentation de température sur l'ensemble de la chambre de combustion 16). Les caractéristiques peuvent être déterminées comme étant des valeurs relatives comparativement au premier carburant, ou en tant que valeurs absolues par référence à des valeurs connues pour le premier carburant.
- [0536] Tels qu'utilisées ici et indiquées plus bas, les valeurs T30, T40 et T41, et n'importe quelles autres pressions et températures numérotées, sont définies en utilisant la numérotation de station répertoriée dans la norme SAE AS755, en particulier :
- [0537] • T30 = température de sortie du compresseur à haute pression (HPC) ;
- [0538] • T40 = températures de sortie de combustion ; et
- [0539] • T41 = température d'entrée du rotor haute pression (HPT).
- [0540] Système de combustion
- [0541] La [Fig.5] illustre de manière schématique des détails supplémentaires de l'équipement de combustion 16 (qui peut être simplement appelé « la chambre de combustion ») du moteur à turbine à gaz 10. Dans cet exemple, l'équipement de combustion fait partie d'un système de chambre de combustion étagée 64 dans lequel du carburant est injecté par l'intermédiaire d'injecteurs de carburant pilotes et principaux. Le carburant est fourni aux injecteurs de carburant au moyen d'un régulateur de distribution de carburant 306 sous le contrôle d'un régulateur électronique moteur (EEC) 42. Le carburant est distribué au régulateur de distribution de carburant par des pompes à carburant 308a, 308b. Dans le présent exemple, le carburant est fourni au régulateur de distribution de carburant 306 à partir de deux sources de carburant différentes (la première source de carburant 302 et la seconde source de carburant 304) comme décrit ci-dessus. Le carburant provenant de chacune des première et seconde sources de carburant 302, 304 est fourni par une première pompe à carburant 308a et une seconde pompe à carburant 308b respectives. Chacune de ces pompes à carburant peut être entraînée mécaniquement par une boîte d'engrenages accessoire. Dans des configurations de substitution, par exemple dans une configuration de moteur plus électrique (MEE), la pompe à carburant peut être électrique. L'homme du métier

comprendra que toute configuration appropriée connue d'une pompe à carburant ou d'une combinaison de pompes à carburant peut être utilisée pour distribuer du carburant à partir des réservoirs de carburant 53, 55 à la chambre de combustion 16.

- [0542] Le carburant haute pression est distribué par le régulateur de distribution de carburant 306 dans un collecteur pilote 309 et un collecteur principal 310. Dans l'exemple présent, le système de combustion étagée comprend une pluralité de tuyères de carburant 311 qui sont conçues en tant qu'injecteurs de carburant duplex (également connus sous le nom de à étagement interne). Dans l'exemple présent, 16 tuyères de carburant espacées circonférentiellement sont disposées autour d'une chambre de combustion annulaire 312. Comme on le comprendra, plus ou bien moins d'injecteurs de carburant peuvent être fournis en fonction des exigences de taille et de conception du moteur physique. En outre, différentes configurations de chambre de combustion peuvent être utilisées, par exemple en forme de canule, de tube, etc.
- [0543] Le carburant provenant du collecteur pilote 309 et du collecteur principal 310 est distribué à toutes les tuyères de carburant 311 pour injection dans la chambre de combustion tubulaire 312. Dans le présent exemple, un injecteur de carburant pilote central 313 produit un jet de carburant pilote dans une zone primaire de la chambre de combustion tubulaire 312, tandis qu'un injecteur de carburant principal concentrique 314 produit un jet principal de carburant.
- [0544] La distribution de carburant par l'intermédiaire des injecteurs de carburant pilotes et principaux 313, 314 est étagée, donc à des puissances faibles (et donc des flux massiques d'air faibles), le carburant est distribué par l'injecteur de carburant pilote central 313 à un rapport carburant-air riche (c'est-à-dire à un rapport d'équivalence supérieur à l'unité) pour une stabilité de flamme améliorée. Dans le présent exemple, à mesure que la puissance et le flux massique augmentent, un point d'étagement (SP) auquel le carburant est distribué par tout ou partie des injecteurs principaux de carburant des tuyères de carburant est atteint, complétant le flux de carburant des injecteurs de carburant pilotes. Les injecteurs de carburant principaux 314 sont conçus pour injecter du carburant à un rapport carburant-air pauvre (c'est-à-dire à un rapport d'équivalence inférieur à l'unité). À ce stade, le flux d'air est tel que le rapport d'équivalence immédiatement en aval des injecteurs de carburant pilotes est également pauvre en carburant. Dans le présent exemple, à des niveaux de puissance plus élevés, le carburant est injecté par tous les injecteurs de carburant principaux.
- [0545] Le système de combustion étagée est donc caractérisé par une zone de fonctionnement « à injection pilote seule » et une zone de fonctionnement « à injection pilote et principale ». Les deux régions sont séparées par le point d'étagement. En fonctionnement « à injection pilote seule », tout flux de carburant fourni au sein de la chambre de combustion est fourni uniquement par un ou plusieurs injecteurs de

carburant pilotes. En fonctionnement « à injection pilote et principale », le carburant est fourni au sein de la chambre de combustion par le ou les injecteurs de carburant pilotes et par le ou les injecteurs de carburant principaux, ou seulement les injecteurs de carburant principaux. Le régulateur de distribution de carburant 306 est donc conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant principaux, ou à la fois aux injecteurs de carburant principaux et pilotes, lors d'un fonctionnement à injection pilote et principale. Le régulateur de distribution de carburant peut être conçu pour distribuer du carburant à la fois aux injecteurs de carburant pilotes et principaux pendant un fonctionnement à injection pilote et principale plutôt que d'éteindre les injecteurs de carburant pilotes en cas d'un fonctionnement d'urgence rapide pour maintenir la chambre de combustion allumée. Pendant le fonctionnement à injection pilote uniquement, le régulateur de distribution de carburant fournit du carburant uniquement aux injecteurs de carburant pilotes.

[0546] Pour une condition de fonctionnement particulière telle que l'altitude ou la pression d'air ambiante, le point d'étagement SP est généralement défini par une valeur seuil d'un paramètre de fonctionnement de moteur représentatif du réglage de puissance moteur, telle que T30 (température totale à la sortie du compresseur) ou T40 calculée (température totale à la sortie de la chambre de combustion) ou du rapport air-carburant de la chambre de combustion (FAR). On comprendra que différentes valeurs seuil peuvent s'appliquer pour différentes conditions de fonctionnement.

[0547] L'homme du métier connaît bien un tel fonctionnement des systèmes de combustion étagée dans le but d'influer sur une combustion pauvre à des puissances élevées tout en respectant les limites de stabilité de la flamme à des puissances plus faibles. De plus, il connaît également d'autres configurations de combustion étagée, par exemple celles avec des injecteurs de carburant pilotes et principaux distincts (par opposition au duplex ou à l'étagement interne), qui peuvent être disposées en parallèle (radialement séparées, alignées axialement) ou en série (axialement séparés, alignées radialement). On comprendra que les principes décrits ici peuvent être appliqués à un quelconque système de combustion étagée comprenant des injecteurs de carburant principaux et pilotes.

[0548] L'équilibre de l'injection de carburant par les injecteurs de carburant pilotes 313 et les injecteurs de carburant principaux 314 est contrôlée par le régulateur électronique moteur 42, qui fournit des signaux de commande au régulateur de distribution de carburant 306 faisant état du carburant total qui doit être injecté sous la forme d'un débit de carburant (W_F) et du rapport du flux de carburant d'injecteur de carburant pilote au flux de carburant d'injecteur de carburant principal (rapport d'étagement). Le régulateur de distribution de carburant 306 est configuré pour utiliser ces signaux de commande pour distribuer le débit de carburant demandé en fonction du flux global de

carburant demandé et du rapport entre le flux de carburant pilote et le flux de carburant principal. Dans des exemples différents, le régulateur électronique moteur 42 peut plutôt être configuré pour fournir des signaux de commande au régulateur de distribution de carburant 306 qui font état du débit de carburant pilote ($W_{F_{pilote}}$) et le débit de carburant principal ($W_{F_{main}}$). Il va de soi que les informations transmises sont équivalentes.

[0549] Les systèmes de l'état de la technique peuvent simplement fournir du carburant à partir d'une seule source à un régulateur de distribution de carburant de sorte que le carburant ayant les mêmes caractéristiques de carburant (c'est-à-dire la même composition de carburant) est fourni à la fois aux injecteurs de carburant pilotes et aux injecteurs de carburant principaux en tous les points de fonctionnement de la chambre de combustion. Dans la présente demande cependant, le régulateur de distribution de carburant 306 est configuré pour fournir sélectivement du carburant au collecteur principal et pilote à partir de deux sources de carburant différentes comme cela sera décrit plus loin.

[0550] Combustion étagée utilisant du carburant provenant de plus d'une source

[0551] Dans les systèmes de combustion étagée de l'état de la technique, il n'y a accès au carburant qu'à partir d'une seule source, qui est utilisée à la fois dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale. Le carburant ayant les mêmes caractéristiques est donc fourni aux injecteurs de carburant de chambre de combustion par des régulateurs de distribution de carburant de l'état de la technique indépendamment du débit de carburant. Les inventeurs ont déterminé qu'il peut être avantageux de fournir du carburant à partir de sources de carburant différentes ayant des caractéristiques différentes au régulateur de distribution de carburant, et de distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux de telle sorte que du carburant d'une caractéristique différente est fourni dans des plages différentes du fonctionnement de la chambre de combustion. En référence à nouveau au système de combustion étagée représenté à la [Fig.5], le régulateur de distribution de carburant 306 est donc conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement (c'est-à-dire un mode de fonctionnement) à injection pilote seule ayant une caractéristique de carburant différente de celle du carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou injecteurs de carburant principaux 314 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. La caractéristique de carburant différente peut être fournie en utilisant du carburant provenant de la première source de carburant 302, du carburant provenant de la seconde source de carburant 304, ou un mélange de ceux-ci.

[0552] Un avantage de cette alimentation en carburant plus souple vers la chambre de

combustion 16 est que le carburant qui présente des propriétés de combustion favorables, mais dont l'alimentation est limitée, peut être utilisé lorsque ces propriétés favorables auront un effet plus important.

[0553] *Émission de nvPM à partir d'une combustion étagée*

[0554] La [Fig.6] illustre une relation entre le débit de carburant W_F et le taux d'émission des particules de suie (représenté en tant que « nombre de matières particulaires non volatiles (nvPM) » et appelé « nvPM# » ici) pour une chambre de combustion à mélange pauvre habituelle (par exemple un système de chambre de combustion étagée). L'une quelconque référence ici à de la suie peut s'appliquer également à d'autres types de nvPM.

[0555] La [Fig.6] montre une première région, à gauche du point d'étagement SP (à un débit de carburant plus faible que celui du point d'étagement), dans laquelle seuls les injecteurs de carburant pilotes de la chambre de combustion sont opérationnels, et dans laquelle nvPM# monte rapidement avec l'augmentation du débit de carburant W_F . Le fonctionnement dans cette première région sera appelé fonctionnement dans la plage de fonctionnement « à injection pilote seule ».

[0556] La [Fig.6] montre une seconde région, à droite du point d'étagement SP (à un débit de carburant plus élevé que celui au point d'étagement), dans laquelle les injecteurs de carburant pilotes et les injecteurs de carburant principaux fonctionnent, et dans laquelle nvPM# est beaucoup plus bas et s'élève uniquement lentement (le cas échéant) avec une augmentation de W_F . Le fonctionnement dans cette seconde région sera appelé fonctionnement dans la plage de fonctionnement « à injection pilote et principale ». Bien qu'une valeur non nulle de nvPM# dans la plage de fonctionnement « à injection pilote et principale » soit représentée à la [Fig.6], on aura à l'esprit que dans certaines chambres de combustion à mélange pauvre nvPM# dans la plage « à injection pilote et principale » pourrait être sensiblement nul.

[0557] Il faut comprendre que la forme de la courbe représentée à la [Fig.6] n'est qu'un exemple donné à titre d'illustration. Généralement le nvPM# dans un fonctionnement à injection pilote seule est sensiblement supérieur à celui dans un fonctionnement à injection pilote et principale, et il existe une frontière nette entre les deux plages de fonctionnement. Quelques exemples présentés ci-dessous tirent davantage parti du gradient positif de la courbe illustrée dans le fonctionnement à injection pilote seule, mais une fois encore la forme précise de la courbe illustrée à la [Fig.6] n'est qu'un exemple de la dépendance entre W_F et nvPM#.

[0558] La position du point d'étagement SP peut être choisie de telle sorte que le débit de carburant pendant la plupart ou toutes les conditions de régime de croisière tombe à la droite du point d'étagement SP c'est-à-dire dans une région de fonctionnement à injection pilote et principale correspondant à des valeurs très faibles (ou peut-être sen-

siblement nulles) de nvPM#. Inversement, un fonctionnement en de nombreux autres points d'un vol, tels que le roulage, l'approche, la descente, peut correspondre à un fonctionnement « à injection pilote seule » dans laquelle des émissions de nvPM (suie) sont comparativement élevées.

[0559] Il faut comprendre que le point d'étagement SP peut se trouver à différentes valeurs de W_F pour des conditions de vol différentes telles que l'altitude. Par exemple, en régime de croisière où la densité d'air est faible et donc le débit massique du fluide actif à travers le noyau de turbine à gaz est également faible, le point d'étagement SP peut correspondre à un débit de carburant sensiblement inférieur à ce qu'il serait au sol où la densité de l'air ambiant est beaucoup plus élevée.

[0560] Le point d'étagement SP s'appliquant à une condition de vol particulière peut être défini comme étant une valeur absolue de débit de carburant, ou un pourcentage prédéterminé d'un quelconque W_F qui s'applique à la condition de vol. D'autres définitions du point d'étagement peuvent également être utilisées comme cela sera compris par l'homme du métier.

[0561] La présente demande se réfère au nombre de nvPM (ou nvPM#) et à sa dépendance par rapport à W_F , comme illustré à la [Fig.6]. Cependant, on comprendra qu'une relation correspondante pour la masse de nvPM et sa dépendance à W_F peuvent également être envisagées, et que l'appareil et les procédés définis ici peuvent être adaptés en ce sens.

[0562] *Contrôle des émissions de nvPM*

[0563] Le niveau d'émission de nvPM par un moteur à turbine à gaz dépend des caractéristiques du carburant utilisé. Par exemple, certains carburants d'aéronef peuvent être caractérisés par une proportion inférieure de certains constituants connus pour provoquer des émissions de suie par rapport à un kérosène fossile habituel, et ainsi produire une plus faible quantité de suie au même débit de carburant de la chambre de combustion.

[0564] Alors que l'émission de nvPM par un moteur à turbine à gaz peut être réduite efficacement en utilisant du carburant associé à un faible indice de production de nvPM, cela peut ne pas être toujours possible. Par exemple, la disponibilité de tels carburants peut ne pas être suffisante pour une utilisation pendant toute la durée d'un vol. Il peut également y avoir d'autres contraintes techniques, réglementaires ou financières sur l'utilisation de tels carburants à faible niveau de nvPM dans des volumes de carburant importants ou dans des concentrations importantes à l'intérieur d'un carburant mélangé.

[0565] Les inventeurs ont déterminé qu'en favorisant l'utilisation de carburant associé à un niveau relativement bas d'émission de nvPM (par exemple comparativement à du kérosène fossile) pendant la plage de fonctionnement à injection pilote seule de la chambre de combustion comparativement à la plage de fonctionnement à injection

pilote et principale, les émissions de nvPM peuvent quand même être significativement réduites, tout en ne nécessitant pas l'utilisation d'une grande quantité du carburant à faible niveau de nvPM sur toute la plage de fonctionnement de la chambre de combustion.

- [0566] Dans le présent exemple par conséquent, le premier carburant maintenu dans la première source de carburant 302 est associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du second carburant maintenu dans la seconde source de carburant 304 (par exemple lorsqu'il est utilisé dans des conditions correspondantes). Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule est également associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Comme indiqué plus bas du carburant peut être fourni aux injecteurs de carburant pilotes et principaux 313, 314 exclusivement à partir d'une des deux sources de carburant disponibles 302, 304, ou en tant que mélange de carburant à partir des première et seconde sources de carburant 302, 304.
- [0567] Dans certains exemples, le système de carburant peut être configuré de telle sorte que les injecteurs de carburant principaux 314 peuvent être alimentés à partir de soit la première source de carburant 302, soit la seconde source de carburant 304, et également de telle sorte que les injecteurs de carburant pilotes 313 peuvent être alimentés à partir de soit la première source de carburant 302, soit la seconde source de carburant 304. Bien que certains des exemples présentés ci-dessous ne comprennent pas un tel système de carburant souple, assurer qu'un quelconque réservoir de carburant puisse fournir du carburant à un quelconque injecteur de carburant d'un quelconque moteur présente des avantages de sécurité.
- [0568] Dans certains des exemples décrits ici, un injecteur de carburant individuel 313, 314 est alimenté avec soit le carburant uniquement à partir de la première source de carburant 302, soit le carburant à partir de la seconde source de carburant 304, c'est-à-dire que le système de carburant bascule entre les deux sources de carburant.
- [0569] Dans d'autres exemples, le système de carburant comprend également les équipements nécessaires pour réaliser le mélange de carburant à partir des deux sources de carburant embarquées (par exemple, des carburants à haut indice de suie et des carburants à faible indice de suie), le rapport de mélange étant modifié selon divers critères de prise de décision afin de produire une composition de carburant dont les caractéristiques sont égales à celles de la composition de carburant produisant un faible niveau de suie (rapport de mélange 100:0) ou égales à la composition de carburant produisant un niveau élevé de suie (rapport de mélange 0:100) ou quelque part entre

les deux (rapport de mélange $x:100-x$ où $0 < x < 100$).

- [0570] Divers exemples peuvent impliquer la capacité à basculer entre des compositions de carburant prédéterminées et/ou à produire une composition de carburant mélangée pour uniquement les injecteurs de carburant pilotes 313. Les injecteurs de carburant principaux 314 peuvent dans de tels exemples être alimentés à tout moment avec du carburant provenant de l'une des sources de carburant (par exemple le carburant associé à niveau élevé de nvPM). Cependant, pour plus de flexibilité, certains exemples peuvent permettre aux injecteurs de carburant principaux 314 d'être basculés vers le carburant provenant de l'autre source (par exemple la composition de carburant à faible niveau de nvPM) et/ou une composition de carburant mélangée pendant certaines périodes de fonctionnement anormales, par exemple en cas de perte de carburant associé à niveau élevé de nvPM en raison par exemple d'une fuite de carburant.
- [0571] Dans certains exemples, la caractéristique de carburant par laquelle le carburant provenant de la première source de carburant 302 diffère du carburant provenant de la seconde source de carburant 304 peut être un pourcentage de carburant d'aviation durable (SAF) présent dans le carburant respectif. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule aurait de même un pourcentage de SAF différent comparativement au carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou principaux 314 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.
- [0572] Par rapport au kérosène fossile, le SAF propose des émissions de suie, ou plus généralement de nvPM, sensiblement plus faibles. Lorsque le SAF est utilisé en tant que partie d'une composition de carburant mélangé avec du kérosène fossile, en gros plus le pourcentage de SAF dans le mélange est élevé (et donc plus le pourcentage de kérosène fossile est faible), plus la diminution des émissions de nvPM est forte, au moins dans certaines plages de pourcentage de SAF. Cet effet est illustré à la [Fig.7] qui montre des dépendances d'émissions de nvPM# lors d'un débit de carburant W_F pour une composition de carburant par défaut (trait plein) et pour trois autres compositions de carburant A, B et C (marquées) pour une condition de vol particulière définie par exemple par une altitude et une vitesse d'avancement. La composition de carburant par défaut et les compositions de carburant A, B et C sont caractérisées respectivement par des pourcentages de SAF progressivement plus élevés et des pourcentages de kérosène fossile plus faibles de façon correspondante. La composition de carburant par défaut peut être du kérosène fossile à 100 %, ou être un mélange comprenant majoritairement du kérosène fossile avec un faible pourcentage de SAF, comme cela peut être disponible par défaut au niveau de certains aéroports.

- [0573] Sur la [Fig.7], le facteur de réduction des émissions de nvPM# par rapport à la composition de carburant par défaut obtenue par chaque composition de carburant mélangée est illustré comme étant sans changement avec W_F pendant un fonctionnement à injection pilote seule et également sans changement avec W_F pendant un fonctionnement à injection pilote et principale, bien que les facteurs de réduction dans ces deux régions de fonctionnement soient représentés comme étant différents les uns des autres. On comprendra que d'autres dépendances par rapport à W_F peuvent être observées dans diverses mises en œuvre et sont également envisagées par la présente demande.
- [0574] La [Fig.8] montre une telle autre dépendance par rapport à W_F , caractérisée dans un fonctionnement à injection pilote seule par une augmentation du facteur de réduction de nvPM# pour chaque composition de carburant mélangé à mesure que W_F est réduit depuis le point d'étagement SP vers un niveau inférieur de flux de carburant. D'autres variations peuvent être possibles ; en particulier la dépendance par rapport à W_F du facteur de réduction de nvPM# ne peut pas être la même pour chaque composition de carburant mélangée, et/ou n'a pas besoin d'être une fonction de W_F augmentant ou diminuant de manière monotone. Bien que les exemples suivants dans la présente demande soient basés sur la forme illustrée à la [Fig.7], on comprendra que des formes plus générales sont également envisagées.
- [0575] Les inventeurs ont déterminé que lorsqu'un moteur à turbine à gaz 10 fonctionne dans la plage de fonctionnement à injection pilote et principale les émissions de suie sont intrinsèquement faibles et la substitution de la composition de carburant par défaut (e. g. kérosène fossile) avec du SAF (ou un mélange de SAF à pourcentage élevé) ou un autre carburant à faible production de suie produira une faible réduction d'émissions de suie. Inversement lorsque le moteur 10 fonctionne à un débit de carburant qui est inférieur au point d'étagement SP, mais néanmoins proche de celui-ci, les émissions de suie peuvent être sensiblement réduites en utilisant une composition de carburant qui comprend un pourcentage plus élevé de carburant produisant un faible niveau de suie (par exemple, le SAF) et un pourcentage plus faible de kérosène fossile (ou d'un autre carburant produisant un niveau élevé de suie) par rapport à une composition de carburant par défaut. En utilisant du carburant ayant une caractéristique différente dans différentes plages de fonctionnement de la chambre de combustion le pourcentage de SAF au sein de la composition de carburant brûlée dans le mode à injection pilote seule peut être augmenté (par exemple, au maximum), tout en réduisant (par exemple au minimum) le pourcentage de SAF au sein de la composition de carburant brûlée dans le mode à injection pilote et principale. Ceci peut permettre à l'effet de réduction des nvPM du SAF disponible d'avoir un impact plus important comparativement à l'utilisation d'une composition à pourcentage constant de SAF pendant toute la plage

complète de fonctionnement de la chambre de combustion.

[0576] Dans divers autres exemples une ou plusieurs autres caractéristiques du carburant peuvent être modifiées selon une variante au pourcentage de SAF ou en plus de celui-ci. Les changements d'autres caractéristiques entre les carburants des première et seconde sources de carburant peuvent en outre ou en variante être associés à différents niveaux du nvPM#. Par exemple, la première source de carburant 302 peut être caractérisée par du carburant avec une proportion inférieure de certains constituants qui provoquent des émissions de suie ou d'autres nvPM comparativement à celle de la seconde source de carburant 304. Dans certains exemples, le carburant de la première source de carburant 302 peut être caractérisé par une teneur en hydrocarbures aromatiques plus basse, ou plus particulièrement une teneur en naphthalène plus basse comparativement à la seconde source de carburant 304. La teneur inférieure en tels composés produisant de la suie peut être associée à des SAF lorsque l'on compare au kérosène fossile. Cela peut toutefois ne pas être toujours le cas. Certains SAT peuvent être associés à un niveau plus élevé de production de suie comparativement à d'autres (par ex. s'ils ont une quantité supérieure d'une teneur en composés aromatiques synthétiques ajoutés), ou peuvent être associés à un niveau plus élevé de production de suie comparativement à un carburant fossile tel que le kérosène fossile à partir duquel la teneur en composés aromatiques a été éliminée afin de laisser majoritairement une teneur paraffinique.

[0577] Divers exemples de distribution de carburant aux injecteurs de carburant principaux et pilotes 313, 314 à partir de l'une ou l'autre des première et seconde sources de carburant 302, 304 (exclusivement, au moins dans des conditions de fonctionnement normales) ou d'un mélange de ceux-ci en divers points pendant les plages de fonctionnement de la chambre de combustion sont décrits ci-dessous.

[0578] *Figures 9, 10 et 11*

[0579] La [Fig.9] illustre un exemple dans lequel le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour distribuer du carburant à partir de la première source de carburant 302 aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant un fonctionnement à la fois dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale, et du carburant à partir de la seconde source de carburant 304 aux injecteurs de carburant principaux 314 pendant un fonctionnement dans la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Dans cet exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 comprend un régulateur pilote 306a en communication fluidique avec la première source de carburant 302 par l'intermédiaire de la première pompe à carburant 308a. Le régulateur de distribution de carburant 306 comprend en outre un régulateur principal distinct 306b en communication fluidique avec la seconde source de carburant 304 par l'intermédiaire de la seconde pompe à carburant 308b. Le

régulateur pilote 306a est conçu pour distribuer du carburant au collecteur pilote 309 et aux injecteurs de carburant pilotes 313. Le régulateur principal 306b est conçu pour distribuer du carburant au collecteur principal 310 et aux injecteurs de carburant principaux 314. Le régulateur de distribution de carburant 306 comprend donc deux trajets de flux séparés par l'intermédiaire desquels du carburant provenant de chaque source de carburant 302, 304 est fourni à la chambre de combustion 16. La vitesse de flux de carburant à travers chacun du régulateur pilote 306a et celle du régulateur principal 306b peuvent être régulées indépendamment l'une de l'autre en utilisant des signaux de commande reçus par le régulateur de distribution de carburant 306 en provenance de l'EEC 42. Les injecteurs de carburant pilotes 313 sont donc à tout moment alimentés avec du carburant provenant de la première source de carburant 302 et les injecteurs de carburant principaux 314 sont à tout moment alimentés avec du carburant provenant de la seconde source de carburant 304. Le flux de carburant vers les injecteurs de carburant principaux 314 peut être sensiblement nul dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule. Cela signifie que la composition de carburant passant par un injecteur de carburant individuel ne change pas tout au long du vol et est prédéterminée avant le vol (au moins pendant des conditions normales d'exploitation).

[0580] Dans l'exemple de la [Fig.9], la première source de carburant 302 contient un carburant qui est associé à une production de nvPM faible, par exemple un carburant ayant une teneur en SAF relativement élevée (par exemple un carburant riche en SAF). La seconde source de carburant 304 contient un carburant associé à une production de nvPM élevée, par exemple un carburant ayant une teneur en SAF relativement faible (c'est-à-dire inférieure à celle du premier carburant), par exemple un carburant pauvre en SAF. L'expression « riche en SAF » peut être utilisée ici pour indiquer un carburant ayant une teneur en SAF plus élevée par rapport à un carburant « pauvre en SAF ». L'expression « riche en SAF » peut inclure du carburant qui est du SAF à 100 %. Le carburant « pauvre en SAF » peut inclure du carburant qui est du SAF à 0 %, par exemple du kérosène fossile. Dans certains exemples, le carburant riche en SAF peut inclure jusqu'à 50 % de SAF, et le carburant pauvre en SAF sensiblement zéro % de SAF par exemple il peut être un carburant de kérosène fossile standard.

[0581] Dans l'exemple de la [Fig.9], la composition de carburant riche en SAF peut être déterminée par l'un ou plusieurs des facteurs suivants :

[0582] a) la quantité de SAF disponible pour, ou attribuée à, un vol proposé ;

[0583] b) l'exigence de carburant totale pour les injecteurs de carburant pilotes pour tout le vol (calculée selon des procédés connus de l'homme du métier) ; et

[0584] c) des limites quelconques sur le pourcentage maximal admissible de SAF, par exemple des limites de certification, ou par exemple des limites techniques liées à l'aéronef spécifique et/ou aux injecteurs de carburant pilotes eux-mêmes, ou le

pourcentage maximal de mélange auquel SAF est disponible au point de chargement du carburant.

[0585] Le pourcentage de SAF souhaité dans la composition du carburant riche en SAF peut être calculé par 100 % fois le facteur a), divisé par le facteur b), sous réserve d'une valeur maximale admissible qui est le minimum des diverses limites potentielles identifiées dans le facteur c). Un ajustement peut être nécessaire pour prendre en compte les différentes densités énergétiques volumétriques du SAF et du kérosène fossile, selon des procédés connus de l'homme du métier.

[0586] Dans le présent exemple, la composition de carburant pauvre en SAF peut avoir un pourcentage de SAF par défaut de zéro (ou le minimum possible étant donné l'alimentation en carburant par défaut au niveau de l'aéroport où a lieu le réapprovisionnement de l'aéronef), mais tout SAF attribué au vol proposé qui n'était pas incorporé dans la composition de carburant riche en SAF pour les injecteurs de carburant pilotes 313 sera utilisé dans le cadre de la composition de carburant pauvre en SAF pour les injecteurs de carburant principaux 314. Le pourcentage de SAF ainsi obtenu dans la composition de carburant pauvre en SAF sera plafonné par des limites de certification quelconques ou par des limites techniques quelconques liées à l'aéronef spécifique et/ou aux injecteurs de carburant principaux, ou bien le pourcentage maximal de mélange dans lequel le SAF est disponible au point de chargement de carburant.

[0587] Le fonctionnement de la chambre de combustion en [Fig.9] peut ne pas être possible pour tous les vols du fait que la taille des réservoirs de carburant disponibles pour la composition de carburant riche en SAF et pour la composition de carburant pauvre en SAF ne peut pas accueillir les exigences de volume de carburant pour les injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou les injecteurs de carburant principaux 314. Ceci peut être le cas des vols longs-courriers dans lesquels tous les réservoirs de carburant doivent être entièrement remplis avant le départ et pour lesquels les exigences de volume de carburant respectives pour les différents types d'injecteurs de carburant peuvent ne pas correspondre exactement aux volumes des sources.

[0588] La [Fig.10] illustre la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant W_F pour l'agencement de régulateur de carburant de la [Fig.9] (ligne pointillée) comparativement à la dépendance correspondante pour une composition de carburant par défaut telle que du kérosène fossile (ligne pleine). Dans cette illustration, on suppose que la composition de carburant riche en SAF correspond à la composition de carburant A de la [Fig.7]. Comme on peut le voir à la [Fig.10], une réduction avantageuse du nombre de nvPM est fournie au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule, alors que dans la plage de fonctionnement à injection pilote et principale, il n'y a pas ou peu de changement du nombre de nvPM. Dans cet exemple,

une quantité limitée de SAF disponible a donc été plus efficacement ciblée vers une partie de la plage de fonctionnement (à savoir, à injection pilote seule) où elle peut apporter le plus grand avantage en termes de réduction des nvPM.

[0589] La [Fig.11] illustre un procédé 4000 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz qui peut être mis en œuvre en utilisant le système de chambre de combustion étagée de la [Fig.9]. Le procédé 4000 comprend la régulation 4002 de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux 313, 314 à partir de la première source de carburant 302 et de la seconde source de carburant 304. Comme indiqué ci-dessus, la régulation de la distribution de carburant comprend généralement la fourniture de carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote seule ayant une caractéristique de carburant différente de celle du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou aux injecteurs de carburant principaux 314 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Dans l'exemple de la [Fig.11], la régulation 4002 de la distribution de carburant comprend la distribution 4004 de carburant à partir de la première source de carburant 302 aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant un fonctionnement à la fois dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale, et de carburant à partir de la seconde source de carburant 304 aux injecteurs de carburant principaux 314 pendant un fonctionnement dans la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. L'une quelconque des autres caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec la [Fig.9] peut être incorporée dans le procédé de la [Fig.11], même si elles ne sont pas répétées ici.

[0590] *Figures 12, 13 et 14*

[0591] Dans l'exemple représenté aux Figures 9, 10 et 11, la réduction avantageuse du nombre de nvPM (par rapport à la composition de carburant par défaut) observée particulièrement dans le fonctionnement à injection pilote seule (c'est-à-dire à gauche du point SP) est rendue possible en donnant la priorité au SAF vers les injecteurs de carburant pilotes, permettant ainsi un pourcentage de SAF plus élevé dans la composition de carburant fournie à ces injecteurs de carburant. Cependant, lors d'un fonctionnement à injection pilote et principale (dans laquelle la production de suie est minimale même en utilisant du kérosène fossile) néanmoins une composition de carburant riche en SAF est encore fournie aux injecteurs de carburant pilotes. Une utilisation encore plus efficace de carburant riche en SAF peut être obtenue en apportant une flexibilité supplémentaire de distribution de carburant à la chambre de combustion.

[0592] La [Fig.12] illustre un exemple dans lequel le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour basculer la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 entre la première source de carburant 302 et la seconde source de

carburant 304. Dans l'exemple décrit le basculement se produit à la frontière de la plage de fonctionnement à injection pilote seule (par exemple au point d'étagement SP). Dans d'autres exemples, il peut y avoir plusieurs points de basculement y compris au niveau de la frontière et/ou dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule. Plus généralement donc, le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour basculer la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 entre les première et seconde sources de carburant 302, 304 au niveau d'un ou plusieurs points de fonctionnement au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule ou à une frontière de celle-ci.

- [0593] En référence à la [Fig.12], le régulateur pilote 306a comprend deux régulateurs distants pouvant être commandés indépendamment, un premier régulateur 315a en communication fluidique avec la première source de carburant 302, et un second régulateur 315b en communication fluidique avec la seconde source de carburant 304. Les premier et second régulateurs 315a, 315b du régulateur pilote 306a peuvent être commandés par des signaux reçus de l'EEC 42. Les premier et second régulateurs 315a, 315b sont en communication fluidique avec le collecteur pilote 309 de sorte qu'ils peuvent commander la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313.
- [0594] Le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour basculer la distribution du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 entre le carburant provenant de la première source de carburant 302 et le carburant provenant de la seconde source de carburant 304 selon un signal de mode indiquant un changement de la plage de fonctionnement du système de combustion étagée. Le signal de mode peut être obtenu par l'EEC 42 à partir du système de combustion 64 (ou de la chambre de combustion 16) et un signal de commande correspondant envoyé aux régulateurs 315a, 315b de sorte que le basculement peut se produire au niveau du point d'étagement entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Le régulateur de distribution de carburant 306 est ainsi conçu pour basculer les injecteurs de carburant pilotes 313 entre le premier carburant et le second carburant (ou inversement) à chaque franchissement du point d'étagement SP. L'EEC peut être configuré pour recevoir du système de combustion 64 (ou de la chambre de combustion 16) un signal indiquant son mode de fonctionnement (à injection pilote seule ou à injection pilote et principale). En variante, l'EEC 42 peut ordonner au système de combustion 64 de basculer d'un mode de fonctionnement à l'autre. Dans cet exemple, le signal de mode peut déjà être disponible au niveau de l'EEC 42, et peut être utilisé pour basculer la distribution de carburant par le régulateur de distribution de carburant 306. Le basculement de la distribution du carburant selon un signal de mode indiquant un changement de mode de la chambre de combustion 16 peut garantir un

niveau acceptable de synchronisation entre le mode de fonctionnement du dispositif de combustion et la composition de carburant des injecteurs de carburant pilotes. Ceci peut aider à assurer un basculement rapide entre les sources de carburant lorsque le point d'étagement est franchi.

- [0595] Dans l'exemple décrit ici, le régulateur pilote 306a est conçu pour basculer entre l'alimentation en carburant exclusivement à partir de la première source de carburant 302 et exclusivement à partir de la seconde source de carburant 304. Les premier et second régulateurs de carburant 315a, 315b peuvent donc être agencés pour basculer entre le fonctionnement où : i) le premier est complètement fermé (de sorte qu'aucun carburant provenant de la source correspondante n'est fourni à la chambre de combustion 16), et le second est utilisé pour réguler la vitesse de flux de l'autre source de carburant ; et ii) le second est complètement fermé (de sorte qu'aucun carburant provenant de la source correspondante n'est fourni à la chambre de combustion 16), et le premier est utilisé pour réguler la vitesse de flux de l'autre source de carburant. Dans d'autres exemples, n'importe quel autre agencement approprié du régulateur de carburant pilote 306a peut être fourni afin de permettre le basculement entre les sources de carburant.
- [0596] Le régulateur de distribution de carburant 306 illustré à la [Fig.12] peut être conçu pour distribuer du carburant de telle sorte que lorsque le moteur 10 fonctionne dans le mode à injection pilote seule, les injecteurs de carburant pilotes 313 sont alimentés avec une composition de carburant riche en SAF, et lorsque le moteur fonctionne dans le mode à injection pilote et principale, les injecteurs de carburant pilotes 313 et les injecteurs de carburant principaux 314 sont tous alimentés avec une composition de carburant pauvre en SAF.
- [0597] Dans cet exemple, la composition de carburant riche en SAF sera déterminée par les facteurs suivants :
- [0598] a) la quantité de SAF disponible pour, ou attribuée à, un vol proposé ;
- [0599] b) l'exigence de carburant totale pour les injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à injection pilote seule pour tout le vol (calculée selon des procédés connus de l'homme du métier) ; et
- [0600] c) des limites quelconques sur le pourcentage maximal admissible de SAF, par exemple des limites de certification, ou par exemple des limites techniques liées à l'aéronef spécifique et/ou aux injecteurs de carburant pilotes eux-mêmes, ou le pourcentage maximal de mélange auquel SAF est disponible au point de chargement du carburant.
- [0601] Le pourcentage de SAF souhaité dans la composition du carburant riche en SAF est alors calculé simplement par 100 % fois le facteur a) divisé par le facteur b), sous réserve d'une valeur maximale admissible qui est le minimum des diverses limites po-

tentielles identifiées dans le facteur c). Un ajustement peut être nécessaire pour prendre en compte les différentes densités énergétiques volumétriques du SAF et du kérosène fossile, selon des procédés connus de l'homme du métier.

- [0602] La composition de carburant pauvre en SAF peut être déterminée en utilisant le même procédé et les mêmes contraintes que pour l'exemple décrit en liaison avec les Figures 9, 10 et 11, contraint en outre par n'importe quelles limites pratiques liées aux injecteurs de carburant pilotes 313 si nécessaire.
- [0603] La [Fig.13] illustre la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant W_F pour le régulateur de distribution de carburant de la [Fig.12] (ligne pointillée) comparativement à la dépendance correspondante pour une composition de carburant par défaut telle que du kérosène fossile (ligne pleine). Dans cette illustration on suppose que la composition de carburant riche en SAF correspond à la composition de carburant B de la [Fig.7] et que la composition de carburant pauvre en SAF correspond à la composition de carburant par défaut.
- [0604] Comme on peut le voir à la [Fig.13], pour une quantité fixe de SAF attribuée à un vol individuel, le régulateur de distribution de carburant 316 de la [Fig.12] permet à la composition de carburant riche en SAF d'avoir un pourcentage de teneur en SAF plus élevé comparativement à l'exemple de la [Fig.9], en raison d'une utilisation plus restreinte de la composition de carburant riche en SAF par rapport à un fonctionnement à injection pilote seule. Par conséquent, le SAF est plus efficacement rendu prioritaire vers une région de fonctionnement dans laquelle la réduction avantageuse des nvPM est plus importante.
- [0605] Comme pour l'exemple des Figures 9, 10 et 11, des capacités de réservoir de carburant peuvent empêcher le fonctionnement selon l'exemple de la [Fig.12] pour certains vols, car il peut être difficile de faire correspondre les volumes des différents réservoirs de carburant avec les volumes requis des compositions de carburant riches en SAF et pauvres en SAF.
- [0606] La [Fig.14] illustre un procédé de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz 10 qui peut être mis en œuvre en utilisant le système de chambre de combustion étagée de la [Fig.12]. Des étapes de procédé communes au procédé de la [Fig.11] sont marquées en ce sens. Dans cet exemple, la régulation 4002 de la distribution de carburant comprend le basculement 4006 de la distribution du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 entre la première source de carburant 302 et la seconde source de carburant 304 au point d'étagement SP. L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec la [Fig.12] peut être incorporée dans le procédé de la [Fig.14], même si elles ne sont pas répétées ici.
- [0607] *Figures 15 et 16*
- [0608] Le régulateur de distribution de carburant de la [Fig.12] peut dans certains exemples

être conçu pour basculer de nouveau la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 entre la première source de carburant 302 et la seconde source de carburant 304 à un point seuil TP au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule. Le carburant provenant de la seconde source de carburant 304 peut être distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 à des débits de carburant inférieurs au point seuil, le carburant provenant de la première source de carburant 302 distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 à des débits de carburant entre le seuil et la frontière de la plage de fonctionnement à injection pilote seule (point d'étagement), et le carburant provenant de la seconde source de carburant 304 peut être distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 à des débits de carburant au-dessus de la frontière. Les injecteurs de carburant principaux 314 peuvent être alimentés en carburant provenant de la seconde source de carburant 304 à tout moment.

- [0609] De manière similaire aux exemples décrits précédemment, le premier carburant contenu dans la première source de carburant 302 peut être un carburant associé à un faible niveau de nvPM tel qu'un carburant riche en SAF, tandis que le second carburant contenu dans la seconde source de carburant 304 peut être associé à un niveau élevé de nvPM tel que du carburant pauvre en SAF. Lorsque la chambre de combustion 16 fonctionne en mode à injection pilote seule près du point d'étagement SP (tel que déterminé par la position du seuil), les injecteurs de carburant pilotes 313 sont alimentés avec la composition de carburant riche en SAF. Dans tous les autres cas les injecteurs de carburant pilotes 313 sont alimentés avec une composition de carburant pauvre en SAF.
- [0610] Cet exemple peut fournir une utilisation encore plus efficace du SAF et peut être encore avantageux par rapport à des exemples où un basculement se produit uniquement au niveau du point d'étagement SP dans les cas où le pourcentage de SAF dans la composition de carburant riche en SAF du deuxième exemple est limité par la disponibilité du SAF plutôt que par les limites de certification du moteur. Le présent exemple dans lequel deux points de basculement sont prévus peut également surmonter des difficultés avec des discordances potentielles entre les capacités de réservoirs de carburant individuels et les volumes requis de compositions de carburant riches en SAF et pauvres en SAF.
- [0611] La position du seuil de basculement TP peut être déterminée selon un ou plusieurs facteurs différents de sorte que le basculement se produit « près » du point d'étagement SP. Par exemple, le seuil peut être :
- [0612] a) un premier débit de carburant seuil auquel la production de nvPM par le moteur à turbine à gaz 10 passe une quantité seuil des nvPM produites par le moteur à turbine à gaz pendant un fonctionnement dans lequel les injecteurs de carburant pilotes 313 reçoivent du carburant ayant la seconde caractéristique de carburant. Par exemple, le

seuil peut être défini comme un fonctionnement en mode à injection pilote seule à un débit de carburant qui, pour une composition de carburant par défaut telle que le kérosène fossile, correspondrait à des émissions de suie dépassant un seuil. Les émissions de suie ou les nvPM produites par le moteur à turbine à gaz peuvent être définies soit en tant que nombre de particules de suie émises par unité de masse de carburant (à savoir, un indice d'émission en nombre), soit en tant que nombre de particules de suie émises par unité de temps (c'est-à-dire, en tenant compte également du débit de carburant), soit en tant que nombre de particules de suie émises par unité de distance de vol (c'est-à-dire en tenant compte également de la vitesse de l'aéronef).

[0613] b) un second seuil défini en tant que débit de carburant seuil prédéfini inférieur au débit de carburant au point d'étagement SP (tel que défini pour les conditions de vol actuelles telles que l'altitude actuelle). Le seuil prédéfini peut être soit un pourcentage du débit de carburant au point d'étagement, soit une valeur absolue de flux inférieure à celle au point d'étagement.

[0614] Le premier seuil et/ou le second seuil peuvent être définis en référence à la quantité de SAF disponible pour un vol proposé, dans l'hypothèse qu'au maximum le SAF disponible sera incorporé dans la composition de carburant riche en SAF, sous réserve de contraintes préalablement identifiées, et compte tenu de l'exigence de volume de carburant pour un vol proposé pour les injecteurs de carburant pilotes lors d'un fonctionnement « près du point SP » selon une valeur candidate du premier seuil et/ou du second seuil, l'exigence de volume de carburant étant déterminée en utilisant des procédés bien connus de l'homme du métier.

[0615] Le second seuil peut être défini en référence au volume de réservoir de carburant disponible à bord de l'aéronef 1 pour la composition de carburant riche en SAF, en prenant à nouveau en compte l'exigence de volume de carburant pour un vol proposé pour les injecteurs de carburant pilotes lors d'un fonctionnement « près du point SP », l'exigence de volume de carburant étant déterminée en utilisant des procédés bien connus de l'homme du métier. Pour certains vols, notamment les vols longs-courriers pour lesquels toute la capacité de carburant disponible doit être utilisée, la taille des réservoirs de carburant disponibles 53, 55 peut limiter les options disponibles concernant le second seuil, pour garantir que la capacité du réservoir de carburant utilisé pour la composition de carburant riche en SAF est complètement utilisée. Cela imposerait des contraintes correspondantes sur le pourcentage de SAF dans la composition du carburant riche en SAF

[0616] Dans les cas où le premier seuil et/ou le second seuil n'ont pas été définis en référence à la quantité disponible de SAF, la composition de carburant riche en SAF peut être déterminée par un ou plusieurs des facteurs suivants :

[0617] a) la quantité de SAF disponible pour, ou attribuée à, un vol proposé ;

- [0618] b) l'exigence de carburant totale pour les injecteurs de carburant pilotes pendant un fonctionnement à injection pilote seule près du point d'étagement pour tout le vol (calculée selon des procédés connus de l'homme du métier et en tenant compte des volumes des réservoirs de carburant pertinents comme décrit ci-dessus) ; et
- [0619] c) des limites quelconques sur le pourcentage maximal admissible de SAF, par exemple des limites de certification, ou par exemple des limites pratiques liées à l'aéronef spécifique et/ou aux injecteurs de carburant pilotes eux-mêmes, ou le pourcentage maximal de mélange auquel le SAF est disponible au point de chargement du carburant.
- [0620] Le pourcentage de SAF dans la composition du carburant riche en SAF est alors calculé simplement par 100 % fois le facteur a) divisé par le facteur b), sous réserve d'une valeur maximale admissible qui est le minimum des diverses limites potentielles identifiées dans le facteur c). Un ajustement peut être nécessaire pour prendre en compte les différentes densités énergétiques volumétriques du SAF et du kérosène fossile, selon des procédés connus de l'homme du métier.
- [0621] La composition de carburant pauvre en SAF peut être déterminée en utilisant le même procédé et les mêmes contraintes que décrit par exemple en liaison avec la [Fig.12].
- [0622] La [Fig.15] illustre la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant W_F (ligne pointillée) pour un exemple dans lequel deux points de basculement sont prévus, l'un à un seuil TP au sein de la plage de fonctionnement à injection pilote seule et un second TP2 au point d'étagement SP, comparativement à la dépendance correspondante pour une composition de carburant par défaut telle que le kérosène fossile (ligne pleine). Dans cette illustration, on suppose que la composition de carburant riche en SAF correspond à la composition de carburant C de la [Fig.7] et que la composition de carburant pauvre en SAF correspond à la composition de carburant par défaut. Les points de basculement TP, TP2 sont visibles par les changements rapides du nombre de nvPM au débit de carburant correspondant.
- [0623] La [Fig.16] illustre un procédé 4000 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz 10 qui peut être mis en œuvre en utilisant le système de chambre de combustion étagée de la [Fig.12] dans lequel deux points de basculement TP, TP2 sont fournis. Des étapes de procédé communes au procédé de la [Fig.14] sont marquées en ce sens. Dans cet exemple, la régulation 4002 de la distribution de carburant comprend en outre une étape de basculement 4008 de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes entre la première source de carburant 302 et la seconde source de carburant 304 à un point seuil dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule en plus du basculement 4006 au point d'étagement. L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec la [Fig.15] peut être incorporée dans le procédé de la [Fig.16].

[0624] *Figures 17, 18 et 19*

[0625] Dans les exemples décrits précédemment, le carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes et principaux 313, 314 est limité aux caractéristiques des deux carburants prédéfinis (les premier et second carburants) contenus dans les première et seconde sources de carburant 302, 304. Les inventeurs ont déterminé que d'autres avantages peuvent être obtenus en fournissant du carburant contenant un mélange de carburant des première et seconde sources de carburant 302, 304 à la chambre de combustion 16 pour donner une plus grande flexibilité de la composition de carburant fournie aux injecteurs de carburant 313, 314.

[0626] La [Fig.17] illustre un exemple dans lequel le régulateur de distribution de carburant 306 comprend un mélangeur de carburant 318. Le mélangeur de carburant 318 est conçu pour recevoir une alimentation en carburant à partir des première et seconde sources de carburant 302, 304 et pour sortir du carburant de la première source de carburant 302, du carburant de la seconde source de carburant 304, ou un mélange de ceux-ci (par exemple un rapport de mélange qui peut varier entre 100 % du premier carburant et 0 % du second carburant, jusqu'à 0 % du premier carburant et 100 % du second carburant et un quelconque rapport entre ceux-ci). Le mélangeur de carburant 318 est en communication fluidique avec le collecteur pilote 309, et est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313. Le régulateur de distribution de carburant 306 comprend un régulateur principal 306b raccordé à la seconde source de carburant 304 et conçu pour alimenter le collecteur principal 310 et les injecteurs de carburant principaux 314 de manière similaire à d'autres exemples. Dans d'autres exemples, le mélangeur peut être conçu pour alimenter à la fois les injecteurs de carburant principaux et pilotes 313, 314. En utilisant le mélangeur de carburant 318 un mélange de carburant peut être distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie du fonctionnement dans la plage à injection pilote seule. Pour d'autres parties du fonctionnement à injection pilote seule, et pendant le fonctionnement à injection pilote et principale, les injecteurs de carburant pilotes 313 peuvent recevoir du carburant provenant d'une seule des sources de carburant par le mélangeur de carburant 313. Un mélange de carburant provenant des deux sources peut également être fourni pendant toute la plage de fonctionnement à injection pilote seule et/ou pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale.

[0627] De manière similaire aux exemples décrits précédemment, le premier carburant contenu dans la première source de carburant 302 peut être un carburant associé à un faible niveau de nvPM tel qu'un carburant riche en SAF, tandis que le second carburant contenu dans la seconde source de carburant 304 peut être associé à un niveau élevé d'émissions de nvPM tel que du carburant pauvre en SAF. Lorsque la chambre de

combustion 16 fonctionne en mode à injection pilote seule un mélange de carburant peut être fourni aux injecteurs de carburant pilotes 313 de sorte que le carburant mélangé fourni est associé à un niveau de nvPM inférieur par rapport au carburant fourni aux injecteurs de carburant principaux et/ou pilotes 313, 314 pendant un fonctionnement à injection pilote et principale où le niveau de nvPM est intrinsèquement inférieur. Cela pourrait permettre une utilisation encore plus efficace des combustibles produisant peu de nvPM. Le carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie du fonctionnement à injection pilote seule peut donc contenir plus du premier carburant comparativement au carburant fourni aux injecteurs de carburant principaux 314 pendant un fonctionnement à injection pilote et principale. Dans l'exemple de la [Fig.17], le régulateur de distribution de carburant 306 permet à des carburants provenant des première et seconde sources 302, 304 d'être mélangés par le mélangeur de carburant 318 à un rapport de mélange souhaité et d'être distribués au collecteur pilote 309. Cela s'oppose à l'exemple des Figures 12, 13 et 14, où un mélange de carburant formé en mélangeant une quantité de carburant provenant de la première source 302 et une quantité de carburant provenant de la seconde source 304 ne peut pas être fourni.

[0628] Un certain nombre d'avantages sont associés à la fourniture du carburant mélangé de cette façon. Par exemple, il est possible d'éviter une limite stricte ou un point de basculement (par exemple, le point seuil TP décrit ci-dessus) dans la région à injection pilote seule, en dessous duquel une composition de carburant pauvre en SAF est fournie aux injecteurs de carburant pilotes 313 et au-dessus duquel une composition de carburant riche en SAF est fournie aux injecteurs de carburant pilotes 313. Ceci peut réduire le risque d'augmentation soudaine des émissions de suie à mesure que le flux de carburant est réduit, ce qui pourrait autrement entraîner des émissions de suie inutilement élevées pendant, par exemple, des phases de vol d'approche et/ou d'approche finale.

[0629] Le mélange de carburant peut également être encore plus avantageux car un mélange de carburant réduisant davantage les nvPM peut être utilisé à proximité du point d'étagement SP (c'est-à-dire à des débits de carburant juste inférieurs au point d'étagement) lorsque le nombre de nvPM est à son maximum. Ceci peut fournir un contrôle global plus important de l'émission de nvPM, et utiliser plus efficacement les carburants à faible niveau de nvPM.

[0630] Le pourcentage de SAF au sein du premier carburant riche en SAF peut être le plus élevé possible, sous réserve de limites quelconques sur le pourcentage maximal admissible de SAF, par exemple des limites de certification, ou par exemple des limites techniques liées à l'aéronef spécifique et/ou aux injecteurs de carburant pilotes eux-mêmes, ou le pourcentage maximal de mélange auquel le SAF est disponible au point

de chargement du carburant.

- [0631] Le pourcentage de SAF au sein du premier carburant riche en SAF peut également être contraint par le facteur de remplissage requis du ou des réservoirs de carburant utilisés pour la composition de carburant riche en SAF, conjointement avec la quantité de SAF attribuée au vol proposé. Par exemple, sur des vols long courrier nécessitant un remplissage complet de tous les réservoirs de carburant 53, 55, le volume de composition de carburant riche en SAF peut ne pas être inférieur à la capacité du réservoir de carburant individuel le plus petit pouvant comprendre la première source de carburant.
- [0632] La composition du carburant pauvre en SAF, c'est-à-dire le second carburant, peut être déterminée en utilisant le même procédé et les mêmes contraintes que pour les exemples décrits précédemment.
- [0633] Dans certains exemples, le régulateur de distribution de carburant 306 peut être conçu pour fournir un mélange de rapport constant du carburant provenant de la première source de carburant 302 et du carburant provenant de la seconde source de carburant 304. Ceci peut permettre de fournir à la chambre de combustion un carburant ayant des caractéristiques différentes de celles des carburants disponibles pour alimenter l'aéronef 1. Cela peut offrir une plus grande flexibilité et un meilleur contrôle des nvPM. Par exemple, le rapport de mélange peut être déterminé et fixé pour un vol particulier une fois que la quantité du carburant dans les première et seconde sources de carburant 302, 304 attribuées au vol est connue.
- [0634] Dans d'autres exemples, le mélangeur de carburant 318 est conçu pour distribuer un mélange de carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 ayant un rapport de mélange variable du carburant provenant de la première source de carburant 302 et du carburant provenant de la seconde source de carburant 304. Le rapport de mélange peut être modifié dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule en fonction du débit de carburant, ou en fonction du débit de carburant divisé par le débit de carburant au point d'étagement SP. Dans certains exemples, le mélange de carburant peut être modifié de telle sorte que la proportion du carburant provenant de la première source de carburant 302 comparativement à celui provenant de la seconde source de carburant 304 est réduite avec la diminution du débit de carburant dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule. Cela peut permettre de réduire la quantité de carburant produisant peu de nvPM (par exemple du SAF) à mesure que le débit diminue. Dans d'autres exemples, les dépendances opposées de la première teneur en carburant avec un débit de carburant peuvent être prévues. Par exemple, dans certains cas, le pourcentage de réduction de nvPM dû à l'utilisation de SAF peut être plus grand à des réglages de puissance faibles (par exemple un flux de carburant faible) qu'à des réglages de puissance plus élevés (par exemple un flux de carburant élevé).

- [0635] Le régulateur de distribution de carburant 306 de l'exemple de la [Fig.17] peut être conçu pour :
- [0636] a) distribuer du carburant à partir de la seconde source de carburant 304, par exemple, du carburant produisant des niveaux élevés de nvPM tel que du carburant pauvre en SAF pour à la fois les injecteurs de carburant pilotes 313 et les injecteurs de carburant principaux 314 à des débits de carburant au-dessus du point d'étagement ;
- [0637] b) distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 à partir de la première source de carburant 302, par exemple, du carburant produisant des niveaux faibles de nvPM tel que du carburant riche en SAF au niveau et/ou immédiatement en dessous du débit de carburant au point d'étagement SP ; et
- [0638] c) distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 ayant un mélange comprenant progressivement moins du premier carburant provenant de la première source de carburant 302 et de manière correspondante plus du second carburant provenant de la seconde source de carburant 304 à mesure que le débit de carburant global est réduit en dessous du point d'étagement.
- [0639] Le rapport du premier carburant sur le second carburant étant fournis aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant le fonctionnement à injection pilote seule peut être modifié selon un programme de mélange de carburant. Le programme de mélange de carburant peut être déterminé par l'EEC 42 et utilisé pour envoyer des signaux de commande au régulateur de distribution de carburant 306 pour commander le rapport de mélange.
- [0640] Dans certains exemples, la dépendance de la proportion du carburant provenant de la première source de carburant 302 par rapport à celle provenant de la seconde source de carburant 304 sur le débit de carburant peut être déterminée en fonction d'un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier. Par exemple, le rapport de mélange peut être déterminé de telle sorte que le nombre de nvPM pour un quelconque débit spécifique de carburant ne dépasse pas un seuil prédéterminé. Pour une condition de vol donnée (telle que l'altitude et la vitesse d'avancement), une table de consultation peut être utilisée pour déterminer le rapport de mélange (par exemple le pourcentage de SAF) nécessaire pour obtenir un niveau particulier de nombre de nvPM à un W_F particulier. Étant donné que l'on connaît les valeurs caractéristiques des premier et second carburants (c'est-à-dire le pourcentage de SAF au sein de chacune des deux compositions de carburant prédéterminées, riche en SAF et pauvre en SAF) la proportion de la composition de carburant riche en SAF devant être distribuée aux injecteurs de carburant pilotes peut être déterminée. La proportion de carburant pauvre en SAF mélangé avec le carburant riche en SAF pour produire une composition de carburant instantanée à distribuer aux injecteurs de carburant pilotes 313 peut alors également être déterminée afin de conserver la production de nvPM dans une limite

seuil tout au long du fonctionnement à injection pilote seule. La détermination de la proportion de chaque carburant constituant le mélange peut être faite par l'EEC 42 en fonction d'informations issues de la table de consultation, d'informations sur les caractéristiques du carburant contenue dans les première et seconde sources de carburant et du débit de carburant actuel. Une fois qu'un rapport de mélange est déterminé par l'EEC 42 le mélangeur 318 peut être commandé en ce sens par des signaux de commande envoyés de l'EEC 42 au régulateur de distribution de carburant 306. Dans certains exemples, l'EEC 42 peut calculer le rapport de mélange en temps réel en réponse à des changements de la condition de vol actuelle ou des conditions atmosphériques actuelles.

- [0641] Dans un autre exemple, le programme de mélange de carburant (tenant compte de la variation avec W_F du facteur de réduction de nvPM# (ou masse de nvPM) pour une composition de carburant donnée par rapport à celle pour la composition par défaut ou pauvre en SAF) peut être déterminé de manière à réduire au minimum (ou à conserver dans un seuil prédéfini) le nombre total (ou masse) de nvPM émises pendant une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz 10 telle qu'un cycle d'atterrissage et de décollage (LTO).
- [0642] Avant un vol, en utilisant la connaissance de la dépendance souhaitée du nombre de nvPM par rapport à W_F et aux conditions de vol, les caractéristiques de chacun des premier et second carburants, et la connaissance de la quantité de carburant qui sera utilisée à chaque valeur de W_F à chaque condition de vol, la quantité totale de chacun des premier et second carburants requis pour un vol proposé peut être déterminée comme décrit plus loin. L'aéronef peut donc être chargé avec une quantité de carburant adaptée avant le vol.
- [0643] La [Fig.18] illustre un exemple de la dépendance du nombre de nvPM par rapport au débit de carburant W_F pour l'exemple représenté à la [Fig.17] (ligne pointillée) comparativement à la dépendance correspondante pour une composition de carburant par défaut telle que du kérosène fossile (ligne pleine). Dans cet exemple, le premier carburant est une composition de carburant riche en SAF qui correspond à la composition de carburant C de la [Fig.7] et le second carburant est une composition de carburant pauvre en SAF qui correspond à la composition de carburant par défaut de la [Fig.7].
- [0644] Dans l'exemple de la [Fig.18], la caractéristique du carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant un fonctionnement à injection pilote seule est déterminée de telle sorte que le nombre de nvPM ne dépasse pas un seuil prédéterminé qui dans l'exemple illustré correspond au nombre de nvPM de la composition de carburant riche en SAF au point d'étagement SP. Dans cet exemple existe une zone de fonctionnement à des valeurs faibles de W_F dans laquelle les injecteurs de carburant pilotes 313 sont

alimentés avec la composition de carburant pauvre en SAF. Au fur et à mesure que W_F augmente et que le nombre de nvPM s'accroît, à un moment donné il est nécessaire de commencer le mélange dans une certaine composition de carburant riche en SAF afin d'empêcher le nombre de nvPM de passer au-dessus du seuil prédéterminé. Au fur et à mesure que W_F augmente encore, la proportion de carburant riche en SAF dans le mélange continue d'augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne 100 % au point d'étagement SP. À des valeurs encore plus élevées de W_F , correspondant au fonctionnement à injection pilote et principale, les injecteurs de carburant pilotes 313 sont à nouveau alimentés avec une composition de carburant pauvre en SAF.

- [0645] Bien que la [Fig.18] montre un nombre de nvPM plafonné en fonction de W_F , on aura à l'esprit qu'à travers la détermination appropriée de la dépendance du rapport de mélange par rapport à W_F sur toute la région de fonctionnement à injection pilote seule, il est possible d'obtenir une quelconque dépendance souhaitée du nombre de nvPM par rapport à W_F , sous réserve d'une limite supérieure correspondant à la dépendance du second carburant (c'est-à-dire le carburant associé à niveau élevé de nvPM, tel que la composition de carburant pauvre en SAF) et d'une limite inférieure correspondant à la dépendance du premier carburant (c'est-à-dire le carburant associé à faible niveau de nvPM, tel que la composition de carburant riche en SAF). Si la composition de carburant riche en SAF correspond à la composition de carburant C provenant de 7, la région pouvant être traitée est représentée par la zone hachurée à la [Fig.19].
- [0646] Au sein de la région pouvant être traitée, une quelconque fonction à valeur unique du nombre de nvPM versus W_F peut en principe être obtenue par un programme de mélange approprié en fonction de W_F dans un fonctionnement à injection pilote seule. La [Fig.20] montre un autre exemple de la manière dont le nombre de nvPM peut dépendre du débit de carburant.
- [0647] En fournissant un mélange de carburant aux injecteurs de carburant pilotes de cette manière dans un fonctionnement à injection pilote seule (ou au moins au sein d'une ou plusieurs régions à l'intérieur du fonctionnement à injection pilote seule) l'intensité du taux de variation du nombre de nvPM avec W_F peut être rendue sensiblement inférieure à celle pour la composition de carburant par défaut telle que le kérosène fossile, et aussi moins inférieure à celle pour d'autres exemples dans lesquels se produit un basculement entre les sources de carburant 302, 304. Par conséquent, dans le fonctionnement à injection pilote seule, à l'aide de l'exemple de la [Fig.17], W_F peut être modifié pour des raisons d'autres que les émissions de suie sans provoquer de changements très importants des émissions de suie. Par exemple, dans le document US2022042465, les débits de carburant de moteurs individuels sont modifiés lors de l'approche finale afin de limiter le bruit de purge. Si nous supposons que

l'exigence de poussée pendant l'approche finale correspond à une région de fonctionnement à injection pilote seule, alors les exemples ici dans lesquels du carburant est mélangé par le mélangeur de carburant 318 de la présente invention peuvent sensiblement réduire le changement des émissions de suie qui autrement accompagneraient de tels changements de débit de carburant motivés par le bruit.

[0648] Les exemples illustrés sur les figures 13 et 15 peuvent être considérés comme des cas spéciaux de l'exemple de carburant mélangé dans lequel la composition de carburant riche en SAF est utilisée non seulement au point d'étagement SP mais également dans toute une région s'étendant d'une certaine manière vers la gauche du point d'étagement (c'est-à-dire à des débits de carburant inférieurs). Dans l'exemple de la [Fig.13] cette région s'étend jusqu'au côté gauche du graphique. Dans l'exemple de la [Fig.15] existe un point de basculement auquel la composition de carburant est fortement basculée vers la composition de carburant pauvre en SAF dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule. On aura à l'esprit que le basculement d'un type de carburant à l'autre équivaut à changer le rapport de mélange de 0:100 à 100:0, ou inversement.

[0649] La [Fig.21] illustre un procédé 4000 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz 10 qui peut être mis en œuvre en utilisant le système de la [Fig.17]. Des étapes communes à d'autres procédés décrits précédemment sont marquées en ce sens. Dans cet exemple, la régulation 4002 de la distribution de carburant comprend : le mélange 4010 d'une alimentation en carburant à la fois des première et seconde sources de carburant 302, 304 pour former un carburant mélangé consistant en carburant provenant de la première source de carburant 302, carburant provenant de la seconde source de carburant 304, ou un mélange de ceux-ci ; et la distribution 4012 du carburant mélangé aux injecteurs de carburant pilotes 313. L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec la [Fig.17] peut être incorporée dans le procédé de la [Fig.21], même si elles ne sont pas répétées ici.

[0650] *Fonction de coût des nvPM*

[0651] Dans les exemples décrits ci-dessus la commande des caractéristiques de carburant fournies aux injecteurs de carburant est basée sur une forme souhaitée de la dépendance du nombre de nvPM par rapport à W_F à partir de laquelle la ou les caractéristiques de carburant à utiliser à chaque valeur de W_F sont déterminées pour permettre que la forme souhaitée soit obtenue. Le régulateur de distribution de carburant dans ces exemples peut donc être contrôlé pour réduire au minimum la production de nvPM du moteur. La production de nvPM peut être en termes de teneur en nvPM de l'échappement du moteur par exemple la masse ou le nombre de particules nvPM produites.

[0652] Afin de fournir encore un contrôle amélioré supplémentaire de l'émission de nvPM, des facteurs supplémentaires peuvent être pris en compte car les inventeurs ont

identifié qu'une particule de suie émise n'est pas aussi désavantageuse qu'une autre particule de suie émise. Par conséquent dans certains exemples, on peut prendre en compte la quantité de coût ou de préjudice causée par chaque particule de suie émise. Par exemple, on peut considérer que les particules de suie émises à proximité du sol présentent un impact sur la santé humaine plus élevé que les particules de suie émises à plusieurs milliers de pieds au-dessus du sol (en effet les émissions de suie à moins de 3 000 pieds d'altitude au-dessus de la piste sont régulées, alors que les émissions de suie à des altitudes plus élevées ne le sont pas).

- [0653] Le régulateur de carburant de l'un quelconque des exemples décrits ici peut être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes afin de réguler (par exemple, optimiser ou réduire) l'impact des nvPM de l'échappement du moteur. Le régulateur de distribution de carburant 306 peut par conséquent être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes afin de réduire au minimum une fonction de coût en fonction d'un ou plusieurs paramètres d'impact des nvPM. Les paramètres d'impact des nvPM peuvent concerner le coût ou le préjudice de l'émission de nvPM (par exemple, de la suie) d'un type particulier ou dans une certaine situation. Ceci peut permettre au moteur à turbine à gaz 10 d'être actionné de manière à réduire les émissions de nvPM qui pourraient autrement entraîner le plus grand dommage par rapport à celles qui ont moins d'effet sur l'environnement et/ou la santé humaine.
- [0654] Le ou les paramètres d'impact des nvPM sur lesquels est basée la fonction de coût peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0655] i) la hauteur au-dessus du sol à laquelle se déroule la production de nvPM ;
- [0656] ii) la position (par exemple l'emplacement c'est-à-dire la longitude et la latitude) de la production de nvPM. Le coût de l'émission de nvPM peut être défini en fonction de la position 3D des émissions de suie (par exemple altitude, longitude, latitude), et peut prendre en compte la proximité de centres de population ou d'autres lieux importants ;
- [0657] iii) les conditions météorologiques/atmosphériques à un emplacement de la production de nvPM. Par exemple la fonction de coût peut prendre en compte les vents dominants, les modèles météorologiques et le comportement atmosphérique tels que les processus d'élimination afin d'évaluer l'emplacement futur des particules de suie émises par rapport aux centres de population ou d'autres lieux importants ;
- [0658] iv) les impacts climatiques associés à l'emplacement de la production de nvPM. Par exemple, les impacts climatiques du dépôt de suie à certains emplacements peuvent être pris en compte. De tels emplacements peuvent inclure autrement des surfaces à albédo élevé, par exemple ;
- [0659] v) la masse/taille des particules de nvPM individuelles produites. La fonction de coût peut être définie de manière à donner la priorité à des réductions du nombre et/ou de la masse des nvPM dans une ou plusieurs plages de tailles de particules spécifiques, par

rapport aux réductions du nombre et/ou de la masse de nvPM dans une ou plusieurs autres plages de tailles. La fonction de coût peut, par exemple, comprendre une somme pondérée sur le nombre (ou masse) de particules dans des plages de tailles différentes, la pondération étant définie de sorte à refléter la notion selon laquelle certaines plages de tailles peuvent être plus nocives pour la santé, ou entraîner un résultat environnemental plus défavorable, que d'autres (et donc être plus importantes que la fonction de coût), mais sans ignorer complètement les autres plages de tailles ;

[0660] vi) la production potentielle de traînées de condensation et/ou les caractéristiques des traînées de condensation. Par exemple, la fonction de coût peut prendre en compte la probabilité que certaines émissions de nvPM provoquent la production d'une traînée de condensation par l'aéronef, ou influent sur les propriétés ou caractéristiques d'une traînée de condensation produite par l'aéronef. Ceci peut s'appliquer plus particulièrement à des traînées de condensation formées au sommet de la phase de descente d'aéronef où le fonctionnement de la chambre de combustion serait vraisemblablement sensiblement en dessous du point d'étagement et l'utilisation de carburant à faible niveau de nvPM pourrait avoir un effet plus important ;

[0661] vii) l'impact de la qualité de l'air locale (LAQ) de la production de nvPM ; et/ou

[0662] viii) la quantité de nvPM produite. La fonction de coût peut prendre en compte la quantité d'émission des nvPM produite par le moteur par exemple en termes de masse totale et/ou de nombre total de particules de nvPM dans un temps donné, ou un indice d'émissions de la masse (ou du nombre) d'un nvPM par unité de masse de carburant consommé.

[0663] Un nombre quelconque des paramètres d'impact ci-dessus peut être défini afin de définir une fonction de coût qui doit être réduite au minimum et le régulateur de distribution de carburant 306 commandé pour fournir du carburant aux caractéristiques requises à la chambre de combustion 16. Dans certains exemples, la fonction de coût de la production des nvPM peut être incorporée dans une fonction de coût plus large comprenant d'autres coûts.

[0664] La commande du régulateur de distribution de carburant 306 d'un quelconque exemple décrit ici peut être basée sur la fonction de coût. Par exemple, le mélange embarqué du premier et du second carburant (riche en SAF et pauvre en SAF) peut être utilisé pour atteindre un nombre de nvPM souhaité à chaque condition de fonctionnement au sein du fonctionnement à injection pilote seule. Les caractéristiques de carburant fournies aux injecteurs de carburant pilotes 313 dans un fonctionnement à injection pilote seule (et donc le rapport de mélange correspondant de la quantité de composition pauvre en SAF sur la quantité de composition de carburant riche en SAF) ne peuvent plus être une simple fonction de W_F (en fait, il peut même ne pas s'agir d'une fonction à valeur unique de W_F) mais peuvent varier selon d'autres paramètres de

manière à réduire au minimum une fonction de coût global.

[0665] Basculement entre le fonctionnement à injection pilote seule et le fonctionnement à injection pilote et principale pendant le régime de croisière

[0666] Dans les systèmes de combustion étagée connus, le point d'étagement SP est habituellement choisi de telle sorte que le fonctionnement en régime de croisière se fait au sein de la région de fonctionnement à injection pilote et principale. Un fonctionnement à des réglages de faible puissance, tels que le roulage, la descente et l'approche, se déroule souvent au sein de la région de fonctionnement à injection pilote seule.

[0667] Les inventeurs ont déterminé qu'il est en outre avantageux de faire fonctionner un système de combustion étagée de sorte qu'il est en mode d'injection pilote seule pendant au moins une partie de son fonctionnement en régime de croisière, tout en fournissant aussi sélectivement du carburant à partir de deux sources différentes à la chambre de combustion pendant le fonctionnement en régime de croisière.

[0668] Dans un autre exemple de la présente demande, le système de combustion étagée 64 illustré à la [Fig.5] est en outre ou en variante conçu pour basculer entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale au point d'étagement sélectionné de sorte qu'il corresponde à un mode de fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur 10. Le point d'étagement dans cet exemple est conçu de telle sorte qu'il définit une limite entre une première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur. En d'autres termes, le point d'étagement est sélectionné pour se produire au niveau d'un réglage de puissance moteur (ou d'un autre paramètre de fonctionnement de moteur révélateur du réglage de puissance moteur) qui est au-dessus du réglage minimal de puissance moteur auquel fonctionne le moteur en régime de croisière à l'état stabilisé. Ceci définit une plage de conditions de puissance moteur en régime de croisière relativement plus faibles, dans laquelle le système de combustion étagée fonctionne dans le mode de fonctionnement à injection pilote seule, comparativement au fonctionnement à injection pilote et principale à des réglages de puissance moteur en régime de croisière relativement plus élevés. Cela déplace efficacement le point d'étagement vers un réglage de puissance plus élevé de telle sorte que le système de combustion peut toujours fonctionner en fonctionnement à injection pilote seule à des puissances plus élevées que le réglage de puissance en régime de croisière minimal. Les plages à injection pilote seule et injection pilote et principale sont donc redéfinies de telle sorte que le système de combustion étagée 64 bascule entre des modes de fonctionnement à un W_F différent c'est-à-dire que la frontière séparant les plages est changée comparativement aux systèmes de l'état de la technique.

[0669] Dans cet exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour

distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie ou de préférence la totalité de la première plage de fonctionnement en régime de croisière ayant une caractéristique de carburant différente de celle du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou aux injecteurs de carburant principaux 314 pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière. Plus précisément, pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière, le régulateur de carburant 306 fournit du carburant aux injecteurs de carburant pilotes à partir des sources de carburant disponibles qui est différent de celui fourni aux injecteurs de carburant pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière. Il peut s'agir d'un carburant fourni à la fois aux injecteurs de carburant principaux et pilotes lors du fonctionnement à injection principale et pilote.

[0670] Les inventeurs ont déterminé qu'en réglant le point d'étagement de sorte que le fonctionnement en régime de croisière plus faible peut avoir lieu dans le mode à injection pilote seule, certaines émissions du moteur peuvent être réduites et l'efficacité de combustion améliorée. En combinaison avec l'utilisation sélective de carburants ayant des caractéristiques différentes, les inventeurs ont déterminé que des effets désavantageux sur les émissions qui autrement entraîneraient un déplacement du point d'étagement peuvent être atténués. Ceci donne donc une amélioration globale de l'efficacité de la combustion et une réduction des émissions par une combinaison de ces facteurs.

[0671] Les émissions de polluants peuvent être caractérisées par un indice d'émission (EI), détaillant la masse (ou le nombre) d'un polluant particulier par unité de masse du carburant consommé. Les inventeurs ont observé qu'en fonctionnement à injection pilote seule, à des puissances de moteur très faibles, l'indice d'émission massique du monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures non brûlés (HC) peut être relativement élevé. Non seulement cela représente une libération de polluants dans l'atmosphère, mais cela réduit également le rendement du carburant en raison d'une combustion incomplète du carburant, c'est-à-dire que tout le carburant n'est pas complètement brûlé. Cela peut se traduire par une augmentation de la consommation de carburant de mission et/ou une réduction de la capacité de la plage de charge utile de l'aéronef. Au fur et à mesure que la puissance du moteur augmente (toujours dans le fonctionnement à injection pilote seule), l'EI(CO) et l'EI(HC) diminuent tous les deux et restent ensuite faibles. Cependant, lors du passage à des réglages de puissance moteur encore plus élevés et de la transition vers le fonctionnement à injection pilote et principale, l'EI(CO) et l'EI(HC) deviennent à nouveau élevés avant de repasser à nouveau à des réglages de puissance moteur encore plus élevés. Ceci est illustré à la [Fig.22], qui montre la dépendance d'EI(CO) et d'EI(HC) par rapport au réglage de puissance moteur, la ligne pointillée verticale représentant le point d'étagement SP.

- [0672] Pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière, le moteur fonctionne à des réglages de puissance relativement faibles, de telle sorte que si le point d'étagement était sélectionné pour amener le système de combustion à fonctionner en mode à injection pilote et principale, l'émission de CO et de HC serait relativement élevée. Ceci est dû au fait que même si le point d'étagement était choisi de telle sorte que le fonctionnement en régime de croisière a lieu en mode à injection pilote et principale c'est-à-dire au-dessus du point d'étagement SP, certaines parties du fonctionnement en régime de croisière pourraient être assez près du point d'étagement (par exemple juste au-dessus de celui-ci). De manière désavantageuse, cela signifierait que les émissions de HC et de CO peuvent être élevées pendant un tel fonctionnement, et que l'efficacité de la combustion peut s'en trouver désavantageusement et matériellement réduite (ce qui se traduirait par une consommation de carburant plus élevée et/ou une réduction de la capacité de plage de charge utile de l'aéronef).
- [0673] En définissant le point d'étagement de sorte que le fonctionnement en régime de croisière de faible puissance se produit dans le mode à injection pilote seule, cette émission désavantageuse de CO et HC peut être réduite ou évitée. Ceci est illustré à la [Fig.23], qui montre l'effet du réglage du point d'étagement SP' pour définir une première plage de fonctionnement en régime de croisière 320a et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière 320b. Comme on peut le voir à la [Fig.23], la première plage de fonctionnement en régime de croisière 320a correspond à un régime de croisière de faible puissance, qui est en dessous du point d'étagement SP', la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière 320b correspondant à un fonctionnement en régime de croisière de puissance supérieure au-dessus du point d'étagement SP'. Dans la première plage de fonctionnement en régime de croisière 320a, le système de combustion étagée 64 est configuré pour fonctionner en mode à injection pilote seule, fournissant ainsi des émissions faibles de CO et de HC. En raison du déplacement du point d'étagement vers un réglage de puissance plus élevé (par exemple, des lignes pointillées minces aux lignes pointillées épaisses à la [Fig.23] marquées respectivement SP et SP'), les émissions de CO et HC restent faibles sur une plus grande plage de réglages de puissance moteur (par exemple, la ligne pleine épaisse par rapport à la ligne pointillée mince dans la dépendance d'EI(CO) et d'EI(HC) par rapport au réglage de puissance).
- [0674] Les inventeurs ont en outre constaté que l'indice d'émission des nvPM augmente rapidement avec la puissance du moteur dans le mode à injection pilote seule mais est habituellement uniformément faible dans le mode à injection pilote et principale. Pour les nvPM, l'indice d'émissions peut être décrit en référence à la masse de nvPM ou au nombre de particules nvPM (par unité de masse de carburant). Un exemple de la dépendance des nvPM par rapport au réglage de puissance moteur est illustré à la

[Fig.24].

- [0675] Il en résulte que le fait de déplacer efficacement le point d'étagement vers un réglage de puissance plus élevé, la valeur $El(nvPM)$ par défaut est avantageusement augmentée. Comme on peut le déduire de la [Fig.24], le fonctionnement en mode d'injection pilote seule à des puissances plus élevées entraînerait une production accrue de $nvPM$, car il y aurait moins de la plage de puissance moteur dans le fonctionnement à injection pilote et principale lorsque la production de $nvPM$ est faible, et le $nvPM$ augmenterait rapidement à des puissances plus élevées en mode de fonctionnement à injection pilote seule.
- [0676] Les inventeurs ont déterminé que cette augmentation autrement préjudiciable des $nvPM$ peut être atténuée par l'utilisation sélective d'un carburant d'une caractéristique de carburant différente pendant au moins la partie de la plage de fonctionnement en régime de croisière à injection pilote seule à laquelle la production de $nvPM$ serait autrement élevée. Par exemple, le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur 320a peut être choisi pour être du carburant associé à un niveau de production de $nvPM$ qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 pendant au moins une partie de la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur 320b. Ceci peut être obtenu par le carburant contenu dans la première source de carburant 302 étant associé à une production faible de $nvPM$ comparativement à la seconde source de carburant 304 (dans des conditions des conditions de combustion correspondantes).
- [0677] L'effet de l'utilisation sélective d'un carburant d'une caractéristique différente pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur 320a est illustré à la [Fig.25]. La ligne pleine épaisse dans la dépendance d' $El(nvPM)$ par rapport à la puissance peut être comparée à la ligne pointillée épaisse dans la première plage de fonctionnement en régime de croisière 320a qui est produite en utilisant un carburant produisant peu de $nvPM$.
- [0678] Dans certains exemples, la caractéristique de carburant par laquelle le carburant provenant de la première source de carburant 302 diffère du carburant de la seconde source de carburant 304 peut être le pourcentage de carburant d'aviation durable (SAF) présent dans le carburant respectif comme indiqué ci-dessus. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement en régime de croisière à injection pilote seule aurait de même un pourcentage de SAF différent comparativement au carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou principaux 314 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Comme indiqué ci-dessus, par rapport au kérosène fossile, le SAF donne sensiblement moins de $nvPM$, et peut donc

être utilisé pour atténuer l'augmentation de nvPM qui autrement serait obtenue du fonctionnement en régime de croisière à injection pilote seule supplémentaire. Par exemple, le carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière 320a peut avoir une plus grande proportion de SAF comparativement à celui fourni aux injecteurs de carburant pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière 320b. Ceci permet d'utiliser sélectivement une quantité limitée de SAF (ou d'un autre carburant à faible niveau de nvPM) pour réduire les émissions de nvPM, CO et HC globales.

[0679] Cela peut toutefois ne pas être toujours le cas. Dans certains exemples, le kérosène fossile peut être traité pour éliminer les composants aromatiques, en particulier les naphthalènes, afin de produire un carburant largement paraffinique d'origine fossile qui serait un carburant produisant de faibles niveaux de nvPM. D'autres caractéristiques de carburant peuvent donc être associées à un faible niveau de nvPM, telles que le pourcentage de la teneur en composés aromatiques ou de la teneur en naphthalène.

[0680] Les inventeurs ont donc constaté qu'à travers une combinaison de l'utilisation sélective de deux types de carburant et du fonctionnement en mode à injection pilote seule à un faible régime de croisière, la réduction avantageuse des émissions de CO et de HC s'accompagne d'une augmentation désavantageuse plus faible des nvPM que ce qui se produirait sans utiliser une composition de carburant riche en SAF (ou un autre carburant associé à un faible niveau de nvPM) dans la plage pertinente des réglages de puissance moteur.

[0681] Le fonctionnement sélectif en régime de croisière à injection pilote seule et l'utilisation sélective de carburant de la présente demande sont avantageux par rapport à d'autres procédés connus pour réduire l'émission globale de nvPM, HC et CO. Par exemple, des solutions de rechange comprennent une zone de fonctionnement « à injection pilote et semi-principale » qui se situe entre la région à injection pilote seule et la région à injection pilote et principale. Lorsque le réglage de puissance moteur correspond à la région à injection pilote et semi-principale, au lieu d'allumer tous les brûleurs principaux de carburant, seule une proportion (par exemple la moitié) d'entre eux est allumée, avec par exemple, une répartition alternée de marche-arrêt-marche-arrêt autour de l'anneau de chambre de combustion (d'autres agencements pourraient être envisagés tels que l'allumage de brûleurs principaux sur une moitié de l'anneau et non sur l'autre moitié). Cependant, cela engendre des propriétés de combustion inégales autour de l'anneau de la chambre de combustion et peut également être désavantageux pour le fonctionnement de la turbine et la durée de vie de la turbine. Une autre approche consiste à avoir un système pilote étagé dans lequel la région de fonctionnement « à injection pilote seule » est divisée en sous-régions, dans lesquelles des nombres progressivement plus importants de brûleurs pilotes sont

basculés vers des réglages de puissance moteur progressivement plus élevés dans la région globale « à injection pilote seule ». Une telle configuration ajoute désavantageusement un poids et une complexité qui peuvent être évités par les procédés de la présente demande.

[0682] Dans un exemple, la première plage de fonctionnement en régime de croisière correspond à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie ultérieure d'un segment de croisière d'un vol, et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière correspond à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie relativement antérieure du segment de croisière. Par exemple, pendant un cycle de vol de l'aéronef, le fonctionnement en régime de croisière peut être divisé en un ou plusieurs segments de croisière. Ceux-ci peuvent correspondre à un fonctionnement en régime à l'état stabilisé à des altitudes différentes. Vers la fin d'un segment de croisière, le réglage de puissance moteur nécessaire pour maintenir le régime de croisière à l'état stabilisé au nombre de Mach spécifié et à l'altitude spécifiée va diminuer à mesure que l'aéronef brûle du carburant et s'allège. Comme une poussée moindre est donc nécessaire au niveau d'une partie ultérieure du segment de croisière, le réglage de puissance moteur est réduit. Le système de combustion de la présente demande peut donc être conçu pour basculer vers un fonctionnement à injection pilote seule à des puissances de moteur faibles vers la fin d'un segment de croisière, plutôt que de rester dans un fonctionnement à injection pilote et principale tout au long du segment (ou des segments s'il y en a plus d'un) de croisière du vol. Ceci contribue à réduire la production de HC et de CO qui pourrait autrement avoir lieu vers la fin du segment de croisière.

[0683] Dans un autre exemple, la première plage de fonctionnement en régime de croisière 320a correspond à un fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé du moteur et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière 320b correspond à un fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé du moteur. Dans cet exemple, le moteur à turbine à gaz 10 est conçu pour fournir un fonctionnement en régime de croisière à la fois subsonique et supersonique de l'aéronef sur lequel il est monté. Le point d'étagement peut être déterminé de telle sorte que le fonctionnement en régime de croisière à injection pilote seule correspond à un fonctionnement subsonique à puissance moteur relativement faible, tandis que le fonctionnement en régime de croisière à injection pilote et principale correspond à un fonctionnement supersonique à puissance moteur plus élevée.

[0684] Pour un aéronef supersonique, le régime de croisière supersonique est susceptible d'être possible au-dessus des océans, mais au-dessus des terres le régime de croisière peut être contraint d'être subsonique pour des raisons de conformité avec les réglementations sonores. Dans un tel exemple, le régime de croisière supersonique peut cor-

respondre à un réglage de puissance moteur élevé, bien au-dessus du point d'étagement. La croisière subsonique peut cependant dans cet exemple correspondre à des réglages de puissance du moteur beaucoup plus faibles qui pourraient se trouver près d'un point d'étagement par défaut ou de l'état de la technique, entraînant une faible efficacité de combustion et des émissions élevées de CO et HC pendant le régime de croisière subsonique. Un aéronef supersonique peut consommer une proportion matérielle de son carburant en régime de croisière subsonique, et ainsi l'efficacité de combustion dans cette condition de fonctionnement est très importante. En fonctionnant en mode à injection pilote seule pendant le régime de croisière subsonique, les émissions de CO et HC peuvent être réduites, tandis que le carburant d'une caractéristique différente peut être fourni pour réduire au minimum toute augmentation de la production de nvPM. Le fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé peut se produire avant le fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé, ou inversement. Dans certains exemples, le fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé peut être un fonctionnement en régime de croisière subsonique au-dessus des terres, tandis que le fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé peut être un fonctionnement en régime de croisière supersonique au-dessus de l'eau (par exemple au-dessus de la mer).

[0685] Afin de fournir du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant le premier fonctionnement en régime de croisière qui est différent de celui fourni à la chambre de combustion pendant le second fonctionnement en régime de croisière le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour fournir du carburant sélectivement à partir des première et seconde sources de carburant 302, 304 comme décrit ci-dessus (par exemple du carburant provenant uniquement de la première source de carburant 302, du carburant provenant uniquement de la seconde source de carburant 304, ou un mélange de ceux-ci). Dans un exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 peut comprendre un mélangeur de carburant 318 tel qu'illustré à la [Fig.17]. De manière similaire à ce qui est décrit ci-dessus, le mélangeur de carburant est conçu pour recevoir une alimentation en carburant à partir de la première et la seconde source de carburant 302, 304 et pour sortir un carburant constitué du carburant provenant de la première source de carburant, du carburant provenant de la seconde source de carburant, ou d'un mélange de ceux-ci. Ce carburant mélangé est fourni aux injecteurs de carburant pilotes 313, le carburant provenant d'une seule source de carburant (la seconde source de carburant 304 dans l'exemple ci-dessus) étant fourni aux injecteurs de carburant principaux 314. Dans d'autres exemples, le mélangeur peut être conçu pour alimenter à la fois les injecteurs de carburant principaux et pilotes avec un mélange de carburant approprié. Dans encore d'autres exemples, le régulateur de distribution de carburant 306 selon l'un quelconque

des exemples décrits ici peut être utilisé pour fournir du carburant dans les première et seconde plages de fonctionnement en régime de croisière (par exemple, celles utilisant des régulateurs indépendants pour les première et seconde sources de carburant ou un régulateur pilote conçu pour basculer entre les sources de carburant).

- [0686] Comme indiqué ci-dessus en liaison avec l'exemple illustré à la [Fig.17], la dépendance de la proportion du carburant provenant de la première source de carburant 302 comparativement à celle provenant de la seconde source de carburant 304 par rapport au débit de carburant peut être déterminée en fonction d'un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier. Par exemple, la proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant 304 comparativement à celle de la seconde source de carburant 304 peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier dans la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur. La quantité de carburant fournie à partir de chaque source de carburant peut être déterminée de telle sorte que la valeur nvPM ne dépasse pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz comme décrit ci-dessus. Dans l'un quelconque des exemples décrits ici ceci peut être obtenu par une commande appropriée du mélangeur 318, ou un quelconque des autres régulateurs de distribution de carburant 306 décrits ici.
- [0687] Dans certains exemples, la proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant 302 comparativement à celle distribuée à partir de la seconde source de carburant 304 pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière peut être déterminée au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
 - [0688] a) la quantité de carburant ayant la première caractéristique de carburant et la quantité de carburant ayant la seconde caractéristique de carburant disponible pour un vol proposé. Ceci peut par exemple, être fourni par une estimation ou une mesure de la quantité de carburant dans les réservoirs de carburant 53, 55 composant les première et seconde sources de carburant ;
 - [0689] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant 313 pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant 302 ; et/ou
 - [0690] c) un paramètre de limite de composition de carburant (par exemple une limite de certification, une composition de carburant disponible pour l'avitaillement, ou des limites d'aéronef/moteur).
- [0691] La [Fig.26] illustre un procédé 4014 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz selon l'exemple ci-dessus dans lequel du carburant d'une caractéristique différente est

distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant la première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur. Le procédé 4014 comprend la régulation 4016 de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 à partir de la première source de carburant 302 contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et de la seconde source de carburant 304 contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, comme décrit ci-dessus en utilisant le régulateur de distribution de carburant 306 d'un quelconque exemple ici (c'est-à-dire du carburant provenant uniquement de la première source de carburant 302, du carburant provenant uniquement de la seconde source de carburant 304, ou un mélange de ceux-ci). La seconde caractéristique de carburant est différente de la première comme décrit ci-dessus.

[0692] Le procédé comprend en outre le basculement 4018 entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale à un point d'étagement pendant un mode de fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur pour définir une première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur 320a et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur 320b. Le procédé comprend en outre la distribution 4020 de carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant au moins une partie de la première plage de fonctionnement en régime de croisière moteur 320a ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 pendant la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur 320b. L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec les exemples dans lesquels un carburant différent est fourni dans les première et seconde plages de fonctionnement en régime de croisière de moteur peut être incorporée dans le procédé 4014, même si elles ne sont pas répétées ici.

[0693] Variation du rapport d'étagement dans un régime de croisière à l'état stabilisé près du point d'étagement

[0694] Dans un autre exemple de la présente demande, le système de combustion étagée 64 illustré à la [Fig.5] est en outre ou en variante conçu pour fonctionner dans une plage de fonctionnement de transition entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Dans les présents exemples, la plage de fonctionnement de transition est fournie pendant le fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur. Dans la plage de fonctionnement de transition, le carburant est distribué à la fois aux injecteurs de carburant pilotes et aux injecteurs de carburant principaux 313, 314 à un rapport d'étagement de transition. Comme défini ailleurs ici, le rapport d'étagement définit les débits massiques de carburant relatifs attribuables aux injecteurs de carburant pilotes 313

comparativement aux injecteurs de carburant principaux 314. Dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule, le rapport d'étagement est, par définition, 100:0. Dans la plage de fonctionnement à injection pilote et principale, la chambre de combustion est configurée pour fonctionner avec un rapport d'étagement d'injection pilote et principale qui peut être de 20:80 ou 30:40, etc. Au sein de la plage de fonctionnement de transition la chambre de combustion est configurée pour fonctionner en utilisant un rapport d'étagement de transition qui est différent du rapport d'étagement d'injection pilote et principale (et différent du rapport d'étagement d'injection pilote seule, étant donné que le carburant est distribué à la fois aux injecteurs de carburant principaux et pilotes pendant la plage de fonctionnement de transition). Plus précisément, dans la plage de fonctionnement de transition, la proportion du débit de carburant imputable aux injecteurs de carburant pilotes comparativement aux injecteurs de carburant principaux est plus importante que pour le rapport d'injection pilote et principale. En d'autres termes, une transition lisse ou intermédiaire est prévue, dans laquelle une plus grande proportion de carburant est fournie aux injecteurs de carburant pilotes comparativement à un basculement direct entre tout le carburant en train d'être fourni aux injecteurs de carburant pilotes dans le mode à injection pilote seule, et le rapport d'étagement d'injection pilote et principale dans lequel une plus petite proportion de carburant est fournie aux injecteurs de carburant pilotes. En d'autres termes, plutôt que de déplacer le point d'étagement précis vers un réglage de puissance plus élevé (tel que décrit ailleurs ici), les inventeurs ont déterminé qu'une région de transition qui peut être incluse est caractérisée par une transition plus lente (par rapport au réglage de puissance moteur) depuis le rapport d'étagement d'injection pilote seule (100:0) jusqu'au rapport d'étagement d'injection pilote et principale choisi (par exemple 20:80).

[0695] Les inventeurs ont déterminé qu'en configurant le système de combustion étagée 64 pour fonctionner dans une plage de transition (à savoir, une plage de fonctionnement de transition) entre le fonctionnement à injection pilote et à injection pilote et principale, la quantité d'émissions de CO et de HC mise en œuvre dans cette plage de réglages de puissance moteur peut être réduite. Ceci est illustré à la [Fig.27], qui montre la dépendance de l'indice d'émission (EI) de CO et de HC pour une chambre de combustion étagée (telle que celle décrite ici) sur le réglage de puissance du moteur. La plage de transition est marquée 322, et se trouve à une plage de puissance moteur entre le fonctionnement à injection pilote seule et le fonctionnement à injection pilote et principale. À des puissances de moteur au sein de la plage de transition un niveau élevé de HC et de CO serait émis si la chambre de combustion 16 était destinée à fonctionner au rapport d'étagement d'injection pilote et principale, comme illustré par la ligne pointillée dans la courbe de HC et de CO de la [Fig.27]. En opérant à au

rapport d'étagement de transition (qui diminue dans ce cas progressivement au fur et à mesure que la puissance du moteur augmente), l'indice d'émission de CO et de HC est réduit, comme le montre le trait plein épais dans la courbe de HC et de CO dans la plage de transition.

[0696] Dans cet exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou principaux 314 pendant la plage de fonctionnement de transition ayant une caractéristique de carburant différente de celle du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Les inventeurs ont en outre déterminé que, de manière désavantageuse, la valeur EI(nvPM) par défaut dans la plage de transition 322 est augmentée pour le carburant ayant des caractéristiques identiques. Ceci est visible à la [Fig.28], qui illustre la dépendance de l'indice d'émission des nvPM par rapport à la puissance du moteur pour une chambre de combustion étagée. La ligne pointillée mince à la [Fig.28] représente les émissions de nvPM si la plage de transition 322 n'était pas fournie. La ligne pleine épaisse montre l'effet de l'introduction de la plage de transition 322 sur les émissions de nvPM. Dans le présent exemple, les inventeurs ont déterminé que la valeur EI(nvPM) dans la plage de transition 322 peut être atténuée par l'utilisation d'un carburant d'une caractéristique différente (par exemple du carburant riche en SAF) comme représenté par la ligne pointillée épaisse dans la courbe des nvPM au sein de la plage de transition. Ainsi, la pénalité des nvPM (nécessaire pour obtenir des émissions de CO/HC inférieures dans la plage de transition 322) est réduite en utilisant une composition de carburant riche en SAF dans la plage de transition 322 plutôt que d'utiliser une composition de carburant par défaut dans la plage de transition 322.

[0697] Dans certains exemples le carburant distribué à au moins les injecteurs de carburant pilotes 313 par le régulateur de distribution de carburant 306 pendant la plage de fonctionnement de transition 322 peut être choisi pour être du carburant associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Ceci peut être obtenu par le carburant contenu dans la première source de carburant 302 étant associé à une production faible de nvPM comparativement à la seconde source de carburant (dans des conditions des conditions de combustion correspondantes). Dans certains exemples, le carburant distribué à la fois au aux injecteurs de carburant pilotes et principaux 313, 314 par le régulateur de distribution de carburant 306 pendant la plage de fonctionnement de transition 322 est du carburant produisant peu de nvPM. Dans certains autres exemples, seul le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant la

plage de fonctionnement de transition 322 est choisi pour être associé à un faible niveau de nvPM (c'est-à-dire que le carburant distribué aux injecteurs de carburant principaux reste le même). Ceci peut permettre une meilleure utilisation de la quantité de carburant à faible niveau de nvPM disponible, étant donné que fournir du carburant aux injecteurs de carburant principaux (à savoir, la partie pauvre du système de carburant) peut avoir moins d'effet sur la réduction des nvPM.

[0698] Dans certains exemples, la caractéristique de carburant par laquelle le carburant provenant de la première source de carburant 302 diffère du carburant de la seconde source de carburant 304 peut être le pourcentage de carburant d'aviation durable (SAF) présent dans le carburant respectif comme indiqué ci-dessus. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant la plage de fonctionnement de transition 322 aurait de même un pourcentage de SAF différent comparativement au carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou principaux 314 pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Comme indiqué ci-dessus, par rapport au kérosène fossile, le SAF donne sensiblement moins de nvPM, et peut donc être utilisé pour atténuer l'augmentation de nvPM qui autrement serait obtenue du fonctionnement en régime de croisière supplémentaire. Par exemple, le carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes pendant la plage de fonctionnement de transition peut avoir une plus grande proportion de SAF comparativement à celui fourni aux injecteurs de carburant pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Ceci permet d'utiliser sélectivement une quantité limitée disponible de SAF (ou d'un autre carburant à faible niveau de nvPM) pour réduire les émissions de nvPM, CO et HC globales.

[0699] Cela peut toutefois ne pas être toujours le cas. Dans certains exemples, le kérosène fossile peut être traité pour éliminer les composants aromatiques, en particulier les naphthalènes, afin de produire un carburant largement paraffinique d'origine fossile qui serait un carburant produisant de faibles niveaux de nvPM. D'autres caractéristiques de carburant peuvent donc être associées à un faible niveau de nvPM, telles que le pourcentage de la teneur en composés aromatiques ou de la teneur en naphthalène. Les premier et second carburants peuvent donc différer par des caractéristiques autres que la teneur en SAF tout en obtenant quand même l'effet recherché sur les émissions de nvPM.

[0700] Pendant la plage de fonctionnement de transition 322 le rapport d'étagement de transition peut varier avec un réglage de puissance moteur changeante. Dans un exemple, le rapport d'étagement de transition présente une variation continue avec une puissance moteur changeante à l'intérieur de la plage de fonctionnement de transition 322. Ceci peut assurer une transition douce entre le rapport d'étagement dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule et celle à injection pilote et

principale. La variation continue peut être telle que la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant (c'est-à-dire le total étant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et principaux) que l'on peut attribuer au flux de carburant vers les injecteurs de carburant pilotes 313 diminue avec l'augmentation de la puissance du moteur pendant la plage de fonctionnement de transition 322. La proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant principaux 314 augmente au contraire avec l'augmentation de la puissance du moteur dans la plage de fonctionnement de transition 322.

[0701] Dans d'autres exemples, le rapport d'étagement de transition peut avoir une valeur intermédiaire constante qui est différente du rapport d'étagement d'injection pilote et principale. Le rapport d'étagement de transition peut être compris entre le rapport d'injection pilote seule et le rapport d'injection pilote et principale. Ceci permet donc une transition plus progressive entre le rapport d'injection pilote seule et le rapport d'injection pilote et principale. Par exemple, le rapport d'étagement de transition peut être de 70:30, ce qui est compris entre 100:0 dans la plage d'injection pilote seule, et un rapport d'étagement d'injection pilote et principale qui est par exemple de 20:80 ou 30:70.

[0702] Dans encore d'autres exemples, le rapport d'étagement de transition varie entre une série de valeurs intermédiaires constantes, chacune étant différente du rapport d'étagement d'injection pilote et principale. Par ailleurs, chacun des rapports intermédiaires peut être compris entre celui de la plage d'injection pilote seule et celui de la plage d'injection pilote et principale. Par exemple, le rapport d'étagement de transition peut être une série de valeurs de 80:20, 60:40 et 40:60. Le rapport d'injection pilote et principale peut dans cet exemple être 20:80. Les rapports d'étagement intermédiaires peuvent ainsi diminuer vers le rapport d'injection pilote et principale (c'est-à-dire qu'une proportion progressivement plus petite du carburant total est fournie aux injecteurs de carburant pilotes, et une proportion progressivement plus grande du carburant total est fournie aux injecteurs de carburant principaux). Ceci n'est cependant qu'un exemple, et un quelconque autre nombre et des quelconques autres valeurs de rapports d'étagement de transition intermédiaires peuvent être utilisés.

[0703] Dans certains exemples, le rapport d'étagement de transition peut avoir une variation continue avec la puissance du moteur dans une partie de la plage de fonctionnement de transition et peut avoir une ou plusieurs valeurs constantes dans une autre partie de la plage de fonctionnement de transition. Les exemples ci-dessus peuvent donc être combinés. Dans d'autres exemples, le rapport d'étagement peut avoir une variation continue sur la totalité de la plage de fonctionnement de transition, ou une ou plusieurs valeurs constantes sur la totalité de la plage de fonctionnement de transition.

- [0704] Afin de fournir du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant la plage de fonctionnement de transition 322 qui est différente de celui fourni à la chambre de combustion 16 pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour fournir du carburant sélectivement à partir des première et seconde sources de carburant 302, 304 tel que décrit ci-dessus (par exemple depuis uniquement la première source de carburant 302, uniquement la seconde source de carburant 304, ou un mélange de celles-ci). Dans un exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 peut comprendre un mélangeur de carburant 318 tel qu'illustré à la [Fig.17]. De manière similaire à celle décrite ci-dessus, le mélangeur de carburant est conçu pour recevoir une alimentation en carburant à la fois à partir de la première et de la seconde source de carburant 302, 304 et pour sortir un carburant provenant de la première source de carburant, du carburant provenant de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci. Ce carburant mélangé est fourni aux injecteurs de carburant pilotes 313, le carburant provenant d'une seule source de carburant (la seconde source de carburant 304 dans l'exemple ci-dessus) étant fourni aux injecteurs de carburant principaux 314. Dans d'autres exemples, le mélangeur peut être conçu pour alimenter à la fois les injecteurs de carburant principaux et pilotes avec un mélange de carburant approprié. Dans encore d'autres exemples, le régulateur de distribution de carburant 306 de l'un quelconque des exemples décrits ici peut être utilisé pour fournir du carburant dans les plages à injection pilote seule, de transition et à injection pilote et principale (par exemple, celles utilisant des régulateurs indépendants pour les première et seconde sources de carburant ou un régulateur pilote conçu pour basculer entre les sources de carburant).
- [0705] Comme indiqué ci-dessus en liaison avec l'exemple illustré à la [Fig.17], la dépendance de la proportion du carburant provenant de la première source de carburant 302 comparativement à celle provenant de la seconde source de carburant 304 par rapport au débit de carburant peut être déterminée en fonction d'un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier. Par exemple, la proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant 302 comparativement à celle de la seconde source de carburant 304 peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier dans la plage de transition 322. La quantité de carburant fournie à partir de chaque source peut être déterminée de telle sorte que la valeur nvPM ne dépasse pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz comme décrit ci-dessus. Dans l'un quelconque des exemples décrits ici ceci peut être obtenu par une commande appropriée du mélangeur 318, ou un quelconque des autres régulateurs de distribution de carburant 306 décrits ici.

- [0706] Dans certains exemples, la proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant 302 comparativement à celle distribuée à partir de la seconde source de carburant 304 pendant la plage de fonctionnement de transition 322 peut être déterminée au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0707] a) la quantité de carburant ayant la première caractéristique de carburant et la quantité de carburant ayant la seconde caractéristique de carburant disponible pour un vol proposé. Ceci peut par exemple, être fourni par une estimation ou une mesure de la quantité de carburant dans les réservoirs de carburant 53, 55 composant les première et seconde sources de carburant ;
- [0708] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant 313 pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant 302 ; et/ou
- [0709] c) un paramètre de limite de composition de carburant (par exemple une limite de certification, une composition de carburant disponible pour l'avitaillement, ou des limites d'aéronef/moteur).
- [0710] La [Fig.29] illustre un procédé 4022 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz selon l'exemple ci-dessus dans lequel du carburant d'une caractéristique différente est distribué aux injecteurs de carburant pilotes pendant la plage de transition 322 comparativement à la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. Le procédé 4022 comprend la régulation 4024 de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 à partir de la première source de carburant 302 contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et de la seconde source de carburant 304 contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant comme décrit ci-dessus en utilisant le régulateur de distribution de carburant 306 d'un quelconque exemple ici (par exemple de telle sorte que le carburant distribué est du carburant provenant uniquement de la première source de carburant, du carburant provenant uniquement de la seconde source de carburant, ou un mélange de ceux-ci). La seconde caractéristique de carburant est différente de la première comme décrit ci-dessus.
- [0711] Le procédé comprend en outre le fonctionnement 4026 du système de combustion étagée dans une plage de fonctionnement de transition 322 entre les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale dans lesquelles du carburant est distribué aux injecteurs de carburant pilotes et principaux à un rapport d'étagement de transition qui est différent du rapport d'étagement d'injection pilote et principale. La régulation 4024 de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux comprend la distribution 4028 de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant la plage de fonctionnement de

transition 322 ayant une caractéristique de carburant différente de celle du carburant fourni aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux pendant au moins une partie de la plage de fonctionnement à injection pilote et principale. L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec les exemples dans lesquels un carburant différent est distribué dans la plage de transition 322 peut être incorporée dans le procédé 4022, même si elles ne sont pas répétées ici.

[0712] Commande de la chambre de combustion étagée pendant l'accélération

[0713] Une accélération du moteur est provoquée en augmentant volontairement le débit de carburant jusqu'à une valeur supérieure à celle nécessaire pour maintenir le fonctionnement à l'état stabilisé. Les inventeurs ont observé que cette « suralimentation » provoque une augmentation initiale du rapport carburant-air dans la chambre de combustion et peut entraîner une production accrue de nvPM (suie ou fumée), notamment à des réglages de puissance moteur correspondant à un fonctionnement à injection pilote seule.

[0714] Pour réduire la production de quantités excessives de nvPM lors de l'accélération, on sait basculer vers un mode de fonctionnement d'« accélération » d'un moteur à turbine à gaz dans lequel se produit le point d'étagement à un réglage de puissance moteur plus faible. Ainsi, la transition vers le fonctionnement à injection pilote et principale a lieu à un réglage de puissance moteur plus faible que ce qu'il serait pendant un fonctionnement à l'état stabilisé. Ceci contribue à réduire la quantité globale de nvPM produite lors de l'accélération.

[0715] Les inventeurs ont observé que le basculement vers un tel mode d'accélération connu peut toutefois présenter un certain nombre d'inconvénients. Par exemple, une augmentation des émissions de HC et de CO peut être provoquée. Dans certaines solutions connues, le maintien d'un niveau acceptable de CO et de HC se traduit par une augmentation des émissions de NOx car les flammes les plus pauvres qui produisent le moins de NOx dans cette région produisent trop de CO et de HC, et inversement les modifications de conception visant à réduire le CO et les HC peuvent entraîner une augmentation des émissions de NOx sur l'ensemble de la courbe de puissance. Par exemple une solution connue pourrait être de changer physiquement et d'enrichir tout l'injecteur de carburant principal pour réduire les émissions de CO et HC, ce qui conduirait alors à des niveaux de NOx plus importants à toutes les puissances.

[0716] Dans un autre exemple de la présente demande, le système de combustion étagée 64 illustré à la [Fig.5] est en outre ou en variante conçu pour fonctionner dans un mode de fonctionnement d'accélération. Dans le mode d'accélération le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant (c'est-à-dire aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314) ayant une caractéristique de carburant différente de celle du carburant distribué aux in-

jecteurs de carburant (c'est-à-dire aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314) pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé.

- [0717] Le mode d'accélération du moteur est un mode dans lequel le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant 313, 314 à une vitesse supérieure à celle suffisante pour maintenir le fonctionnement à l'état stabilisé du moteur. Ceci provoque l'accélération du moteur, par laquelle on désigne l'augmentation de la vitesse angulaire d'un ou plusieurs corps du moteur. Dans le mode de fonctionnement à l'état stabilisé les injecteurs de carburant ne sont pas suralimentés de telle sorte qu'aucune accélération du moteur ne se produit.
- [0718] Les inventeurs ont déterminé que des émissions de nvPM accrues lorsque le moteur fonctionne en mode d'accélération peuvent être évitées ou réduites en utilisant un carburant avec des caractéristiques différentes de celui qui est utilisé pendant un fonctionnement à l'état stabilisé. Ceci permet que le point d'étagement lors du mode d'accélération reste identique ou similaire à celui du mode de fonctionnement à l'état stabilisé, évitant ou réduisant/limitant ainsi l'augmentation désavantageuse des émissions de HC ou de CO.
- [0719] Dans certains exemples par conséquent le carburant distribué aux injecteurs de carburant (par exemple, les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314) pendant le mode de fonctionnement d'accélération peut être choisi pour être du carburant associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant (par exemple, les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314) pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé. Ceci peut être obtenu par le carburant contenu dans la première source de carburant 302 étant associé à une production faible de nvPM comparativement au carburant contenu dans la seconde source de carburant 304 (dans des conditions de combustion correspondantes). Le carburant associé à une production plus faible de nvPM peut être fourni au moins aux injecteurs de carburant pilotes 313 dans un fonctionnement dans le mode d'accélération étant donné que cela aura l'effet le plus significatif sur la production de nvPM. De préférence, le carburant associé à une production plus faible de nvPM peut être fourni uniquement aux injecteurs de carburant pilotes pendant le mode d'accélération pour mieux utiliser une alimentation limitée de ce carburant.
- [0720] Dans certains exemples, la caractéristique de carburant par laquelle le carburant provenant de la première source de carburant 302 diffère du carburant de la seconde source de carburant 304 peut être le pourcentage de carburant d'aviation durable (SAF) présent dans le carburant respectif comme indiqué ci-dessus. Le carburant distribué aux injecteurs de carburant pendant le mode de fonctionnement d'accélération aurait de

même un pourcentage de SAF différent comparativement au carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 et/ou principaux 314 pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé. Comme indiqué ci-dessus, par rapport au kérosène fossile, le SAF donne sensiblement moins de nvPM, et peut donc être utilisé pour atténuer l'augmentation de nvPM qui autrement serait obtenue de la suralimentation de la chambre de combustion pendant le mode d'accélération. Par exemple, le carburant fourni aux injecteurs de carburant 313, 314 pendant le mode d'accélération peut avoir une plus grande proportion de SAF comparativement à celui fourni aux injecteurs de carburant pendant le mode à l'état stabilisé. Ceci permet d'utiliser sélectivement une quantité limitée disponible de SAF (ou d'un autre carburant à faible niveau de nvPM) pour réduire les émissions de nvPM, CO et HC globales.

[0721] Comme indiqué ci-dessus en liaison avec d'autres exemples, cela peut toutefois ne pas être toujours le cas. Dans certains exemples, le kérosène fossile peut être traité pour éliminer les composants aromatiques, en particulier les naphthalènes, afin de produire un carburant largement paraffinique d'origine fossile qui serait un carburant produisant de faibles niveaux de nvPM. D'autres caractéristiques de carburant peuvent donc être associées à un faible niveau de nvPM, telles que le pourcentage de la teneur en composés aromatiques ou de la teneur en naphthalène. Les premier et second carburants peuvent donc différer par des caractéristiques autres que la teneur en SAF tout en obtenant quand même l'effet recherché sur les émissions de nvPM.

[0722] Dans certains exemples, le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour distribuer du carburant ayant une caractéristique de carburant différente pendant un mode de fonctionnement d'accélération qui suit un mode de fonctionnement à l'état stabilisé dans lequel le système de chambre de combustion 64 fonctionne dans le mode à injection pilote seule. Dans certains exemples par conséquent, les caractéristiques du carburant ne sont modifiées que pour les accélérations du moteur qui commencent à partir d'un réglage de puissance moteur qui est en dessous du point d'étagement de l'état stabilisé. Étant donné que le réglage de puissance est inférieur au point d'étagement de l'état stabilisé, la chambre de combustion va fonctionner dans le mode à injection pilote seule, et l'accélération peut entraîner une augmentation des émissions de nvPM sans changement de la caractéristique du carburant fournie par les procédés de la présente demande. Dans d'autres exemples cependant, l'accélération peut être à partir de n'importe quel mode de fonctionnement à l'état stabilisé, qu'il s'agisse d'un fonctionnement dans des plages de fonctionnement à injection pilote seule ou à injection pilote et principale.

[0723] Le système de combustion étagée 64 peut être conçu pour basculer entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et les plages de fonctionnement à injection pilote et principale à une puissance moteur identique ou supérieure dans le mode

d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé. En d'autres termes, le système de combustion étagée 64 est commandé (par exemple par l'EEC) en utilisant un point d'étagement qui est à un réglage de puissance moteur identique ou supérieur dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé. Cela signifie que le point d'étagement n'est pas réduit à un réglage de puissance moteur inférieur pendant le mode d'accélération, évitant ou réduisant ainsi toute augmentation des émissions de HC ou de CO, ou nécessitant d'enrichir tous les injecteurs de carburant principaux pour toutes les puissances moteur. Plus particulièrement, dans certains exemples, le point d'étagement peut être le même à la fois dans le mode de fonctionnement d'accélération et celui à l'état stabilisé. Le point d'étagement utilisé dans le mode d'accélération peut être appelé « point d'étagement d'accélération », alors que le point d'étagement utilisé lors du fonctionnement à l'état stabilisé peut être appelé « point d'étagement de régime de croisière ». Dans cet exemple par conséquent, le point d'étagement d'accélération est à un réglage de puissance supérieur ou égal au point d'étagement de régime de croisière.

[0724] Dans d'autres exemples, le système de combustion étagée peut être conçu pour basculer entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et les plages de fonctionnement à injection pilote et principale à une puissance moteur inférieure dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé. Le système de combustion étagée 64 est commandé (par exemple par l'EEC) dans cet exemple en utilisant un point d'étagement qui est à un réglage de puissance moteur inférieur dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé. Dans cet exemple, le point d'étagement d'accélération est supérieur à un point d'étagement d'accélération par défaut selon lequel le système de combustion serait commandé si un carburant d'une caractéristique différente ne pouvait pas être fourni à la chambre de combustion. Le point d'étagement d'accélération est donc réduit (par rapport au point d'étagement de régime de croisière) d'une quantité inférieure à la réduction jusqu'au point d'étagement d'accélération par défaut qui se trouverait dans des systèmes connus.

[0725] Le régulateur de distribution de carburant 306 peut dans certains exemples être conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes 313 pendant un fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération qui a une caractéristique de carburant différente de celle du carburant distribué aux injecteurs de carburant principaux 314 pendant un fonctionnement à injection pilote et principale dans le mode de fonctionnement à l'état stabilisé du moteur. Dans cet exemple, le carburant d'une caractéristique différente (par exemple le carburant riche en SAF) est distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 lors d'un fonctionnement dans le mode à injection pilote seule lors de l'accélération du moteur. Le carburant qui est associé à un niveau élevé de nvPM (par exemple un carburant pauvre SAF) est ensuite fourni

aux injecteurs de carburant principaux 314 pendant un fonctionnement à l'état stabilisé à injection pilote et principale où l'émission de nvPM est intrinsèquement inférieure. Ceci permet d'utiliser plus efficacement une quantité limitée de carburant au sein de la première source de carburant (par exemple, le carburant riche en SAF) en l'utilisant sélectivement pendant l'accélération du moteur avec injection pilote seule. Dans cet exemple, le carburant d'une caractéristique de carburant différente est distribué aux injecteurs de carburant pilotes 313 dans seulement une partie du mode de fonctionnement d'accélération. Une fois que le point d'étagement est atteint dans le mode d'accélération, la distribution de carburant peut revenir à la même que celle utilisée pendant le fonctionnement à l'état stabilisé (par exemple elle peut revenir à l'utilisation d'un carburant pauvre en SAF). Dans d'autres exemples, le carburant riche en SAF (ou un carburant d'une autre caractéristique différente) peut être utilisé à toutes les puissances moteur dans le mode d'accélération (par exemple dans le fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale).

[0726] Dans un exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour distribuer du carburant pendant la plage de fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération ayant une caractéristique de carburant déterminée en fonction d'un rapport carburant-air dans la chambre de combustion 16. Dans cet exemple, à mesure que le rapport carburant-air diminue, la proportion de carburant associé à une production faible de nvPM distribué aux injecteurs de carburant pilotes peut également être diminuée. Étant donné que le rapport carburant-air réduit (par exemple parce que du fait que la vitesse du corps de moteur augmente le débit massique d'air à l'intérieur de la chambre de combustion augmente également) la quantité d'un carburant produisant peu de nvPM (par exemple, un carburant riche en SAF) peut également être réduite. Ceci permet d'utiliser le carburant produisant peu de nvPM au cours d'une partie du mode de fonctionnement d'accélération dans laquelle ses avantages sont plus importants, utilisant ainsi mieux une disponibilité limitée de ce carburant. Dans d'autres exemples, les caractéristiques de carburant peuvent être déterminées en fonction d'un autre paramètre de commande approprié qui est lié à la formation de nvPM de la chambre de combustion autre que le rapport carburant-air.

[0727] Dans d'autres exemples, le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour basculer la distribution de carburant aux injecteurs de carburant (les injecteurs de carburant principaux et/ou pilotes 313, 314) vers celui ayant une caractéristique de carburant différente à un point de départ d'une période de fonctionnement dans le mode d'accélération. Dans cet exemple par conséquent, la composition du carburant peut être basculée vers une autre composition (par exemple, basculée vers un carburant riche en SAF) au début d'une période d'accélération. Dans certains exemples, le régulateur de carburant 306 peut continuer à distribuer le même carburant tout au long du mode de

fonctionnement d'accélération. Dans d'autres exemples, le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour revenir à la distribution de carburant ayant la même caractéristique de carburant que celui distribué dans le mode à l'état stabilisé après une transition vers un fonctionnement à injection pilote et principale. La composition de carburant est donc rebasculée vers les caractéristiques de carburant à l'état stabilisé par défaut une fois que le point d'étagement est passé. Ceci peut également aider à restreindre l'utilisation de carburant associé à des émissions faibles de nvPM à une partie seulement du mode d'accélération, ce qui permet d'utiliser plus efficacement une alimentation limitée de ce carburant.

[0728] Afin de distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 pendant le mode d'accélération du système de combustion qui est différent de celui distribué à la chambre de combustion pendant le mode de fonctionnement à l'état stabilisé le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour distribuer du carburant sélectivement à partir des première et seconde sources de carburant 302, 304 comme décrit ci-dessus. Dans un exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 peut comprendre un mélangeur de carburant 318 tel qu'illustré à la [Fig.17]. De manière similaire à celle décrite ci-dessus, le mélangeur de carburant est conçu pour recevoir une alimentation en carburant à la fois à partir des première et seconde sources de carburant 302, 304 et pour sortir du carburant provenant de la première source de carburant 302, du carburant provenant de la seconde source de carburant 304, ou un mélange de ceux-ci. Ce carburant mélangé est fourni aux injecteurs de carburant pilotes 313, le carburant provenant d'une seule source de carburant (la seconde source de carburant 304 dans l'exemple ci-dessus) étant fourni aux injecteurs de carburant principaux 314. Dans d'autres exemples, le mélangeur peut être conçu pour alimenter à la fois les injecteurs de carburant principaux et pilotes 313, 314 avec un mélange de carburant approprié. Dans encore d'autres exemples, le régulateur de distribution de carburant 306 de l'un quelconque des exemples décrits ici peut être utilisé pour distribuer du carburant pendant au moins une partie du mode d'accélération (vers les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux) qui est différent de celui distribué pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé (par exemple, ceux utilisant des régulateurs indépendants pour les première et seconde sources de carburant ou un régulateur pilote conçu pour basculer entre des sources de carburant).

[0729] Comme indiqué ci-dessus en liaison avec l'exemple illustré à la [Fig.17], la dépendance de la proportion du carburant provenant de la première source de carburant 302 comparativement à celle provenant de la seconde source de carburant 304 par rapport au débit de carburant peut être déterminée en fonction d'un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier. Par exemple, la

proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant 302 comparativement à celle à partir de la seconde source de carburant 304 peut être déterminée selon un niveau obtenu souhaité de nvPM à un débit de carburant particulier pendant le mode d'accélération. La quantité de carburant fournie à partir de chaque source peut être déterminée de telle sorte que la valeur nvPM ne dépasse pas un seuil prédéterminé ou de telle sorte que la production de nvPM est réduite au minimum sur une période de fonctionnement du moteur à turbine à gaz comme décrit ci-dessus.

Dans l'un quelconque des exemples décrits ici ceci peut être obtenu par une commande appropriée du mélangeur 318, ou un quelconque des autres régulateurs de distribution de carburant 306 décrits ici.

- [0730] Dans certains exemples, la proportion de carburant distribuée à partir de la première source de carburant 302 comparativement à celle distribuée à partir de la seconde source de carburant 304 pendant le mode d'accélération du système de combustion peut être déterminée au moins partiellement selon un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0731] a) la quantité de carburant ayant la première caractéristique de carburant et la quantité de carburant ayant la seconde caractéristique de carburant disponible pour un vol proposé. Ceci peut par exemple, être fourni par une estimation ou une mesure de la quantité de carburant dans les réservoirs de carburant 53, 55 composant les première et seconde sources de carburant 302, 304 ;
- [0732] b) la quantité d'exigence totale de carburant pour les injecteurs de carburant pilotes 313 pendant le fonctionnement à injection pilote seule pour la totalité du vol dans une plage de fonctionnement dans laquelle du carburant est fourni à partir de la première source de carburant 302 ; et/ou
- [0733] c) un paramètre de limite de composition de carburant (par exemple une limite de certification, une composition de carburant disponible pour l'avitaillement, ou des limites d'aéronef/moteur).
- [0734] La [Fig.30] illustre un procédé 4030 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz selon l'exemple ci-dessus dans lequel du carburant d'une caractéristique différente est distribué aux injecteurs de carburant (par exemple les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314) pendant au moins une partie du mode d'accélération comparativement à pendant au moins une partie du mode à l'état stabilisé. Le procédé 4030 comprend la régulation 4032 de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314 à partir de la première source de carburant 302 contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et de la seconde source de carburant 304 contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, comme décrit ci-dessus en utilisant le régulateur de distribution de carburant 306 d'un quelconque exemple ici. La seconde caractéristique de

carburant est différente de la première comme décrit ci-dessus.

- [0735] Le procédé comprend en outre le fonctionnement 4034 du système de combustion étagée 64 dans un mode d'accélération dans lequel l'accélération du moteur à partir d'un mode de fonctionnement à l'état stabilisé est provoquée. Le procédé 4030 comprend en outre la distribution 4036 de carburant aux injecteurs de carburant (par exemple les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314), pendant au moins une partie d'un fonctionnement dans le mode d'accélération, ayant une caractéristique de carburant différente de celle du carburant distribué aux injecteurs de carburant (par exemple les injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux 313, 314) pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé du moteur.
- [0736] L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec les exemples dans lesquels un carburant différent est fourni dans le mode d'accélération comparativement à un mode de fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé peut être incorporée dans le procédé 4030 la [Fig.30], même si elles ne sont pas répétées ici.
- [0737] Détermination du point d'étagement sur la base des caractéristiques du carburant
- [0738] Dans d'autres exemples de la présente demande, le point d'étagement selon lequel le système de combustion étagée 64 est actionné peut être déterminé en fonction d'une détermination des caractéristiques du carburant avec lequel il est fourni. Les inventeurs ont déterminé que le point d'étagement peut être basé sur les caractéristiques du carburant pour utiliser avantageusement le carburant particulier étant fourni au moteur 10.
- [0739] Dans certains exemples, l'aéronef illustré à la [Fig.4] peut être conçu pour n'avoir qu'une seule source de carburant. Dans un tel exemple, les réservoirs 53, 55 de carburant peuvent être raccordés fluidiquement pour former une seule source de carburant à bord de l'aéronef. L'aéronef peut donc porter du carburant ayant les mêmes caractéristiques de carburant, plutôt que des carburants ayant des caractéristiques différentes.
- [0740] La [Fig.31] illustre un exemple d'un système de combustion étagée 64 présentant des caractéristiques correspondant à celles de la [Fig.5], mais qui est alimenté en carburant à partir d'une seule source à bord de l'aéronef 1. Dans cet exemple, le carburant est reçu par le régulateur de distribution de carburant 306 par l'intermédiaire d'une pompe à carburant 308, à partir d'une seule source de carburant, par exemple des réservoirs de carburant 53, 55 représentés à la [Fig.4]. Les caractéristiques communes avec l'exemple de la [Fig.5] sont marquées en ce sens, et ne seront donc pas décrites à nouveau.
- [0741] Dans l'exemple illustré à la [Fig.31], le moteur à turbine à gaz 10 comprend en outre un module de détermination de caractéristique de carburant 330. Le module de détermination de caractéristique de carburant 330 est configuré pour déterminer une ou

plusieurs caractéristiques du carburant en cours de distribution dans le régulateur de distribution de carburant 306. Dans l'exemple décrit, le module de détermination de caractéristiques de carburant 330 est en communication avec un dispositif capteur 332, qui est configuré pour effectuer une mesure sur le carburant circulant vers le régulateur de distribution de carburant 306 afin de déterminer les caractéristiques du carburant. Le dispositif capteur 332 peut prendre un certain nombre de formes différentes, et peut fonctionner selon l'un quelconque des exemples de la détermination des caractéristiques du carburant décrits ici. Dans d'autres exemples, le module de détermination de caractéristiques de carburant 330 peut recevoir des signaux provenant d'un dispositif capteur situé ailleurs à bord de l'aéronef qui est configuré pour effectuer une mesure de caractéristiques du carburant. Dans encore d'autres exemples, le module de détermination de caractéristiques de carburant 330 peut obtenir des caractéristiques de carburant à partir de sources autres qu'un dispositif capteur tel que décrit ailleurs ici, par exemple les caractéristiques de carburant peuvent être reçues par l'intermédiaire d'un canal de communication de données, ou d'une entrée utilisateur.

[0742] L'EEC 42 (qui peut être appelé plus généralement « dispositif de commande ») est en communication avec le module de détermination de caractéristiques de carburant 330 de telle sorte qu'il peut recevoir les caractéristiques de carburant du carburant en cours de distribution dans le régulateur de distribution de carburant 306. Dans le présent exemple, le module de détermination de caractéristiques de carburant 330 est représenté séparément de l'EEC, mais dans d'autres exemples ils peuvent être combinés. Le dispositif de commande 42 est configuré pour déterminer le point d'étagement auquel le système de combustion étagée est basculé entre son fonctionnement à injection pilote seule et un fonctionnement à injection pilote et principale. Le point d'étagement est déterminé en fonction de la ou des caractéristiques de carburant. Une fois que le point d'étagement est déterminé de cette façon il est utilisé par le dispositif de commande 42 pour commander le fonctionnement du système de combustion étagée 64, par exemple il est utilisé pour commander le fonctionnement du régulateur de distribution de carburant de sorte qu'un flux de carburant approprié est fourni au collecteur pilote 309, ou au collecteur pilote 309 et au collecteur principal 310 pour un fonctionnement dans les modes à injection pilote seule et à injection pilote et principale respectivement.

[0743] Les inventeurs ont déterminé que le système de combustion étagée 64 peut être avantageusement commandé sur la base des caractéristiques du carburant qu'il est en cours d'alimentation. En particulier, le point d'étagement peut être choisi pour utiliser avantageusement les caractéristiques du carburant en cours de distribution dans le moteur.

[0744] Dans un exemple, le point d'étagement est déterminé en fonction de la ou des caractéristiques de carburant indiquant que le carburant est associé à un niveau faible de

production de nvPM (par exemple, faible comparativement au kérosène fossile, dans des conditions de combustion correspondantes). Ceci peut permettre au point d'étagement d'être ajusté de sorte qu'il corresponde à une condition de fonctionnement du moteur qui autrement conduirait à des niveaux élevés de production de nvPM. Par exemple, comme illustré aux Figures 23 et 25, si un carburant produisant peu de nvPM est déterminé comme étant en cours de distribution dans la chambre de combustion le point d'étagement peut être ajusté pour réduire la production de CO et de HC, sans entraîner une augmentation désavantageuse de la production de nvPM qui autrement se produirait si un carburant produisant un niveau relativement élevé de nvPM avait été utilisé.

- [0745] Dans certains exemples, la caractéristique de carburant sur laquelle la détermination du point d'étagement est basée peut être le pourcentage de carburant d'aviation durable (SAF) présent dans le carburant respectif. Comme indiqué ci-dessus, par rapport au kérosène fossile, le SAF donne sensiblement moins de nvPM, et peut donc être utilisé pour atténuer des changements du point d'étagement qui autrement augmenteraient la production de nvPM.
- [0746] Dans certains exemples, le kérosène fossile peut être traité pour éliminer les composants aromatiques, en particulier les naphtalènes, afin de produire un carburant largement paraffinique d'origine fossile qui serait un carburant produisant de faibles niveaux de nvPM. D'autres caractéristiques de carburant peuvent donc être associées à un faible niveau de nvPM, telles que le pourcentage de la teneur en composés aromatiques ou de la teneur en naphtalène. Dans d'autres exemples, la ou les caractéristiques de carburant d'après lesquelles le point d'étagement est déterminé peuvent inclure une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant, et/ou une teneur en naphtalène du carburant. Ces caractéristiques peuvent également indiquer le niveau de nvPM qui sera produit par le carburant, et permettre de déterminer le point d'étagement en ce sens.
- [0747] Le dispositif de commande 42 peut être configuré pour déterminer le point d'étagement de telle sorte que le point d'étagement associé au carburant qui est un carburant produisant peu de nvPM corresponde à un réglage de puissance moteur plus élevé comparativement au point d'étagement associé à une ou plusieurs caractéristiques de carburant qui indiquent que le carburant est associé à une production de nvPM relativement plus élevée. En d'autres termes, le point d'étagement peut être augmenté à une puissance moteur plus élevée pour un carburant qui est associé à une production de nvPM inférieure comparativement à un carburant associé à une production de nvPM plus élevée. La puissance moteur à laquelle se produit le point d'étagement peut donc être augmentée avec la diminution de la production de nvPM du carburant. Comme indiqué ci-dessus en liaison avec les Figures 23 et 25, cette augmentation du point

d'étagement peut aider à réduire la production de CO et de HC, sans augmentation significative des nvPM. Le carburant produisant peu de nvPM peut être un carburant qui produit une émission de nvPM inférieure comparativement au kérosène fossile dans des conditions de combustion correspondantes. Le carburant à faible niveau de nvPM peut être un carburant riche en SAF, qui a au moins une teneur en SAF, et de préférence une teneur en SAF supérieure à 10 %, ou plus préférentiellement égale ou supérieure à 50 %.

[0748] Dans certains exemples, le point d'étagement déterminé en fonction des caractéristiques de carburant peut être un point d'étagement de régime de croisière avec lequel le système de combustion 64 est commandé pendant un fonctionnement en régime de croisière à l'état stabilisé du moteur. Le dispositif de commande 42 peut être configuré pour déterminer le point d'étagement de sorte qu'il corresponde à un réglage de puissance moteur qui entraîne un basculement entre le fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale pendant le régime de croisière à l'état stabilisé. Le point d'étagement déterminé par le dispositif de commande 42 en fonction des caractéristiques de carburant peut donc créer une limite entre une première plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur et une seconde plage de fonctionnement en régime de croisière de moteur. Le point d'étagement peut être sélectionné pour définir ces deux points de fonctionnement en régime de croisière s'il est établi qu'un carburant à niveau de nvPM relativement faible est utilisé (par exemple, un carburant à teneur élevée en SAF et/ou à faible teneur en composés aromatiques et/ou naphthalène). Ceci peut permettre un fonctionnement à injection pilote seule en régime de croisière pour utiliser avantageusement sa faible production de HO et de CO, tout en évitant l'augmentation de nvPM qui aurait autrement lieu si un carburant à niveau élevé de nvPM était fourni par le moteur (voir figures 27 et 28, et la description associée ci-dessus).

[0749] La première plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie ultérieure d'un segment de croisière d'un vol, et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement de l'aéronef dans une partie relativement antérieure du segment de croisière. Comme indiqué ci-dessus, ceci peut permettre au système de combustion étagée 64 de basculer sur le fonctionnement à injection pilote seule pendant une partie ultérieure d'un segment de croisière (par exemple un segment de croisière à une altitude constante). Dans un autre exemple, la première plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé du moteur et la seconde plage de fonctionnement en régime de croisière peut correspondre à un fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé du moteur. Dans ces deux exemples, le point d'étagement

est sélectionné de sorte que le fonctionnement à injection pilote seule se produit à un fonctionnement en régime de croisière à puissance moteur faible, par exemple soit dans une partie ultérieure d'un segment de croisière, soit pendant le régime de croisière subsonique. Le fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé peut se produire avant le fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé, ou inversement. Dans certains exemples, le fonctionnement en régime de croisière subsonique à l'état stabilisé peut être un fonctionnement en régime de croisière subsonique au-dessus des terres, tandis que le fonctionnement en régime de croisière supersonique à l'état stabilisé peut être un fonctionnement en régime de croisière supersonique au-dessus de l'eau.

- [0750] Selon un autre exemple, le point d'étagement déterminé selon les caractéristiques de carburant peut être un point d'étagement d'accélération moteur selon lequel le système de combustion étagée est commandé lors d'une condition d'accélération du moteur. Dans un tel exemple, le dispositif de commande peut être configuré pour sélectionner le point d'étagement d'accélération de moteur de sorte qu'il est le même que celui utilisé en régime de croisière. En effet, ceci est réalisable s'il a été établi qu'un carburant à niveau faible de nvPM est en cours d'utilisation (par exemple, un carburant à teneur élevée en SAF et/ou teneur faible en composés aromatiques et/ou teneur faible en naphthalène). Comme indiqué ci-dessus, cela peut permettre à une accélération de se produire (au moins en partie) tout en restant dans le mode à injection pilote seule malgré l'augmentation du débit de carburant pour fournir l'accélération. Ceci peut aider à éviter une augmentation de la production de HC et de CO qui autrement se produirait en augmentant le point d'étagement pendant l'accélération du moteur.
- [0751] Dans certains exemples, le dispositif de commande 42 peut être conçu pour déterminer le point d'étagement en régime de croisière et/ou d'accélération, et peut être conçu pour déterminer des points d'étagement à la fois pour un fonctionnement supersonique/subsonique et pour des parties antérieures/ultérieures d'un segment de croisière.
- [0752] La [Fig.32] illustre un procédé 4038 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz pour un aéronef. Le procédé peut être mis en œuvre par l'appareil de la [Fig.31]. Le procédé 4038 comprend la détermination 4040 d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant d'un carburant en cours de distribution dans le système de combustion ; la détermination 4042 d'un point d'étagement définissant le point auquel le système de combustion étagée est basculé entre le fonctionnement à injection pilote seule et le fonctionnement à injection pilote et principale en fonction de la ou des caractéristiques de carburant déterminées ; et la commande 4044 du système de combustion étagée selon le point d'étagement déterminé.
- [0753] La ou les caractéristiques de carburant peuvent indiquer que le carburant est associé à

un niveau de production de nvPM faible comparativement à du kérosène fossile comme indiqué ci-dessus. La ou les caractéristiques de carburant incluent l'un quelconque ou plusieurs parmi : (i) un pourcentage de carburant d'aviation durable dans le carburant ; (ii) une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant ; et/ou (iii) une teneur en naphthalène du carburant. D'autres caractéristiques de carburant peuvent être utilisées.

- [0754] La détermination 4042 du point d'étagement peut comprendre la détermination 4046 du point d'étagement de telle sorte qu'un point d'étagement associé à une ou plusieurs caractéristiques de carburant qui indiquent que le carburant est associé à une production de nvPM faible correspond à un réglage de puissance moteur plus élevé par rapport au point d'étagement associé à une ou plusieurs caractéristiques de carburant qui indiquent que le carburant est associé à une production de nvPM relativement plus élevée.
- [0755] Le point d'étagement déterminé 4042 par le procédé de la [Fig.32] peut être un point d'étagement de régime de croisière, et peut être utilisé pendant une partie ultérieure d'un segment de croisière d'un vol, ou pendant un fonctionnement en régime de croisière subsonique d'un aéronef à capacité supersonique comme indiqué dans les divers exemples ci-dessus.
- [0756] L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec les exemples dans lesquels le point d'étagement est déterminé selon une ou plusieurs caractéristiques de carburant peut être incorporée dans le procédé 4038 de la [Fig.32].
- [0757] Dans les exemples ci-dessus, le point d'étagement est déterminé selon les caractéristiques de production de nvPM du carburant. Ce n'est cependant qu'un exemple, et d'autres caractéristiques de carburant peuvent être prises en compte afin de déterminer un point d'étagement adéquat afin de profiter des caractéristiques du carburant en cours de distribution dans la chambre de combustion.
- [0758] Détermination du rapport d'étagement sur la base des caractéristiques du carburant
- [0759] Dans d'autres exemples, le dispositif de commande 42 illustré à la [Fig.31] est en outre, ou en variante, conçu pour déterminer un rapport d'étagement selon la ou les caractéristiques de carburant. Comme indiqué ailleurs ici, le dispositif de commande 42 est configuré pour commander le régulateur de distribution de carburant 306 (et donc le système de combustion étagée 64) selon un rapport d'étagement. Le rapport d'étagement définit le rapport entre le flux de carburant de l'injecteur de carburant pilote 313 et le flux de carburant de l'injecteur de carburant principal 314. Les inventeurs ont déterminé que le ratio d'étagement peut être choisi pour exploiter avantageusement certaines caractéristiques de carburant du carburant qui est fourni au régulateur de distribution de carburant en choisissant intelligemment le rapport sur la base des caractéristiques de carburant.

- [0760] Par exemple, le rapport d'étagement peut être déterminé en fonction de la ou des caractéristiques de carburant indiquant que le carburant est associé à un niveau faible de production de nvPM (par exemple, faible comparativement au kérosène fossile, dans des conditions de combustion correspondantes). Ceci peut permettre au rapport d'étagement d'être ajusté pour réduire la production de CO et de HC d'une manière qui autrement conduirait à des niveaux élevés de production de nvPM comme indiqué dans divers exemples ci-dessus.
- [0761] Dans certains exemples, la ou les caractéristiques de carburant sur lesquelles se base la détermination du rapport d'étagement peuvent être le pourcentage de carburant d'aviation durable (SAF) présent dans le carburant respectif. Comme indiqué ci-dessus, par rapport au kérosène fossile, le SAF donne sensiblement moins de nvPM, et peut donc être utilisé pour atténuer des changements du rapport d'étagement qui autrement augmenteraient la production de nvPM.
- [0762] Dans certains exemples, le kérosène fossile peut être traité pour éliminer les composants aromatiques, en particulier les naphtalènes, afin de produire un carburant largement paraffinique d'origine fossile qui serait un carburant produisant de faibles niveaux de nvPM. D'autres caractéristiques de carburant peuvent donc être associées à un faible niveau de nvPM, telles que le pourcentage de la teneur en composés aromatiques ou de la teneur en naphtalène. Dans d'autres exemples, la ou les caractéristiques de carburant d'après lesquelles le rapport d'étagement est déterminé peuvent inclure une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant, et/ou une teneur en naphtalène du carburant. Ces caractéristiques peuvent également indiquer le niveau de nvPM qui sera produit par le carburant, et permettre de déterminer le rapport d'étagement en ce sens.
- [0763] Le dispositif de commande 42 peut être configuré pour déterminer un rapport d'étagement de transition qui permet au système de combustion étagée 64 d'être actionné dans une plage de fonctionnement de transition entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale comme indiqué ci-dessus en liaison avec les Figures 27 et 28. Le rapport d'étagement de transition peut être déterminé selon la ou les caractéristiques de carburant indiquant que le carburant en cours de distribution dans le régulateur de distribution de carburant 306 est associé à un niveau de production de nvPM faible (par exemple selon la teneur en SAF, la teneur en composés aromatiques ou la teneur en naphtalène ; une production faible de nvPM étant relativement moins importante que pour le carburant kérosène fossile). Le rapport d'étagement de transition peut être différent d'un rapport d'étagement d'injection pilote et principale selon lequel le dispositif de commande 42 commande le système de combustion étagée lors d'un fonctionnement à injection pilote et principale. Le rapport d'étagement d'injection pilote et

principale peut être un rapport par défaut, et peut être déterminé selon des techniques connues.

- [0764] Comme indiqué ci-dessus en liaison avec les Figures 27 et 28, en configurant le système de combustion étagée 64 pour fonctionner dans la plage de transition entre le fonctionnement à injection pilote seule et le fonctionnement à injection pilote et principale la quantité d'émission de CO et de HC mise en œuvre dans cette plage de réglages de puissance moteur peut être réduite. En détectant que la chambre de combustion est alimentée avec un carburant associé à une production faible de nvPM, le dispositif de commande peut déterminer que le rapport d'étagement de transition peut être utilisé pour réduire les émissions de CO et de HC, sans entraîner une augmentation excessive de la production de nvPM.
- [0765] L'une quelconque des caractéristiques du rapport d'étagement de transition décrites ci-dessus peut être incorporée dans les exemples décrits ici dans lesquels le rapport d'étagement de transition est sélectionné en fonction de la ou des caractéristiques de carburant. Par exemple, pendant la phase de transition le rapport d'étagement de transition peut varier avec un réglage de puissance moteur changeante. Dans un exemple, le rapport d'étagement de transition présente une variation continue avec une puissance moteur changeante à l'intérieur de la plage de fonctionnement de transition. Ceci peut assurer une transition douce entre le rapport d'étagement dans la plage de fonctionnement à injection pilote seule et celle à injection pilote et principale. La variation continue peut être telle que la proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant (c'est-à-dire le total étant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et principaux) que l'on peut attribuer au flux de carburant vers les injecteurs de carburant pilotes 313 diminue avec l'augmentation de la puissance du moteur pendant la plage de fonctionnement de transition. La proportion du flux total de carburant vers les injecteurs de carburant que l'on peut attribuer à un flux de carburant vers les injecteurs de carburant principaux 314 augmente au contraire avec l'augmentation de la puissance du moteur dans la plage de fonctionnement de transition.
- [0766] Dans d'autres exemples, le rapport d'étagement de transition a une valeur intermédiaire constante qui est différente du rapport d'étagement d'injection pilote et principale. Le rapport d'étagement de transition peut être compris entre le rapport d'injection pilote seule et le rapport d'injection pilote et principale. Ceci permet donc une transition plus progressive entre le rapport d'injection pilote seule et le rapport d'injection pilote et principale. Par exemple, le rapport d'étagement de transition peut être de 70:30, ce qui est compris entre 100:0 dans la plage d'injection pilote seule, et un rapport d'étagement d'injection pilote et principale qui peut être de 20:80 ou 30:70.
- [0767] Dans encore d'autres exemples, le rapport d'étagement de transition varie entre une série de valeurs intermédiaires constantes, chacune étant différente du rapport

d'étagement d'injection pilote et principale. Par ailleurs, chacun des rapports intermédiaires peut être compris entre celui de la plage d'injection pilote seule et celui de la plage d'injection pilote et principale. Par exemple, le rapport d'étagement de transition peut varier entre une série de valeurs de 80:20, 60:40 et 40:60. Le rapport d'injection pilote et principale peut être de 20:80 dans cet exemple. Les rapports d'étagement intermédiaires peuvent ainsi diminuer vers le rapport d'injection pilote et principale (c'est-à-dire qu'une proportion progressivement plus petite du carburant total est fournie aux injecteurs de carburant pilotes 313, et une proportion progressivement plus grande du carburant total est fournie aux injecteurs de carburant principaux 314). Ceci n'est cependant qu'un exemple, et un quelconque autre nombre et des quelconques autres valeurs de rapports d'étagement de transition intermédiaires peuvent être utilisés.

- [0768] Dans certains exemples, le rapport d'étagement de transition peut avoir une variation continue avec la puissance du moteur dans une partie de la plage de fonctionnement de transition et peut avoir une ou plusieurs valeurs constantes dans une autre partie de la plage de fonctionnement de transition. Les exemples ci-dessus peuvent donc être combinés. Dans d'autres exemples, le rapport d'étagement peut avoir une variation avec la puissance moteur sur la totalité de la plage de fonctionnement de transition, ou peut avoir une ou plusieurs valeurs constantes avec la puissance moteur sur la totalité de la plage de fonctionnement de transition.
- [0769] La [Fig.33] illustre un exemple d'un procédé 4050 de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz. Le procédé 4050 comprend : la détermination 4052 d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant d'un carburant en cours de distribution dans le système de combustion étagée 64 ; la détermination 4054 d'un rapport d'étagement définissant le rapport entre le flux de carburant de l'injecteur de carburant pilote et le flux de carburant de l'injecteur de carburant principal ; et la commande 4056 du système de combustion étagée 64 selon le rapport d'étagement déterminé. Le procédé 4050 peut être réalisé par l'appareil représenté à la [Fig.31] (en plus du procédé 4038, ou en variante de celui-ci, dans lequel un point d'étagement est déterminé).
- [0770] La ou les caractéristiques de carburant peuvent indiquer que le carburant est associé à un niveau de production de nvPM faible comparativement à du kérosène fossile comme indiqué ci-dessus. La ou les caractéristiques de carburant incluent l'un quelconque ou plusieurs parmi : (i) un pourcentage de carburant d'aviation durable dans le carburant ; (ii) une teneur en hydrocarbures aromatiques du carburant ; et/ou (iii) une teneur en naphtalène du carburant. D'autres caractéristiques de carburant peuvent être utilisées.
- [0771] La commande 4056 du système de combustion étagée 64 peut comprendre la commande 4058 du système de combustion étagée 64 pendant la plage de fonctionnement à injection pilote et principale selon un rapport d'étagement d'injection

pilote et principale comme indiqué ci-dessus. La détermination 4054 du rapport d'étagement peut comprendre la détermination 4060 d'un rapport d'étagement de transition. La commande 4056 du système de combustion étagée 64 peut ensuite comprendre la commande 4062 de celui-ci de sorte qu'il est actionné dans une plage de fonctionnement de transition entre la plage de fonctionnement à injection pilote seule et la plage de fonctionnement à injection pilote et principale comme indiqué ci-dessus. Le rapport d'étagement de transition peut être déterminé selon l'un quelconque des exemples donnés ci-dessus.

[0772] L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec les exemples dans lesquels le rapport d'étagement est déterminé selon une ou plusieurs caractéristiques de carburant peut être incorporée dans le procédé 4050 de la [Fig.33].

[0773] Dans les exemples ci-dessus, le rapport d'étagement est déterminé selon les caractéristiques de production de nvPM du carburant. Ce n'est cependant qu'un exemple, et d'autres caractéristiques de carburant peuvent être prises en compte afin de déterminer un point d'étagement adéquat afin de profiter des caractéristiques du carburant en cours de distribution dans la chambre de combustion.

[0774] Conditions de fonctionnement anormal

[0775] La régulation de la distribution de carburant selon l'un quelconque des exemples décrits ici est comprise pour être appropriée pour un fonctionnement dans des conditions d'exploitation normales du moteur à turbine à gaz 10 ou de l'aéronef 1. Pendant les conditions de fonctionnement anormales la distribution de carburant à la chambre de combustion 16 telle que décrite ici (par exemple pour réguler le niveau de nvPM) peut être outrepassée. La régulation de la distribution de carburant décrite ici est donc applicable pendant au moins une partie du fonctionnement du moteur à turbine à gaz associé, par exemple lorsque la disponibilité du carburant ne l'empêche pas, soit en raison de limites de capacité des réservoirs, soit dans des conditions de fonctionnement anormales inattendues.

[0776] Par exemple, en fonctionnement anormal, notamment après une défaillance d'un moteur, une exigence de transférer du carburant d'un réservoir d'aile vers un autre réservoir d'aile (afin de maintenir une position latérale du centre de masse d'aéronef acceptable) peut outrepasser la régulation de la distribution de carburant selon la présente demande, en particulier dans les cas nécessitant un transfert de carburant de la première source de carburant 302 à la seconde source de carburant 304 ou inversement. Cependant, si les deux réservoirs de carburant d'aile font partie de la même source de carburant (c'est-à-dire si les deux font partie de la première source de carburant 302 ou les deux font partie de la seconde source de carburant 304) et qu'ils sont interconnectés fluidiquement soit directement, soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs réservoirs de carburant supplémentaires qui font également partie de la même source de carburant

(respectivement la première ou la seconde source de carburant) alors la régulation de carburant décrite ici peut continuer à fonctionner malgré de telles conditions anormales.

[0777] Lorsque le régulateur de distribution de carburant 306 est conçu pour basculer entre des sources ou mélanger du carburant à partir des première et seconde sources de carburant 302, 304, le basculement ou le mélange peut être outrepassé si l'une des sources de carburant est épuisée en raison d'une fuite ou d'autres raisons inattendues de carburant (par exemple, un chargement incorrect de carburant). Dans certains ou tous les exemples, en particulier celui illustré à la [Fig.9], on peut prévoir une dérivation de carburant dans laquelle du carburant peut être distribué entre les première et seconde sources de carburant en cas de condition de fonctionnement anormale. Par exemple, dans l'exemple de la [Fig.9] une dérivation de carburant peut être disposée en amont du régulateur de distribution de carburant 306, ou entre des réservoirs de carburant des première et seconde sources de carburant 302, 304, ce qui assure une interconnexion d'urgence entre les première et seconde sources de carburant. Le régulateur pilote 306a et le régulateur principal 306b sont donc capables d'être alimentés en carburant provenant de l'une ou l'autre des première et seconde sources de carburant 302, 304 en cas de défaillance de l'une des sources de carburant pendant le fonctionnement.

[0778] La régulation de l'alimentation en carburant peut en outre être outrepassée pendant une partie d'une mission de l'aéronef si des quantités insuffisantes des premier et second carburants peuvent être contenues dans les réservoirs de carburant d'aéronef. Pour certaines missions, l'exigence totale de chargement de carburant proposée pour un vol peut dicter la quantité minimale avec laquelle chaque réservoir de carburant doit être rempli, et cela peut outrepasser certains autres moyens de commande de distribution de carburant dans les divers exemples décrits ici.

[0779] Calcul d'attribution de carburant

[0780] La présente demande concerne en outre un procédé de détermination d'une attribution de carburant pour un aéronef. Le procédé permet de déterminer une attribution de carburant selon laquelle le carburant est chargé sur l'aéronef 1 pour réaliser un vol proposé ou une mission proposée. L'aéronef pour lequel le procédé est utilisé peut être celui illustré à la [Fig.4], qui comprend une première source de carburant 302 conçue pour contenir un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et une seconde source de carburant 304 conçue pour contenir un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première. Comme indiqué ci-dessus, l'aéronef 1 comprend un ou plusieurs moteurs à turbine à gaz 10 alimentés par du carburant provenant des première et seconde sources de carburant 302, 304. Les moteurs à turbine à gaz 10 comprennent chacun un régulateur de distribution de carburant 306

conçu pour fournir du carburant à partir de chaque source de carburant, ou un mélange de ceux-ci, et un système de combustion étagée 64, comme illustré à la [Fig.5], ou comme décrit ailleurs dans la présente invention.

[0781] Un procédé 4070 de détermination d'une attribution de carburant est illustré à la [Fig.34]. Le procédé 4070 comprend l'obtention 4072 d'une description de mission proposée comprenant une liste de points de fonctionnement pour le ou les moteurs à turbine à gaz 10 de l'aéronef 1 lors d'une mission de fonctionnement. La liste des points de fonctionnement comporte des informations sur le fonctionnement des moteurs à turbine à gaz 10 de l'aéronef 1 qui sont attendues pour une période de fonctionnement prévue particulière pour laquelle le carburant doit être chargé sur l'aéronef. La liste des points de fonctionnement peut inclure une série d'informations à partir desquelles l'impact attendu des nvPM du moteur à turbine à gaz pendant chaque partie de la mission de fonctionnement peut être déterminé pour des carburants de caractéristiques différentes utilisés. Les points de fonctionnement de la description de mission peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi : une ou plusieurs conditions dans lesquelles les moteurs à turbine à gaz 10 doivent fonctionner (par exemple, des conditions de localisation et/ou d'air ambiant attendues pour la mission spécifique), une ou plusieurs valeurs de débit de carburant correspondant à un point de fonctionnement, et une durée de fonctionnement en un point de fonctionnement correspondant. Les points de fonctionnement peuvent donc indiquer que la mission comprend, par exemple, une période de fonctionnement des moteurs dans une condition de fonctionnement en régime de croisière, dans certaines conditions ambiantes, et dans laquelle un débit de carburant spécifié est requis. Toute autre information adaptée peut être prévue dans la liste de points de fonctionnement de sorte que la production de nvPM pour les différentes parties du vol peut être trouvée pour des caractéristiques de carburant données. La description de mission peut inclure des détails du fonctionnement de l'aéronef au sol afin d'accomplir la mission de fonctionnement.

[0782] Le procédé 4070 comprend en outre l'obtention 4074 de paramètres d'impact des nvPM pour les moteurs à turbine à gaz 10 en fonction de la description de mission obtenue. Les paramètres d'impact sont associés à chacun des points de fonctionnement de la mission proposée, et peuvent définir une quantité de nvPM produite par le moteur à turbine à gaz 10 pour différentes compositions de carburant respectives comprenant le premier carburant, le second carburant, ou un mélange de ceux-ci à chaque condition de fonctionnement de la description de mission.

[0783] La quantité de nvPM produite par le moteur peut être déterminée à l'aide d'une table de consultation du nombre de nvPM en fonction de W_F pour toutes les conditions de fonctionnement (par exemple en tenant compte des positions différentes du point

d'étagement à différents points de fonctionnement de la mission), pour des caractéristiques de carburant différentes. La variation des caractéristiques de carburant peut, dans certains exemples, être paramétrée par pourcentage de la teneur en SAF. La table de consultation utilisée pour déterminer la production de nvPM peut être choisie dans un ensemble de tables de consultation correspondant à différents types de SAF (HEFA, ATJ, etc.). Lorsque la production de nvPM est similaire pour différents carburants la même table de conversion peut être utilisée pour chacun.

- [0784] Les paramètres d'impact peuvent être les paramètres d'impact des nvPM décrits ailleurs ici et peuvent concerner le coût ou le préjudice de l'émission de nvPM (par exemple, de la suie) d'un type particulier ou dans une certaine situation (en plus ou en variante pour indiquer simplement une quantité de nvPM produite). Les paramètres d'impact des nvPM peuvent donc inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0785] i) la hauteur au-dessus du niveau du sol à laquelle se déroule la production de nvPM ;
 - [0786] ii) la position (par exemple l'emplacement c'est-à-dire la longitude et la latitude) de la production de nvPM ;
 - [0787] iii) les conditions météorologiques/atmosphériques à un emplacement de la production de nvPM ;
 - [0788] iv) les impacts climatiques associés à l'emplacement de la production de nvPM ;
 - [0789] v) la masse/taille des particules de nvPM individuelles produites ;
 - [0790] vi) la production potentielle de traînées de condensation et/ou les caractéristiques des traînées de condensation ;
 - [0791] vii) l'impact de la qualité de l'air locale (LAQ) de la production de nvPM ; et/ou
 - [0792] viii) la quantité de nvPM produite (par exemple masse/nombre)
- [0793] Le procédé 4070 comprend en outre le calcul 4076 d'un ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant pour chaque point de fonctionnement de la mission proposée définie dans la description de mission en fonction des paramètres d'impact des nvPM. Dans cette étape, le procédé calcule les caractéristiques de carburant pour chaque partie de la mission proposée qui donnent un ensemble optimal de paramètres d'impact des nvPM. Le calcul de l'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant comprend la réduction au minimum d'une fonction de coût dépendant du ou des paramètres d'impact des nvPM. Dans certains exemples, la fonction de coût peut ne prendre en compte que la quantité de nvPM produite pendant chaque partie de la mission de telle sorte qu'elle peut être réduite au minimum. Dans d'autres exemples, des fonctions de coût plus complexes peuvent être définies comme décrit ailleurs dans la description pour prendre en compte d'autres facteurs relatifs à l'impact de la production des nvPM (par exemple en utilisant les autres paramètres d'impact définis ci-dessus).
- [0794] Une fois que l'ensemble optimisé de caractéristiques de carburant a été calculé, le

procédé 4070 comprend la détermination 4078 d'une attribution de carburant basée sur l'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant. L'attribution de carburant définit de quelle façon le carburant est attribué à la mission et par conséquent de quelle façon le carburant doit être chargé sur l'aéronef pour répondre aux besoins des caractéristiques optimisées du carburant sur la durée de la mission. L'attribution de carburant peut inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :

- [0795] i) une quantité de carburant (par exemple le volume ou la masse) attribuée à chacune des première et seconde sources de carburant. Ceci peut permettre de charger la quantité de carburant nécessaire lors d'un processus de ravitaillement dans lequel l'aéronef est raccordé à une source de carburant telle qu'un véhicule d'avitaillement ou une conduite d'alimentation en carburant ;
- [0796] ii) la première caractéristique de carburant et/ou la seconde caractéristique de carburant ; et/ou
- [0797] iii) un rapport de mélange de carburant (par exemple un rapport d'un carburant par défaut ou non par défaut).
- [0798] Une fois la quantité et les caractéristiques du carburant spécifiées, le carburant requis peut être chargé à partir des différents types de carburant qui peuvent être disponibles. Dans certains exemples, le carburant peut être mélangé à partir de carburants différents disponibles avant d'être chargé, par exemple, mélangé à partir d'un carburant par défaut et non par défaut tel que décrit plus loin.
- [0799] Le procédé 4070 peut en outre comprendre la détermination d'un ou plusieurs paramètres d'utilisation de carburant correspondant à l'attribution de carburant, les paramètres d'utilisation de carburant définissant de quelle façon le carburant doit être utilisé pendant la mission définie par la description de mission. Les paramètres d'utilisation du carburant peuvent définir de quelle façon les caractéristiques optimisées de carburant requises pour chaque partie de la mission doivent être fournies à la chambre de combustion 16 du moteur respectif. Les paramètres d'utilisation de carburant peuvent être combinés pour former une « utilisation de carburant de mission » qui définit de quelle façon le carburant est utilisé sur la durée de la mission. Les paramètres d'utilisation de carburant peuvent être fournis à l'aéronef 1 de sorte que le moteur à turbine à gaz 10 (par exemple le régulateur de distribution de carburant 306) peut être commandé en ce sens, ou les réservoirs de carburant 53, 55 configurés selon le besoin. Le ou les paramètres d'utilisation de carburant peuvent inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0800] i) une planification de mélange selon laquelle du carburant provenant de la première source de carburant 302 et de la seconde source de carburant 304 est mélangé par le régulateur de distribution de carburant 306 (par exemple en utilisant le mélangeur de carburant 318 décrit ci-dessus) ;

- [0801] ii) une planification de basculement selon laquelle le régulateur de distribution de carburant 306 est configuré pour basculer entre une distribution de carburant à partir de la première source de carburant 302 et de la seconde source de carburant 304 ;
- [0802] iii) un rapport de mélange de carburant embarqué selon lequel le régulateur de distribution de carburant 306 est configuré pour mélanger du carburant à partir des sources à bord de l'aéronef ;
- [0803] iv) une attribution de réservoirs de carburant 53, 55 prévus dans l'aéronef pour former la première source de carburant 302 et la seconde source de carburant 304. Ceci peut permettre de configurer l'attribution de réservoirs de carburant de sorte que la quantité de carburant de chaque type nécessaire au vol peut être stockée à bord de l'aéronef ; et/ou
- [0804] ii) un réglage de vanne d'isolement pour des réservoirs de carburant 53, 55 formant la première source de carburant 302 et la seconde source de carburant 304. Ceci peut permettre de configurer la configuration des réservoirs de carburant en déterminant quels réservoirs embarqués à bord de l'aéronef sont isolés ou en communication fluide entre eux.
- [0805] Les inventeurs ont déterminé que par le calcul de l'attribution de carburant de cette façon, le carburant peut être chargé sur l'aéronef de telle sorte qu'il y ait la quantité requise de carburant, ayant les caractéristiques requises, à bord de l'aéronef pour qu'il réalise la mission proposée tout en réduisant l'impact des nvPM. Ceci peut permettre une meilleure utilisation des caractéristiques du carburant disponible dans la réduction des nvPM comparativement à un chargement d'une quantité définie des types de carburant disponibles. Cela peut également garantir que le carburant adéquat est disponible dans le but de réaliser les procédés de commande de la chambre de combustion décrits ici dans lesquels du carburant de caractéristiques différentes est fourni intelligemment au système de combustion étagée 64 pendant différentes conditions de fonctionnement.
- [0806] La première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant (dans des conditions de combustion correspondantes). Plus particulièrement, la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant peuvent être un pourcentage de SAF présent dans le carburant respectif. Comme indiqué ailleurs ici, le pourcentage de SAF peut affecter le niveau de production des nvPM. Les premier et second carburants peuvent différer par d'autres caractéristiques, y compris l'une quelconque de celles définies ici. Par exemple, ils peuvent différer par la teneur en composés aromatiques (ou la teneur en naphtalène).
- [0807] Dans certains exemples, l'aéronef peut être chargé avec différents carburants au choix qui sont disponibles à l'emplacement où il est ravitaillé. Le type et la quantité de

carburant disponibles peuvent être différents entre différents emplacements. Le présent procédé peut donc permettre une quantité optimisée de carburant des types disponibles d'être chargée sur l'aéronef en tenant compte des caractéristiques du carburant disponible et de la quantité disponible. Dans certains exemples, le carburant disponible peut être un « carburant par défaut » et un « carburant non par défaut ». Le carburant par défaut peut être du carburant largement disponible qui est principalement du kérosène fossile (il peut s'agir par exemple de Jet A ou de JetA-1). Le carburant par défaut peut inclure un faible pourcentage de SAF. Le carburant par défaut correspond donc à un carburant ayant les secondes caractéristiques de carburant exposées ailleurs ici. Il peut être considéré comme étant disponible dans des volumes qui ne sont pas soumis à une limite supérieure. Le carburant non par défaut peut être un carburant moins largement disponible, et inclut une teneur en SAF relativement plus élevée comparativement au carburant par défaut. Le carburant non par défaut peut comprendre 50 % ou plus SAF. Il peut comprendre d'autres pourcentages de SAF qui sont significativement supérieurs au carburant par défaut (le reste étant un kérosène fossile), et peut être du SAF à 100 %.

- [0808] L'ensemble optimisé de la ou des caractéristiques de carburant pour chaque condition de vol peut en outre être déterminé en fonction d'un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0809] i) la plage réalisable de compositions de carburant qui peut être fournie par le régulateur de distribution de carburant 306 du moteur 10 de l'aéronef 1 pour lequel le carburant est chargé. Par exemple, le régulateur de distribution de carburant 306 peut être conçu pour distribuer un mélange de carburant provenant des première et seconde sources de carburant 302, 304, basculer entre le carburant provenant des première et seconde sources de carburant, ou distribuer exclusivement du carburant à partir de la première source de carburant 302 ou du carburant à partir de la seconde source de carburant 304 aux injecteurs de carburant principaux 314 ou pilotes 313 tout au long de la mission. Le type de régulateur peut donc restreindre les caractéristiques du carburant pouvant être introduit dans la chambre de combustion, et ainsi être avantageusement pris en compte lors du calcul des caractéristiques de carburant ;
- [0810] ii) une quantité totale d'un carburant non par défaut attribué à la mission.
L'optimisation des caractéristiques requises du carburant peut prendre en compte la quantité du carburant non par défaut disponible à l'emplacement où se déroule le ravitaillement. Comme l'alimentation en carburant non par défaut peut être limitée elle peut être prise en compte lors d'une optimisation du carburant nécessaire de chaque type disponible ;
- [0811] iii) une exigence totale de carburant pour la mission. Par exemple, la quantité totale de carburant nécessaire pour accomplir la mission (y compris une quelconque quantité

d'urgence) peut également être prise en compte ;

- [0812] iv) les capacités des réservoirs de carburant de l'aéronef. Ceci peut permettre de prendre en compte la quantité de chaque carburant qui peut être stockée par les réservoirs de l'aéronef. Par exemple, certains aéronefs peuvent avoir une configuration fixe de réservoirs de carburant qui peuvent contenir une quantité prédéfinie de chaque type de carburant disponible ; et/ou
- [0813] v) des restrictions sur la façon dont les réservoirs de carburant d'aéronef peuvent être attribués à la première ou à la seconde source de carburant. Comme indiqué ci-dessus, certains aéronefs peuvent comporter un ensemble configurable de réservoirs de carburant qui peuvent apporter une flexibilité dans la quantité de carburant de chaque type pouvant être stockée à bord de l'aéronef.
- [0814] Le procédé 4070 peut faire partie d'un procédé 4080 de chargement de carburant sur un aéronef 1. Un tel procédé est illustré à la [Fig.35]. Le procédé 4080 peut comprendre la détermination 4082 d'une attribution de carburant au moyen du procédé 4070 décrit ci-dessus. Une fois l'attribution de carburant déterminée, le procédé 4080 comprend le chargement 4084 de carburant sur l'aéronef en fonction de l'attribution de carburant. Ceci peut comprendre le chargement de carburant en raccordant l'aéronef 1 à une alimentation en carburant par un procédé connu (par exemple tel qu'illustré à la [Fig.4]), et peut comprendre en outre la configuration de quelconques réservoirs de carburant selon le besoin, la sélection entre des carburants de caractéristiques différentes, et le chargement de la masse requise ou du volume requis de chaque carburant. L'étape de chargement 4084 du carburant peut également comprendre la mémorisation de paramètres de commandes requis quelconques dans un système de commande du moteur pertinent (par exemple l'EEC 42) ou de l'aéronef. Les paramètres de commande peuvent, par exemple, inclure les paramètres d'utilisation du carburant décrits ci-dessus.
- [0815] Le procédé 4070 est un procédé mis en œuvre par ordinateur. Dans certains exemples, le procédé 4070 peut être réalisé par un dispositif informatique situé à bord de l'aéronef 1, tel qu'un système de commande de l'aéronef (par exemple l'EEC 42 ou un autre système de commande prévu sur le moteur ou l'aéronef). Le procédé 4070 peut être mis en œuvre par un quelconque dispositif informatique adapté, soit à bord de l'aéronef 1, distinct de l'aéronef 1 en tant que système de chargement de carburant, soit en tant que système dédié.
- [0816] La [Fig.36] illustre un système de détermination d'attribution de carburant 5000 pour déterminer une attribution de carburant. Le système 5000 peut réaliser le procédé 4070 décrit ci-dessus. L'une quelconque caractéristique décrite ci-dessus en liaison avec le procédé 4070 peut également s'appliquer au système 5000. Le système 5000 comprend un module d'obtention de description de mission 5002 configuré pour obtenir une des-

cription de mission proposée comprenant une liste de points de fonctionnement pour les moteurs à turbine à gaz 10 pendant la mission. La description de mission peut être obtenue à partir d'une quelconque source appropriée, y compris une source externe avec laquelle le système 5000 est en communication, ou une mémoire locale configurée pour mémoriser un éventail de définitions de vol différentes.

- [0817] Le système 5000 comprend en outre un module d'obtention de paramètres d'impact 5004 configuré pour obtenir des paramètres d'impact de nvPM pour les moteurs à turbine à gaz. Comme indiqué ci-dessus, les paramètres d'impact sont associés à chaque point de fonctionnement de la mission proposée en utilisant des compositions de carburant qui incluent du carburant provenant de la première source de carburant 302, du carburant provenant de la seconde source de carburant 304, ou un mélange de ceux-ci. Les paramètres d'impact peuvent être déterminés comme décrit ci-dessus en accédant à une table de consultation. La table de consultation peut être obtenue à partir d'une source externe par le système 5000 (par exemple de sorte qu'elle est adaptée à un certain carburant disponible pour l'aéronef) ou accessible à partir d'une mémoire locale.
- [0818] Le système 5000 comprend en outre un module de calcul de caractéristiques de carburant 5006. Le module de calcul de caractéristiques de carburant est configuré pour calculer un ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant pour chaque point de fonctionnement de la mission proposée définie dans la description de mission en fonction des paramètres d'impact des nvPM. Ceci est réalisable en optimisant une fonction de coût telle que décrite ailleurs ici.
- [0819] Le système 5000 comprend en outre un module de détermination d'attribution de carburant 5008. Il est configuré pour recevoir les caractéristiques de carburant calculées pour chaque partie de la mission et est configuré pour déterminer une attribution de carburant en fonction de celles-ci.
- [0820] Comme indiqué ci-dessus, la première caractéristique de carburant peut être associée à un niveau de production de nvPM inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant. Par exemple, la première caractéristique de carburant et la seconde caractéristique de carburant peuvent être un pourcentage de SAF présent dans le carburant respectif. D'autres caractéristiques de carburant peuvent être utilisées comme indiqué ci-dessus en liaison avec le procédé de la [Fig.34].
- [0821] Chacun des points de fonctionnement de la description de mission obtenue par le module d'obtention de description de mission 5002 peut inclure un ou plusieurs éléments quelconques parmi : une ou plusieurs conditions de fonctionnement dans lesquelles les moteurs à turbine à gaz doivent fonctionner, une ou plusieurs valeurs de débit de carburant correspondant à chaque point de fonctionnement, et une durée de fonctionnement à un point de fonctionnement correspondant.

- [0822] Les paramètres d'impact des nvPM obtenus par le module d'obtention de paramètres d'impact 5004 peuvent définir chacun une quantité de nvPM produite par les moteurs à turbine à gaz pour différentes caractéristiques de carburant respectives comprenant le premier carburant, le second carburant, ou un mélange de ceux-ci à chaque condition de fonctionnement de la description de mission. Le module d'obtention de paramètres d'impact peut obtenir les paramètres d'impact tels que décrits ci-dessus, soit à partir d'une source externe, soit mémorisés dans une mémoire locale.
- [0823] L'attribution de carburant qui est déterminée par le module de détermination d'attribution de carburant 5008 peut être telle que décrite ci-dessus, et peut être déterminée selon l'un quelconque des facteurs indiqués ci-dessus en liaison avec l'exemple illustré à la [Fig.34] et ne sera donc pas répétée ici. Le système 5000 peut en outre comprendre un module de détermination de paramètres d'utilisation de carburant 5010 configuré pour déterminer un ou plusieurs paramètres d'utilisation de carburant tels que décrits ci-dessus.
- [0824] Le module de calcul de caractéristiques de carburant 5006 peut être configuré pour calculer l'ensemble optimisé d'une ou plusieurs caractéristiques de carburant en réduisant au minimum une fonction de coût dépendant du ou des paramètres d'impact des nvPM. Le ou les paramètres d'impact des nvPM utilisés par le module de calcul de caractéristiques de carburant 5006 peuvent être l'un quelconque de ceux décrits ici.
- [0825] Attribution de carburant à l'échelle de la flotte
- [0826] Dans les exemples ci-dessus, la quantité de carburant à attribuer à une mission spécifique est calculée pour profiter du carburant de caractéristiques différentes. Les inventeurs ont en outre déterminé que le carburant disponible peut être partagé intelligemment entre plusieurs missions pour permettre en outre d'utiliser avantageusement différents types de carburant disponibles.
- [0827] Les présents exemples concernent la détermination d'une attribution de carburant pour une pluralité de missions (à savoir, la quantité de carburant attribuée à chaque mission) réalisée par une pluralité d'aéronefs alimentés en carburant à partir d'une source de carburant comprenant une quantité d'un carburant par défaut et une quantité d'un carburant non par défaut. La source de carburant peut comprendre des cuves ou réservoirs de stockage de carburant à partir desquels les aéronefs sont ravitaillés, les cuves de stockage de carburant contenant du carburant par défaut et non par défaut par exemple la source de ravitaillement 60 illustrée à la [Fig.4] et décrite ci-dessus. La quantité de chacun des carburants est stockée au niveau d'un emplacement de ravitaillement dans lequel les aéronefs utilisés pour réaliser les missions sont ravitaillés. Une alimentation définie de carburant est donc partagée à partir de cette source de carburant parmi la pluralité de missions. Il peut s'agir, par exemple, de missions partant toutes du même aéroport, ou du même terminal d'un aéroport, qui ont toutes accès à la

même source de carburant. L'attribution de carburant peut être déterminée pour une pluralité de missions sur une fenêtre temporelle prédéfinie. La fenêtre temporelle peut représenter la période sur laquelle le carburant disponible à la source de carburant doit être utilisé, par exemple il peut s'agir de la période entre des livraisons de carburant à stocker dans la source de carburant et mises à disposition de l'aéronef. Dans d'autres exemples, la période peut correspondre à une ou plusieurs batteries de fonctionnements, ou à une période spécifique telle qu'un ou plusieurs jours, ou une ou plusieurs semaines. La pluralité de missions est appelée « flotte » qui doit recevoir du carburant, et sur laquelle une optimisation à l'échelle de la flotte est à réaliser.

- [0828] Le carburant disponible à l'emplacement de ravitaillement peut comprendre une quantité fixe d'un carburant par défaut et une quantité fixe d'un carburant non par défaut comme décrit ci-dessus. Le carburant par défaut peut être du kérosène fossile (ou un autre carburant pauvre en SAF), alors que le carburant non par défaut peut être un carburant riche en SAF, ayant par exemple une teneur en SAF de 50 % ou plus, ou 100 % de SAF (le carburant riche en SAF peut être un quelconque carburant qui présente une plus grande proportion de SAF comparativement au carburant pauvre en SAF). Plus généralement, le carburant non par défaut peut être associé à un niveau de production de nvPM inférieur à celui du carburant par défaut (par exemple lors d'une utilisation dans des conditions correspondantes). Les carburants par défaut et non par défaut peuvent avoir diverses caractéristiques comme indiqué ci-dessus.
- [0829] Si à la fois le carburant par défaut et le carburant non par défaut sont fournis à un emplacement de ravitaillement, il est possible d'utiliser ces carburants de plusieurs façons :
- [0830] a) Mélanger la totalité du carburant non par défaut disponible dans un volume de carburant par défaut approprié afin de donner une seule composition de carburant à utiliser par tous les aéronefs étant ravitaillés. Ceci est largement ce qui se produit dans l'état de la technique.
- [0831] b) Mélanger la totalité du carburant non par défaut disponible dans un volume approprié de carburant par défaut pour satisfaire à l'exigence en carburant pour des missions pour lesquelles des moteurs à mélange riche sont utilisés. Les missions avec des moteurs à mélange pauvre recevront ou se verront attribuer la composition de carburant par défaut car, pour au moins une partie de leur fonctionnement, le système à mélange pauvre réduit très sensiblement les émissions de suie.
- [0832] c) Comme b), mais dans lequel le carburant non par défaut disponible est partagé sur non seulement les missions à mélange riche mais aussi le sous-ensemble de missions à mélange pauvre qui utilisent une « grande » partie de leur carburant en mode à injection pilote seule (c'est-à-dire des vols courts-courriers, ou des vols pour lesquels l'aéroport de destination implique une grande quantité de roulage). « Grande » peut

être définie en référence à un seuil prédéterminé.

[0833] d) Comme c) mais dans lequel ces missions à mélange pauvre qui reçoivent une attribution de carburant non par défaut l'utilisent uniquement dans leurs injecteurs de carburant pilotes et utilisent le carburant par défaut dans leurs injecteurs de carburant principaux. Pour ces missions recevant une attribution de carburant non par défaut, cette option correspond à l'exemple illustré à la [Fig.9].

[0834] Les inventeurs ont déterminé que d'autres avantages peuvent être tirés du carburant disponible au niveau de l'emplacement de ravitaillement en déterminant une attribution de carburant optimisée « à l'échelle de la flotte » pour la pluralité de missions qui doivent être accomplies en utilisant le carburant stocké à la source de carburant.

[0835] La [Fig.37] illustre un procédé 4090 de détermination d'une attribution de carburant à l'échelle de la flotte optimisée pour une pluralité de missions présentées ci-dessus. Le procédé comprend l'obtention 4092 d'une attribution de carburant proposée initiale pour chaque mission de la pluralité de missions. L'attribution de carburant proposée initiale peut définir une quantité du carburant non par défaut et une quantité du carburant par défaut attribuées pour chaque mission, et éventuellement un rapport de mélange auquel les carburants par défaut et non par défaut peuvent être mélangés avant chargement sur un aéronef. L'attribution de carburant proposée peut avoir une utilisation de carburant correspondante (par exemple une « utilisation de carburant de mission » composée d'un paramètre d'utilisation de carburant pour chaque condition de vol de la mission telle que décrite ci-dessus) qui définit de quelle façon l'attribution doit être utilisée sur la durée de la mission. Dans le cas des aéronefs ayant les capacités appropriées, cela peut inclure des compositions de carburant et des points de basculement proposés et/ou une planification de mélange à utiliser sur cette mission. Les paramètres d'utilisation de carburant peuvent inclure un rapport de mélange des carburants par défaut et non par défaut selon lequel le carburant doit être mélangé et chargé sur l'aéronef pour accomplir une mission respective.

[0836] L'attribution de carburant proposée initiale pour chaque mission peut être déterminée de sorte que le carburant disponible est partagé entre l'aéronef de sorte que chacune des missions peut être accomplie. L'attribution de carburant proposée initiale peut fournir un point de départ pour une optimisation ultérieure, et ne correspond donc pas nécessairement à l'attribution optimale pour chacune des missions. L'attribution de carburant initiale peut être effectuée, par exemple, selon l'une quelconque des méthodologies a) à d) énumérées ci-dessus.

[0837] Chaque mission de la pluralité de missions est associée à un paramètre d'impact des nvPM par mission. Le paramètre d'impact par mission peut être déterminé en fonction de l'attribution de carburant pour la mission respective et de l'utilisation de carburant définissant de quelle façon le carburant doit être utilisé pendant la mission respective.

Le paramètre d'impact des nvPM par mission peut être déterminé en combinant un paramètre d'impact des nvPM pour chaque point de fonctionnement du ou des moteurs à turbine à gaz 10 de l'aéronef respectif 1 pendant la mission (par exemple tel que défini dans une description de mission). Les paramètres d'impact des nvPM par mission peuvent être calculés comme décrit ci-dessous ou en utilisant les procédés décrits ci-dessus en liaison avec l'optimisation d'attribution de carburant pour une mission individuelle.

- [0838] Une fois qu'une attribution de carburant proposée initiale pour chacune des missions a été obtenue, le procédé 4090 comprend la réalisation 4094 d'une optimisation à l'échelle de la flotte dans laquelle l'attribution de carburant proposée de chaque mission de la pluralité de missions est déterminée de sorte qu'une combinaison de l'impact des nvPM par mission est optimisée dans les contraintes de la quantité totale de carburant par défaut et non par défaut à attribuer à la pluralité de missions. Dans certains exemples, la quantité de carburant par défaut peut être considérée non contrainte, seule la quantité du carburant non par défaut étant limitée.
- [0839] L'attribution de carburant pour chaque mission peut être déterminée en les modifiant à partir de l'attribution de carburant proposée initiale en utilisant un processus d'optimisation de sorte que le total (par exemple la somme) de l'impact des nvPM pour l'ensemble de la pluralité de missions est réduit au minimum. Ceci est réalisable en utilisant un processus d'optimisation adapté (par exemple une optimisation itérative) qui converge sur un ensemble d'attributions de carburant par mission qui donne le plus faible impact des nvPM à l'échelle de la flotte. L'optimisation à l'échelle de la flotte conduit à définir une utilisation optimisée du carburant pour chaque mission qui utilise le plus efficacement le carburant disponible pour réduire au minimum l'impact des nvPM sur toutes les missions, plutôt que pour chaque mission individuellement.
- [0840] Le procédé 4090 comprend en outre la détermination 4096 de l'attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour la pluralité de missions en fonction de l'optimisation à l'échelle de la flotte. L'attribution de carburant à l'échelle de la flotte peut inclure une attribution de carburant pour chaque aéronef de la pluralité d'aéronefs au sein de la flotte. L'attribution peut correspondre à celle définie ci-dessus dans les exemples de détermination d'attribution de carburant pour un seul aéronef/une seule mission. L'attribution de carburant à l'échelle de la flotte peut indiquer la quantité (masse ou volume) du carburant par défaut, du carburant non par défaut ou d'un mélange de ceux-ci qui doit être chargé sur l'aéronef pour chaque mission de sorte que le carburant pour répondre aux exigences optimisées d'utilisation du carburant pour cette mission est disponible. L'attribution de carburant à l'échelle de la flotte peut également inclure l'utilisation de carburant pour chaque aéronef pour définir de quelle façon l'attribution de carburant chargé sur cet aéronef doit être utilisée.

[0841] Comme indiqué ci-dessus, le carburant non par défaut peut être associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant par défaut. Plus particulièrement, le carburant non par défaut peut être formé à partir d'un mélange d'un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'un second carburant ayant une caractéristique de carburant différente de la première. Les première et seconde caractéristiques de carburant peuvent être un pourcentage de SAF au sein du carburant respectif. Le carburant non par défaut peut donc être un mélange d'un premier carburant à 100 % de SAF, et d'un second carburant à 100 % de kérosène fossile. Le carburant non par défaut peut donc être un carburant riche en SAF (par exemple pour donner une teneur en SAF dans le carburant non par défaut de 50 % ou plus), le carburant par défaut étant un carburant relativement pauvre en SAF. Dans d'autres exemples, le carburant non par défaut peut être un mélange de carburants qui diffèrent par l'une quelconque des autres caractéristiques de carburant définies ici, par exemple la teneur en composés aromatiques.

[0842] La réalisation 4094 de l'optimisation de la flotte peut comprendre la réalisation d'une optimisation à l'échelle de la flotte à paramètres multiples pour réduire au minimum l'impact des nvPM à l'échelle de la flotte c'est-à-dire la somme sur la totalité de la pluralité de missions de l'impact des nvPM par mission dans les contraintes du carburant par défaut et/ou non par défaut disponible pour la pluralité de missions. L'optimisation peut comprendre : i) la réalisation 4097a d'une optimisation en boucle externe dans laquelle l'attribution de carburant d'une ou plusieurs des missions est modifiée pour réduire la somme des paramètres d'impact des nvPM par mission de la pluralité de missions ; et ii) la réalisation 4097b d'une optimisation en boucle interne dans laquelle une utilisation de carburant pour chacune des missions est obtenue en fonction des contraintes de l'attribution de carburant modifiée pour déterminer une nouvelle utilisation de carburant proposée pour chaque mission de la pluralité de missions. L'obtention de l'utilisation de carburant peut comprendre la détermination d'une utilisation de carburant optimisée pour la mission spécifique en fonction de l'attribution de carburant modifiée afin de déterminer un nouveau paramètre d'impact des nvPM par mission réduit au minimum pour cette mission respective. Cette optimisation par mission est réalisable comme décrit ci-après ou en utilisant l'une quelconque des autres techniques décrites ici. L'optimisation à l'échelle de la flotte permet de tenter différentes distributions de SAF entre les missions de la pluralité de missions (à savoir, l'optimisation en boucle externe), puis pour chaque distribution proposée chaque mission explore la meilleure utilisation de sa propre attribution proposée (à savoir, l'optimisation en boucle interne).

[0843] L'optimisation à l'échelle de la flotte peut commencer par la modification de l'attribution de carburant proposée initiale obtenue à l'étape 4092. Les étapes

d'optimisation à l'échelle de la flotte 4097a, 4097b peuvent être répétées jusqu'à ce que le procédé converge vers une solution optimisée de l'utilisation de carburant proposée pour chaque mission de la pluralité de missions qui correspond à la valeur minimale de la somme des paramètres d'impact des nvPM par mission. À chaque itération de l'optimisation en boucle externe 4097a l'utilisation de carburant peut être modifiée en modifiant une quantité de carburant non par défaut proposée attribuée à la mission correspondante. Par exemple, une quantité de carburant non par défaut attribuée à une mission peut être déplacée vers une autre de sorte que le carburant non par défaut peut être attribué de manière plus optimale globalement.

- [0844] Dans certains exemples, l'optimisation en boucle interne 4097b peut comprendre l'obtention de l'utilisation de carburant d'une mission respective en obtenant le résultat d'une optimisation par mission précédente pour cette mission. Ceci peut permettre de réduire le temps de calcul. La mise en œuvre de l'optimisation en boucle interne peut comprendre l'obtention d'une solution préalablement préparée pour l'utilisation de carburant pour cette mission (par exemple des pourcentages de SAF au sein des compositions de carburant pauvres en SAF et riches en SAF pour cette mission, et les points de basculement proposés et/ou la planification de mélange à utiliser sur cette mission) afin de réduire au minimum le niveau global des nvPM pour cette mission. La solution préalablement préparée peut être obtenue à partir d'un modèle approximatif, d'une table de consultation ou d'une « fonction de réponse » qui permet d'obtenir une solution préalablement préparée correspondante pour une attribution de carburant proposée donnée. Dans certains exemples, la solution préalablement préparée peut également être obtenue en fonction d'autres facteurs tels que l'itinéraire proposé pour la mission respective et les conditions météorologiques attendues.
- [0845] Dans certains exemples, l'optimisation à l'échelle de la flotte peut être basée au moins partiellement sur un ou plusieurs éléments quelconques parmi :
- [0846] i) un pourcentage d'un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant dans le carburant par défaut définissant le pourcentage le plus faible possible de carburant ayant la première caractéristique de carburant qui peut servir à la combustion ;
- [0847] ii) un pourcentage du premier carburant ayant la première caractéristique de carburant dans le carburant non par défaut définissant le pourcentage le plus élevé possible de carburant ayant la première caractéristique de carburant qui peut servir à la combustion ; et/ou
- [0848] iii) la quantité de carburant non par défaut disponible pour la pluralité de missions.
- [0849] Lorsque la première caractéristique de carburant est le pourcentage de la teneur en SAF du carburant, les facteurs i) et ii) ci-dessus peuvent permettre de déterminer la teneur en SAF la plus basse possible et la plus élevée possible d'un carburant qui peut

être formé à partir des carburants par défaut et non par défaut. Par exemple, si le carburant non par défaut contient 80 % de SAF et que le carburant par défaut contient 10 % de SAF, la teneur maximale en SAF possible d'un mélange des deux carburants est de 80 %, et la plus faible est de 10 %.

- [0850] Comme indiqué ci-dessus, l'utilisation de carburant pour chaque mission de la pluralité de missions est obtenue en obtenant une utilisation de carburant optimisée pour la mission respective définissant de quelle façon le carburant attribué est utilisé lors de la mission. L'utilisation optimisée de carburant peut inclure un ou plusieurs paramètres d'utilisation de carburant sur la base desquels le système de combustion de l'aéronef respectif est commandé, ou selon lesquels le carburant est mélangé et chargé sur l'aéronef. Par exemple, les paramètres d'utilisation peuvent inclure des pourcentages de SAF dans les compositions de carburant pauvres en SAF et riches en SAF pour cette mission, et des points de basculement proposés et/ou une planification de mélange à utiliser sur cette mission. Les paramètres d'utilisation peuvent être choisis afin de réduire au minimum un paramètre d'impact des nvPM par mission pour cette mission respective, dans les contraintes du carburant attribué à cette mission par l'attribution de carburant.
- [0851] L'utilisation optimisée de carburant pour chaque mission (par exemple déterminée en tant que partie de l'optimisation en boucle interne) peut être obtenue en effectuant 4098 une optimisation par mission comme illustré à la [Fig.38]. L'optimisation par mission peut être effectuée, pour chaque mission, par :
- [0852] i) la détermination 4098a d'un type et/ou de capacités opérationnelles d'une chambre de combustion utilisée par l'aéronef respectif utilisé pour la mission ;
 - [0853] ii) la détermination 4098b d'une exigence totale de carburant pour la mission respective ;
 - [0854] iii) la détermination 4098c d'une quantité de carburant requise pour chaque type d'injecteur de carburant fourni dans la chambre de combustion pour la mission respective ;
 - [0855] iv) la détermination 4098d de la dépendance des émissions de nvPM pour chaque point de fonctionnement du moteur en utilisant du carburant ayant les caractéristiques du carburant par défaut, du carburant non par défaut, ou d'un mélange de ceux-ci ; et
 - [0856] v) la détermination 4098e d'une utilisation optimisée de carburant qui réduit au minimum les émissions totales de nvPM pour la mission.
- [0857] Dans l'étape i), le type et les capacités du système de chambre de combustion l'aéronef effectuant la mission respective sont déterminés. Ceci peut comporter le fait de déterminer si l'aéronef comprend une chambre de combustion étagée à mélange pauvre ou une chambre de combustion à mélange riche. Ceci peut en outre comprendre la détermination des modes de commande de la chambre de combustion qui sont dis-

ponibles. Par exemple, on peut déterminer si les capacités opérationnelles comprennent le basculement du carburant entre différentes sources en cours de distribution aux injecteurs de carburant pilotes, ou la fourniture d'un carburant mélangé aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux tels que décrits dans divers exemples ici. Si la chambre de combustion est une chambre de combustion étagée à mélange pauvre, la détermination d'une quantité de carburant requise pour chaque type d'injecteur de carburant comprend la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes pendant le fonctionnement à injection pilote seule. Elle peut en outre ou en variante comprendre la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes pendant le fonctionnement à injection pilote et principale. La détermination d'une quantité de carburant requise pour chaque type de chambre de combustion peut, dans certains exemples, comprendre la détermination d'une quantité de carburant requise pour les injecteurs de carburant pilotes fonctionnant dans une plage seuil du fonctionnement à des débits de carburant inférieurs à celui du point d'étagement. Ceci peut être le cas dans des exemples où un carburant riche en SAF est fourni aux injecteurs de carburant pilotes dans un mode à injection pilote seule proche du point d'étagement comme décrit ci-dessus en liaison avec la [Fig.15]. Dans l'étape iv) l'émission de nvPM pour chaque point de fonctionnement du moteur dépendant des caractéristiques du carburant étant la chambre de combustion est obtenue. Les points de fonctionnement du moteur peuvent être tels que définis dans une description de mission comme exposé ailleurs ici. À l'étape v), l'utilisation optimisée de carburant est déterminée en fonction de la dépendance des émissions de nvPM afin de trouver l'utilisation optimale de carburant (par exemple, le type ou le mélange de carburant utilisé) à chaque condition de fonctionnement du moteur pour réduire au minimum les émissions globales de nvPM. Dans certains exemples, la fonction de coût des nvPM pour chaque condition de fonctionnement du moteur telle que définie ailleurs ici peut être réduite au minimum.

- [0858] L'information déterminée dans chacune des étapes i) à iv) de l'optimisation par mission peut être obtenue ou calculée en utilisant une quelconque technique adaptée qui serait connue de l'homme du métier. Par exemple, cela peut comprendre l'accès à des informations stockées sur les aéronefs pertinents et aux descriptions de chaque mission de la pluralité de missions au cours desquelles ils vont voler.
- [0859] L'optimisation par mission peut être effectuée selon l'un quelconque des exemples donnés ici, par exemple celui en liaison avec la [Fig.34].
- [0860] Le procédé 4090 est un procédé mis en œuvre par ordinateur. Le procédé 4090 peut être mis en œuvre par un quelconque dispositif informatique adapté, soit à bord d'un aéronef, distinct de l'aéronef en tant que système de chargement de carburant, soit en tant que système dédié pour gérer l'attribution de carburant.

- [0861] Le procédé 4090 peut faire partie d'un procédé 4100 de chargement de carburant sur la pluralité d'aéronefs pour lesquels l'attribution de carburant a été déterminée. Un tel procédé est illustré à la [Fig.39]. Le procédé 4100 peut comprendre la détermination 4102 de l'attribution de carburant pour la pluralité de missions au moyen du procédé 4090 décrit ci-dessus. Une fois l'attribution de carburant déterminée, le procédé 4100 comprend le chargement 4104 de carburant sur l'aéronef en fonction de l'attribution de carburant. Ceci peut comprendre le chargement de carburant en raccordant l'aéronef à une alimentation en carburant par un procédé connu. Le chargement du carburant peut également comprendre la fourniture d'informations d'utilisation de carburant calculées pour chaque mission à l'aéronef pour mémorisation dans un système de commande embarqué (tel que l'EEC 42) de sorte que l'aéronef peut être commandé en ce sens. Ceci peut inclure des informations d'utilisation de carburant pour permettre la configuration de réservoirs de carburant quelconques tels que requis, en sélectionnant les carburants de caractéristiques différentes à certains points de fonctionnement, et/ou une planification de mélange de carburant. Les informations d'utilisation peuvent également comprendre un rapport auquel le carburant par défaut et non par défaut doit être mélangé avant son chargement sur l'aéronef (par exemple, dans les cas d'aéronefs pour lesquels le mélange ou la sélection de carburant à bord n'est pas possible). L'étape de chargement du carburant peut également comprendre la mémorisation de paramètres de commandes requis quelconques dans un système de commande du moteur pertinent (par exemple l'EEC 42).
- [0862] La [Fig.40] illustre un système de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte 5100 pour déterminer une attribution de carburant pour une pluralité de missions. Le système 5100 peut réaliser le procédé 4090 décrit ci-dessus. L'une quelconque caractéristique décrite ci-dessus en liaison avec le procédé 4090 peut par conséquent également s'appliquer au système 5100 de la [Fig.40].
- [0863] Le système de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte 5100 comprend généralement un module d'obtention d'attribution de carburant proposée initiale 5102, un module d'optimisation à l'échelle de la flotte 5104 et un module de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte 5106. Ces modules peuvent réaliser une quelconque des étapes définies ci-dessus en ce qui concerne le procédé 4090 de détermination d'une attribution de carburant à l'échelle de la flotte.
- [0864] Le module d'obtention d'attribution de carburant proposée initiale 5102 est configuré pour obtenir une attribution de carburant proposée initiale pour chaque mission de la pluralité de missions. Comme indiqué ci-dessus, cela peut former le point de départ de l'optimisation à l'échelle de la flotte. Le module d'optimisation 5104 à l'échelle de la flotte est configuré pour réaliser une optimisation à l'échelle de la flotte dans laquelle l'attribution de carburant proposée de chaque mission de la pluralité de missions est

modifiée dans les contraintes du carburant par défaut et/ou non par défaut disponible total provenant de la source de carburant pour réduire au minimum une somme des paramètres d'impact des nvPM par mission sur la totalité de la pluralité de missions. Chaque mission de la pluralité de missions peut être associée à un paramètre d'impact des nvPM par mission déterminé selon l'utilisation de carburant proposée telle que décrite ci-dessus.

- [0865] Le module de détermination d'attribution de carburant à l'échelle de la flotte 5106 est configuré pour déterminer l'attribution de carburant à l'échelle de la flotte pour la pluralité de missions en fonction de l'optimisation à l'échelle de la flotte.
- [0866] Comme indiqué ci-dessus, le carburant non par défaut est associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant par défaut. Le carburant non par défaut est formé à partir d'un mélange d'un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, différente de la première. Plus particulièrement, les première et seconde caractéristiques de carburant peuvent être un pourcentage de SAF au sein du carburant respectif, et dans lequel le carburant non par défaut est un carburant riche en SAF et le carburant par défaut est un carburant pauvre en SAF.
- [0867] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut être configuré pour réaliser l'optimisation à l'échelle de la flotte comme indiqué ci-dessus. Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte 5104 est par conséquent configuré pour réaliser les étapes suivantes :
- [0868] i) la réalisation d'une optimisation en boucle externe dans laquelle l'attribution de carburant d'une ou plusieurs des missions est modifiée pour réduire la somme des paramètres d'impact des nvPM par mission de la pluralité de missions ; et
- [0869] ii) la réalisation d'une optimisation en boucle interne dans laquelle l'utilisation de carburant pour chacune des missions est obtenue en fonction des contraintes de l'attribution de carburant modifiée pour déterminer une nouvelle utilisation de carburant proposée pour chaque mission de la pluralité de missions
- [0870] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte 5104 peut être configuré pour répéter les étapes i) et ii) jusqu'à ce qu'une utilisation optimisée de carburant pour chaque mission de la pluralité de missions soit déterminée ce qui correspond à une somme réduite au minimum des paramètres d'impact des nvPM par mission. Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte 5104 peut être configuré pour réaliser l'optimisation en boucle interne en obtenant une solution préalablement préparée pour l'utilisation de carburant pour une mission respective. Ceci peut être obtenu en utilisant des informations déjà accessibles par le système 5100, telles que celles mémorisées dans une mémoire locale ou distante.
- [0871] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte 5104 peut être configuré pour obtenir

l'attribution de carburant pour chaque mission de la pluralité de missions en obtenant une utilisation optimisée de carburant pour la mission respective définissant de quelle façon le carburant doit être utilisé pour une mission respective afin de réduire au minimum le paramètre d'impact des nvPM par mission pour cette mission.

- [0872] Le module d'optimisation à l'échelle de la flotte 5104 peut être configuré pour obtenir l'utilisation optimisée de carburant pour chaque mission en effectuant une optimisation par mission comme indiqué ci-dessus. Pour effectuer l'optimisation par mission, le module d'optimisation à l'échelle de la flotte peut réaliser les étapes illustrées à la [Fig.38], ou comme indiqué dans l'un quelconque des exemples ci-dessus. Les détails de l'optimisation par mission ne seront donc pas répétés ici. D'autres techniques d'optimisation peuvent être utilisées, telles que l'une quelconque de celles décrites ici.
- [0873] L'une quelconque des caractéristiques décrites ci-dessus en liaison avec les exemples du procédé 4090 de détermination d'une attribution de carburant à l'échelle de la flotte peut être effectuée par les modules du système 5100. Ces caractéristiques ne seront donc pas à nouveau décrites ici.
- [0874] Les modules informatiques, les systèmes et les étapes de procédé mises en œuvre par ordinateur décrits ici peuvent être mis en œuvre dans un logiciel exécuté par un processeur, un matériel ou une combinaison des deux. Dans certains modes de réalisation, les modules, systèmes et étapes de procédé décrits ici peuvent être mis en œuvre par un ou plusieurs dispositifs informatiques. Un tel dispositif informatique 6000 est illustré à la [Fig.41], qui comporte un ou plusieurs processeurs 6002, des interfaces d'entrée/sortie 6004 et une mémoire 6006. La mémoire peut comprendre une mémoire lisible par ordinateur ou machine formant un support lisible par ordinateur/machine. L'homme du métier appréciera que la mémoire peut être fournie par une diversité de composants incluant une mémoire volatile, un disque dur, une mémoire non volatile, etc. Les interfaces d'entrée/sortie peuvent permettre que des informations telles qu'une description de mission proposée soient obtenues à partir d'une source externe, et peuvent permettre qu'une attribution de carburant calculée ou des paramètres d'utilisation soient sortis vers un autre dispositif (par exemple vers un système de chargement de carburant de sorte que le système de chargement de carburant peut être commandé en ce sens), ou soient sortis vers un utilisateur.
- [0875] La mémoire peut stocker un ensemble d'instructions, structures de données, modules de programme ou autres données lisibles par ordinateur. Le support lisible par ordinateur peut ne pas inclure de support temporaire lisible par ordinateur (support transitoire), tel qu'un signal de données modulé et une onde porteuse.
- [0876] L'homme du métier comprendra que les modules et systèmes informatiques décrits ici en tant que composants individuels ne peuvent pas être physiquement séparés les uns des autres, et peuvent être situés à un seul emplacement ou peuvent être répartis

entre plusieurs composants en réseau. Dans certains modes de réalisation, la fonctionnalité des modules/systèmes décrits ici peut être divisée différemment entre les modules/systèmes, ou d'autres modules/systèmes prévus pour réaliser l'une quelconque des fonctions décrites ici.

- [0877] Selon un aspect de la présente demande, l'invention concerne un support lisible par ordinateur/ordinateur ou un produit programme informatique contenant des instructions qui, lorsqu'elles sont lues par une machine ou un ordinateur, amènent l'un quelconque des procédés mis en œuvre par ordinateur, ou des parties de ceux-ci, décrit(e)s ou revendiqué(e)s ici à être mis(es) en œuvre.
- [0878] Le support lisible par machine peut être l'un quelconque des éléments suivants ; un DVD de ROM/RAM (y compris -R/-RW ou +R/+RW) ; un disque dur ; une mémoire (y compris une clé USB ; une carte SD ; une carte flash compacte ou similaire) ; un signal transmis (incluant un téléchargement Internet, un transfert de fichier ftp ou similaire) ; un fil ; etc. Le support lisible par machine peut être un support non transitoire lisible par ordinateur.
- [0879] On comprendra que l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits ci-dessus et que diverses modifications et améliorations peuvent être apportées sans sortir des concepts décrits ici. Sauf lorsqu'elles sont réciproquement exclusives, l'une quelconque des caractéristiques peut être utilisée séparément ou en association avec de quelconques autres caractéristiques et la description s'étend à et inclut toutes les combinaisons et sous-combinaisons d'une ou plusieurs caractéristiques décrites ici.

Revendications

[Revendication 1]

1 Moteur à turbine à gaz (10) pour un aéronef (1), comprenant :
 un système de combustion étagée (64) ayant des injecteurs de carburant pilotes (313) et des injecteurs de carburant principaux (314), le système de combustion étagée (64) pouvant fonctionner dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle un carburant est distribué uniquement aux injecteurs de carburant pilotes (313), et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle un carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux (314) ; et
 un régulateur de distribution de carburant (306) conçu pour commander la distribution de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et principaux (313, 314), le régulateur de distribution de carburant (306) étant conçu pour recevoir du carburant à partir d'une première source de carburant (302) contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant (304) contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première, dans lequel :
 le système de combustion étagée (64) est conçu pour fonctionner dans un mode d'accélération dans lequel l'accélération du moteur (10) à partir d'un mode de fonctionnement à l'état stabilisé est provoquée ; et
 le régulateur de distribution de carburant (306) est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux (313, 314), pendant le fonctionnement dans au moins une partie du mode d'accélération, ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux (313, 314) pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé.

[Revendication 2]

2 Moteur à turbine à gaz (10) selon la revendication 1, dans lequel la première caractéristique de carburant est associée à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué au moins aux injecteurs de carburant pilotes (313) pendant le mode d'accélération est associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux (313, 314) pendant un fonctionnement dans le mode à l'état stabilisé.

- [Revendication 3] 3 Moteur à turbine à gaz (10) selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel la première caractéristique de carburant correspond à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué pendant le mode d'accélération a une proportion plus élevée de SAF.
- [Revendication 4] 4 Moteur à turbine à gaz (10) selon l'une quelconque revendication précédente, dans lequel le système de combustion étagée (64) est conçu pour basculer entre un fonctionnement dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale au niveau d'un point d'étagement, dans lequel le point d'étagement est à une puissance moteur égale ou supérieure dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé.
- [Revendication 5] 5 Moteur à turbine à gaz (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le système de combustion étagée (64) est conçu pour basculer entre un fonctionnement dans les plages de fonctionnement à injection pilote seule et à injection pilote et principale au niveau d'un point d'étagement, dans lequel le point d'étagement est à une puissance moteur inférieure dans le mode d'accélération comparativement au mode à l'état stabilisé et est à une puissance supérieure à un point d'étagement par défaut selon lequel le système de combustion étagée (64) est commandé lorsque le carburant d'une caractéristique différente ne peut pas être fourni au système de combustion (64).
- [Revendication 6] 6 Moteur à turbine à gaz (10) selon l'une quelconque revendication précédente, dans lequel le régulateur de distribution de carburant (306) est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes (313) pendant un fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération qui a une caractéristique de carburant différente de celle du carburant fourni aux injecteurs de carburant principaux (314) pendant un fonctionnement à injection pilote et principale dans le mode de fonctionnement à l'état stabilisé du moteur.
- [Revendication 7] 7 Moteur à turbine à gaz (10) selon l'une quelconque revendication précédente, dans lequel le régulateur de distribution de carburant (306) est conçu pour distribuer du carburant pendant la plage de fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération ayant une caractéristique de carburant déterminée sur la base d'un paramètre de commande dont dépend la production de nvPM par le moteur, de préférence un rapport carburant-air dans une chambre de

combustion (16) du système de combustion étagée (64), et éventuellement dans lequel, à mesure que le rapport carburant-air diminue, la proportion de carburant associé à une production faible de nvPM distribuée aux injecteurs de carburant pilotes (313) est également diminuée.

[Revendication 8] 8 Moteur à turbine à gaz (10) selon l'une quelconque revendication précédente, dans lequel le régulateur de distribution de carburant (306) est conçu pour basculer la distribution de carburant aux injecteurs de carburant principaux (314) et/ou pilotes (313) vers celui ayant une caractéristique de carburant différente à un point de départ d'une période de fonctionnement dans le mode d'accélération, et éventuellement dans lequel le régulateur de distribution de carburant (306) est conçu pour revenir à une distribution de carburant ayant la même caractéristique de carburant que celui distribué dans le mode d'état stabilisé après une transition vers un fonctionnement à injection pilote et principale.

[Revendication 9] 9 Moteur à turbine à gaz (10) selon l'une quelconque revendication précédente, dans lequel le régulateur de distribution de carburant (306) est conçu pour distribuer du carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux (313, 314) pendant le mode d'accélération à une vitesse supérieure à celle qui est suffisante pour maintenir un fonctionnement à l'état stabilisé du moteur.

[Revendication 10] 10 Procédé (4030) de fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz (10) pour un aéronef (1), le moteur à turbine à gaz (10) comprenant un système de combustion étagée (64) ayant des injecteurs de carburant pilotes et des injecteurs de carburant principaux (313, 314), le système de combustion étagée (64) étant exploitable dans une plage de fonctionnement à injection pilote seule dans laquelle le carburant est distribué uniquement aux injecteurs de carburant pilotes (313), et une plage de fonctionnement à injection pilote et principale dans laquelle le carburant est distribué au moins aux injecteurs de carburant principaux (314), le procédé (4030) comprenant :

la régulation (4032) d'une distribution de carburant (306) aux injecteurs de carburant pilotes et principaux (313, 314) à partir d'une première source de carburant (302) contenant un premier carburant ayant une première caractéristique de carburant et d'une seconde source de carburant (304) contenant un second carburant ayant une seconde caractéristique de carburant, la seconde caractéristique de carburant étant différente de la première ;

le fonctionnement (4034) du système de combustion étagée (64) dans un mode d'accélération dans lequel l'accélération du moteur (10) à partir d'un mode de fonctionnement à l'état stabilisé est provoquée ; et la distribution (4036) de carburant aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux (313, 314), pendant le fonctionnement dans au moins une partie du mode d'accélération, ayant une caractéristique de carburant différente du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes et/ou principaux (313, 314) pendant au moins une partie du mode de fonctionnement à l'état stabilisé.

[Revendication 11] 11 Procédé (4030) selon la revendication 10, dans lequel la première caractéristique de carburant est associée à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui de la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué au moins aux injecteurs de carburant pilotes (313) pendant le mode d'accélération est associé à un niveau de production de nvPM qui est inférieur à celui du carburant distribué aux injecteurs de carburant pilotes (313) et/ou principaux (314) pendant un fonctionnement dans le mode à l'état stabilisé.

[Revendication 12] 12 Procédé (4030) selon la revendication 10 ou la revendication 11, dans lequel la première caractéristique de carburant correspond à une proportion supérieure de SAF au sein du carburant respectif comparativement à la seconde caractéristique de carburant, et le carburant distribué pendant le mode d'accélération a une proportion plus élevée de SAF.

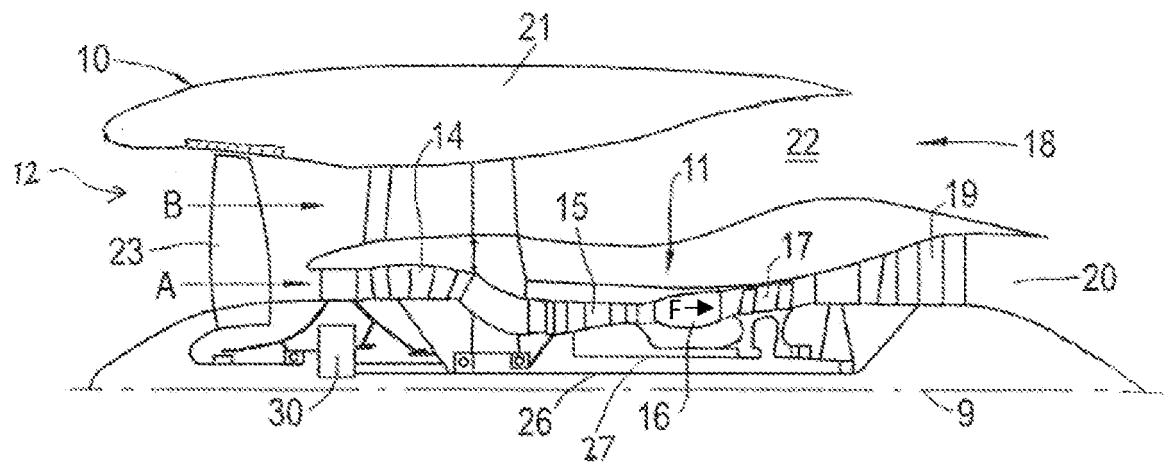
[Revendication 13] 13 Procédé (4030) selon l'une quelconque des revendications 10 à 12, dans lequel le carburant est distribué aux injecteurs de carburant pilotes (313) pendant un fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération qui a une caractéristique de carburant différente de celle du carburant distribué aux injecteurs de carburant principaux (314) pendant un fonctionnement à injection pilote et principale dans le mode de fonctionnement à l'état stabilisé du moteur.

[Revendication 14] 14 Procédé (4030) selon l'une quelconque des revendications 10 à 13, dans lequel la distribution (4036) de carburant aux injecteurs de carburant comprend la distribution de carburant pendant la plage de fonctionnement à injection pilote seule dans le mode d'accélération ayant des caractéristiques de carburant basées sur un paramètre de commande dont dépend la production de nvPM par le moteur, de préférence un rapport carburant-air dans une chambre de combustion (16) du système de combustion étagée (64), et éven-

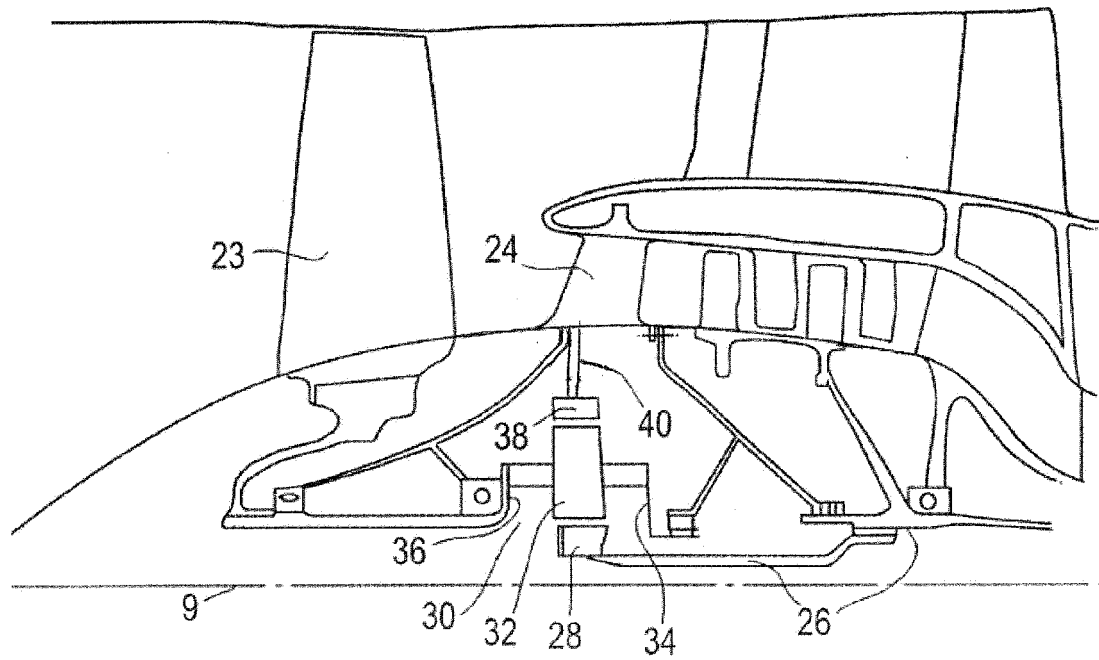
tuellement dans lequel à mesure que le rapport carburant-air diminue, la proportion de carburant associée à une production faible de nvPM distribuée aux injecteurs de carburant pilotes (313) est également diminuée.

- [Revendication 15] 15 Procédé (4030) selon l'une quelconque des revendications 10 à 14, dans lequel la distribution (4036) de carburant aux injecteurs de carburant comprend le basculement de la distribution de carburant aux injecteurs de carburant principaux (314) et/ou pilotes (313) vers celui ayant une caractéristique de carburant différente à un point de départ d'une période de fonctionnement dans le mode d'accélération, et éventuellement dans lequel la distribution (4036) de carburant aux injecteurs de carburant comprend le retour à une distribution de carburant ayant la même caractéristique de carburant que celui distribué dans le mode à l'état stabilisé après une transition vers un fonctionnement à injection pilote et principale.

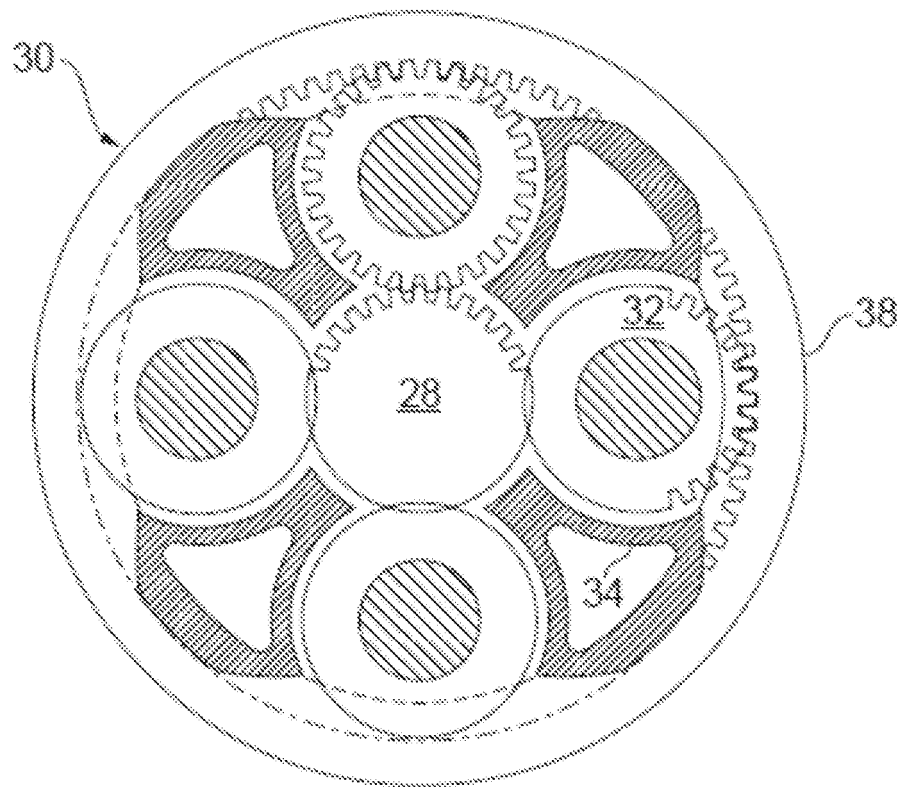
[Fig. 1]



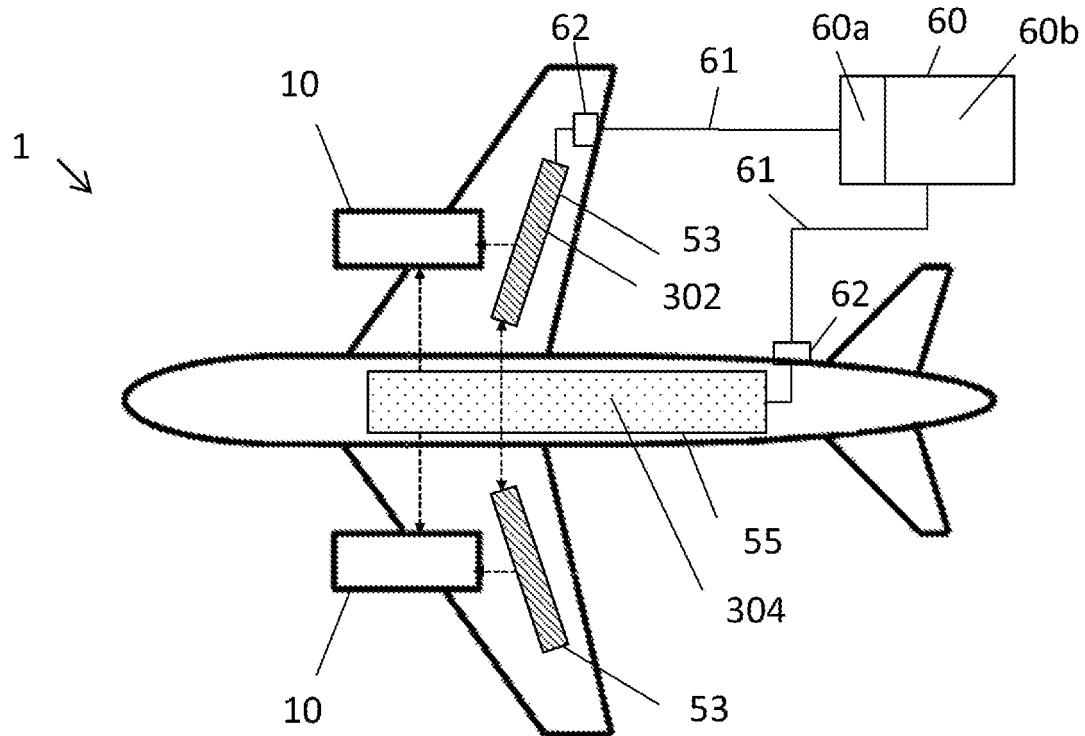
[Fig. 2]



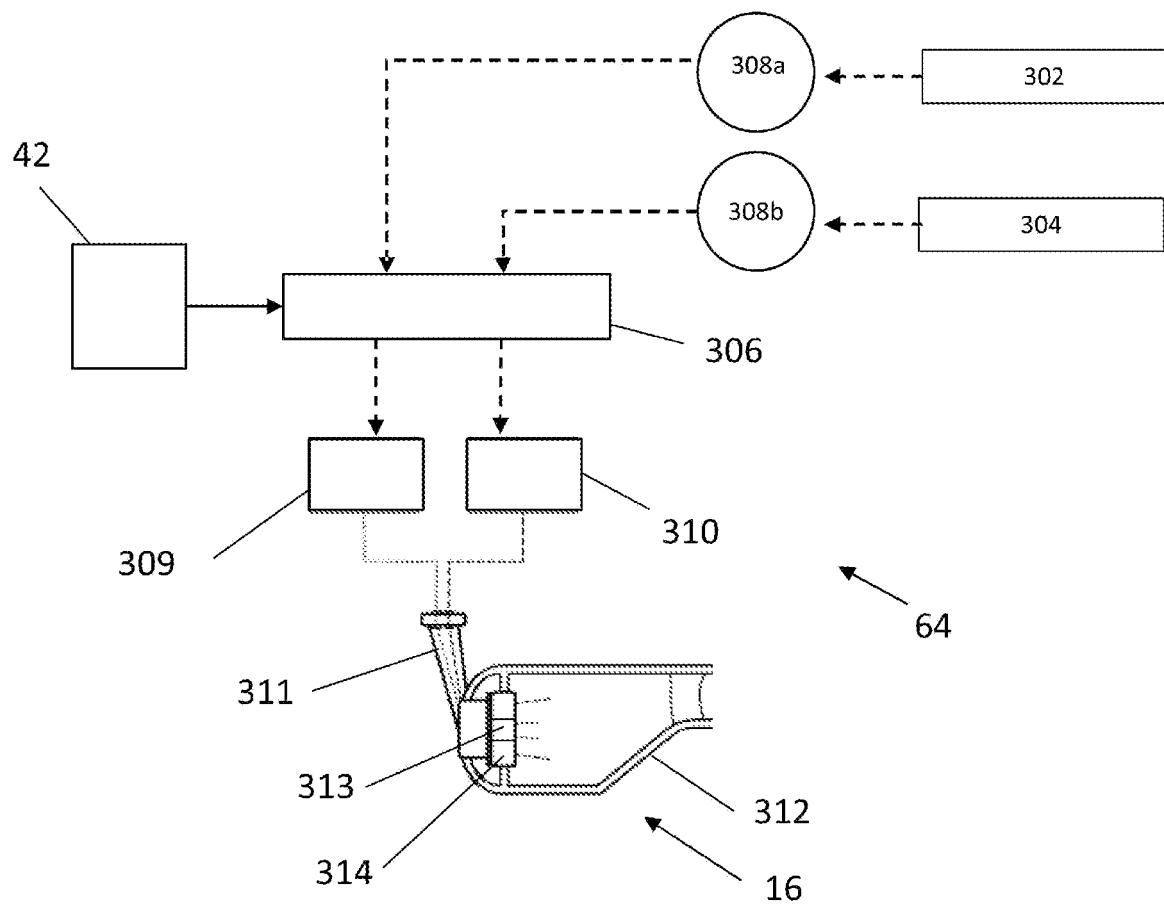
[Fig. 3]



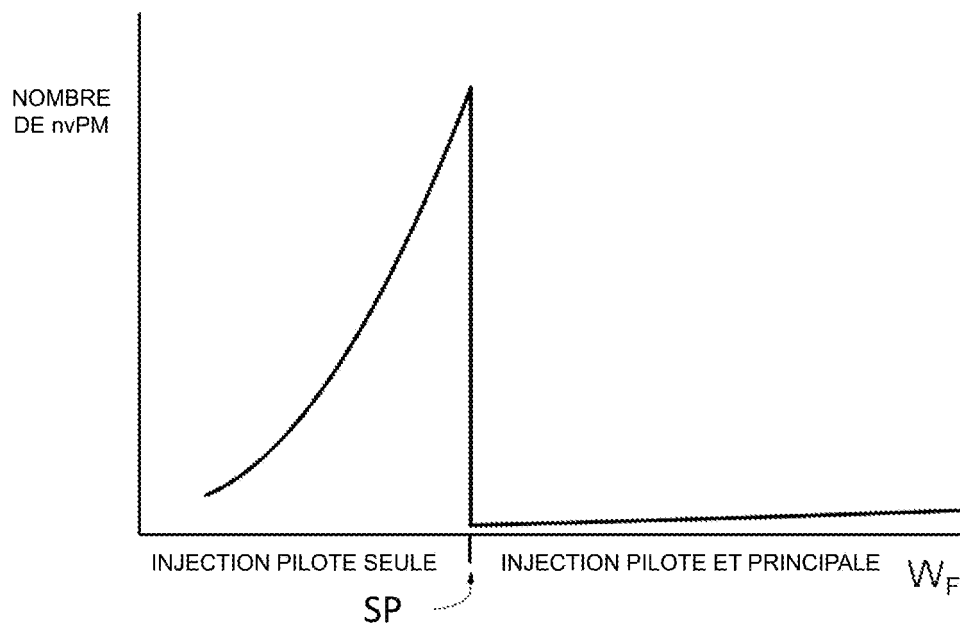
[Fig. 4]



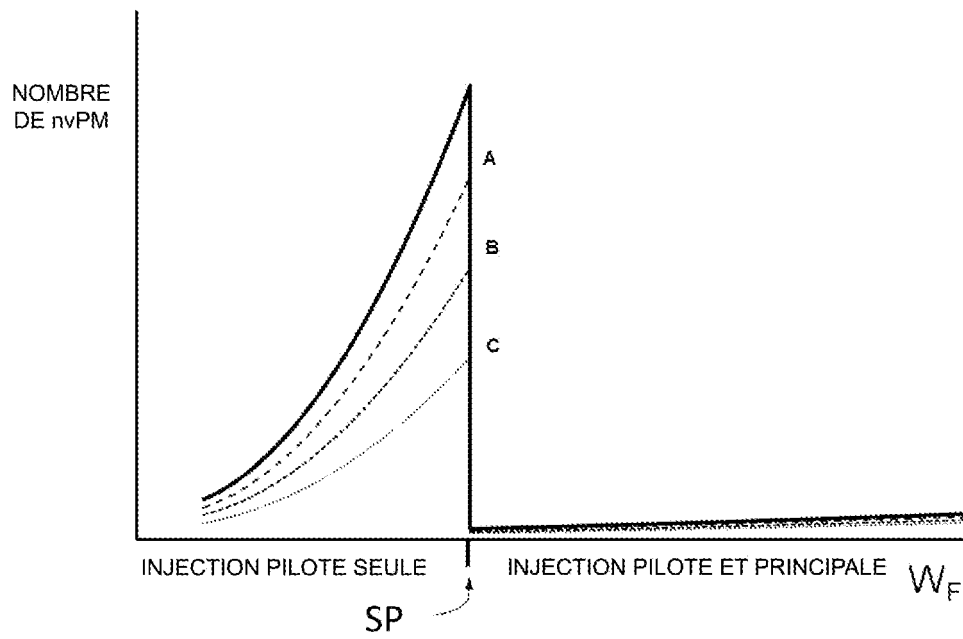
[Fig. 5]



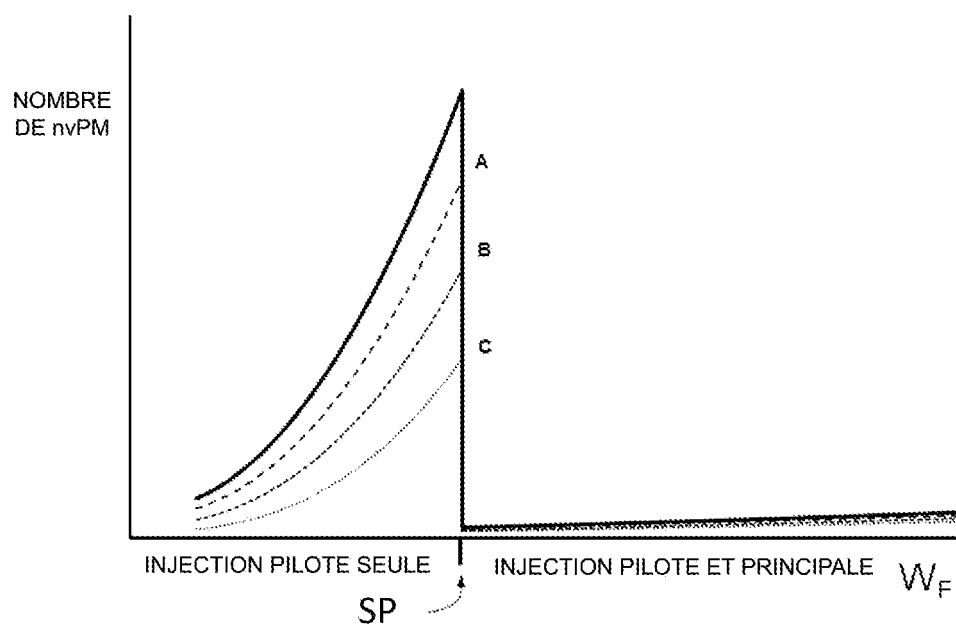
[Fig. 6]



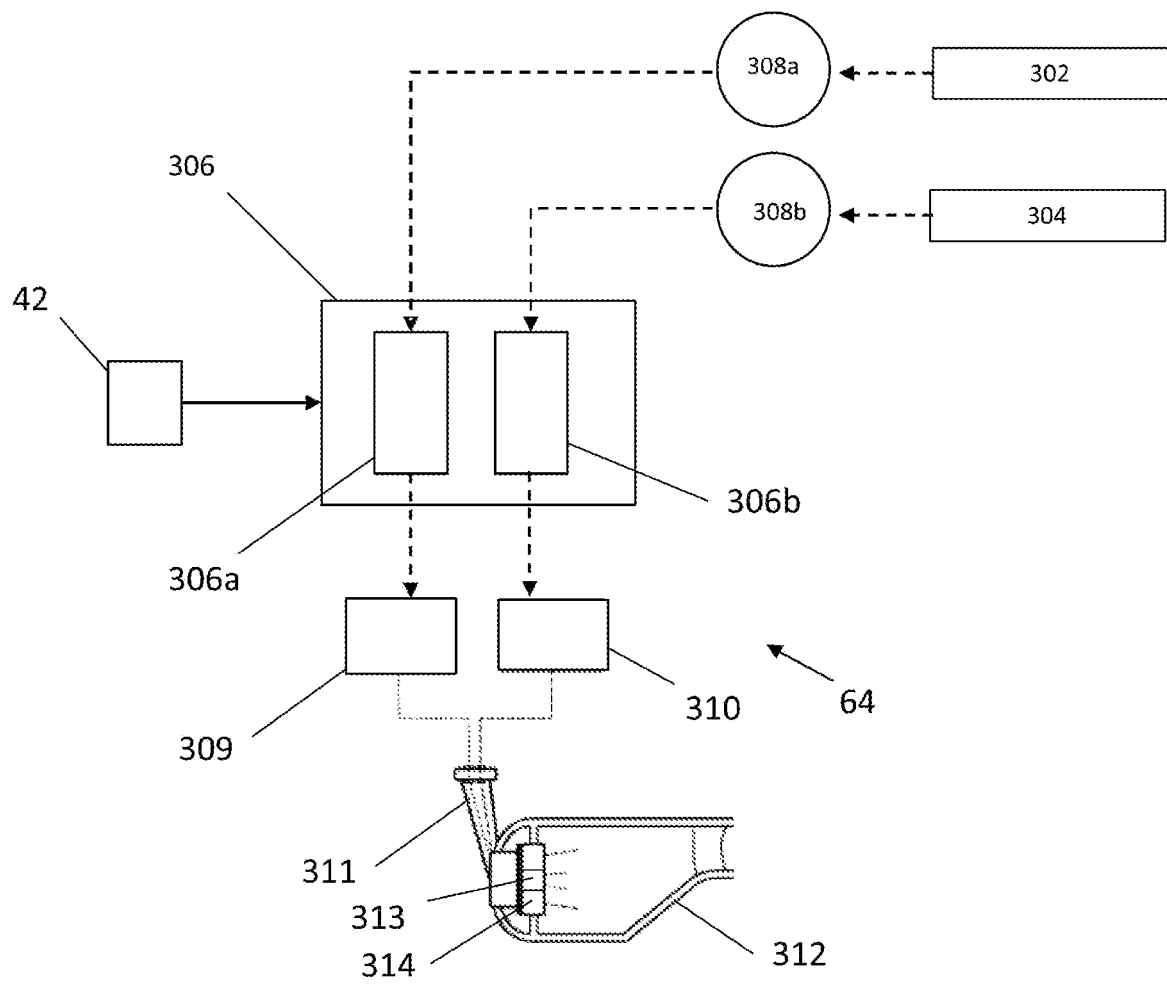
[Fig. 7]



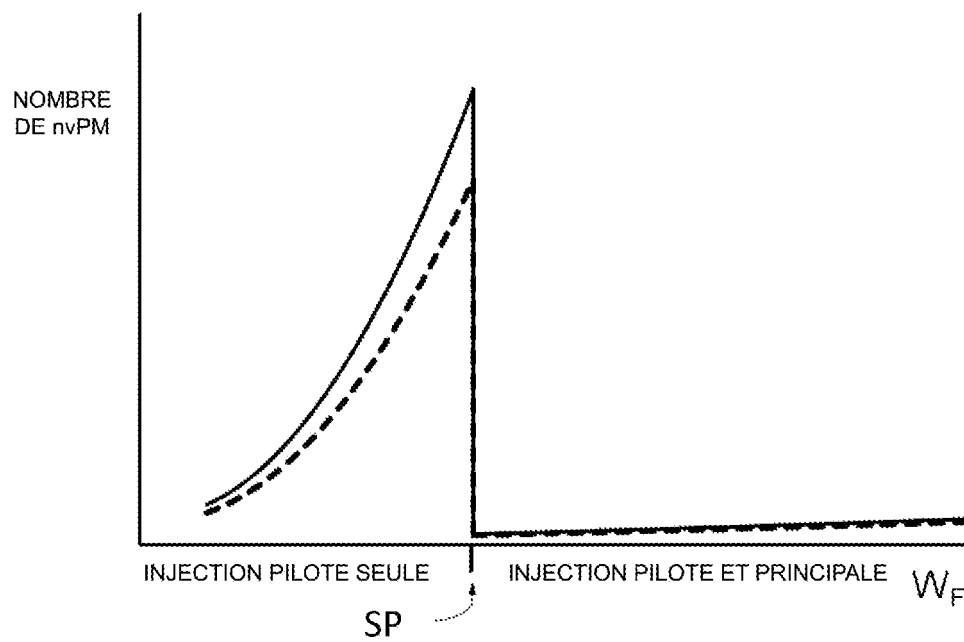
[Fig. 8]



[Fig. 9]

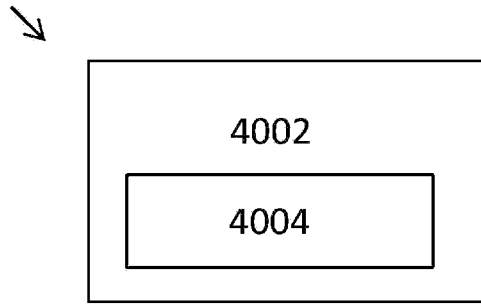


[Fig. 10]

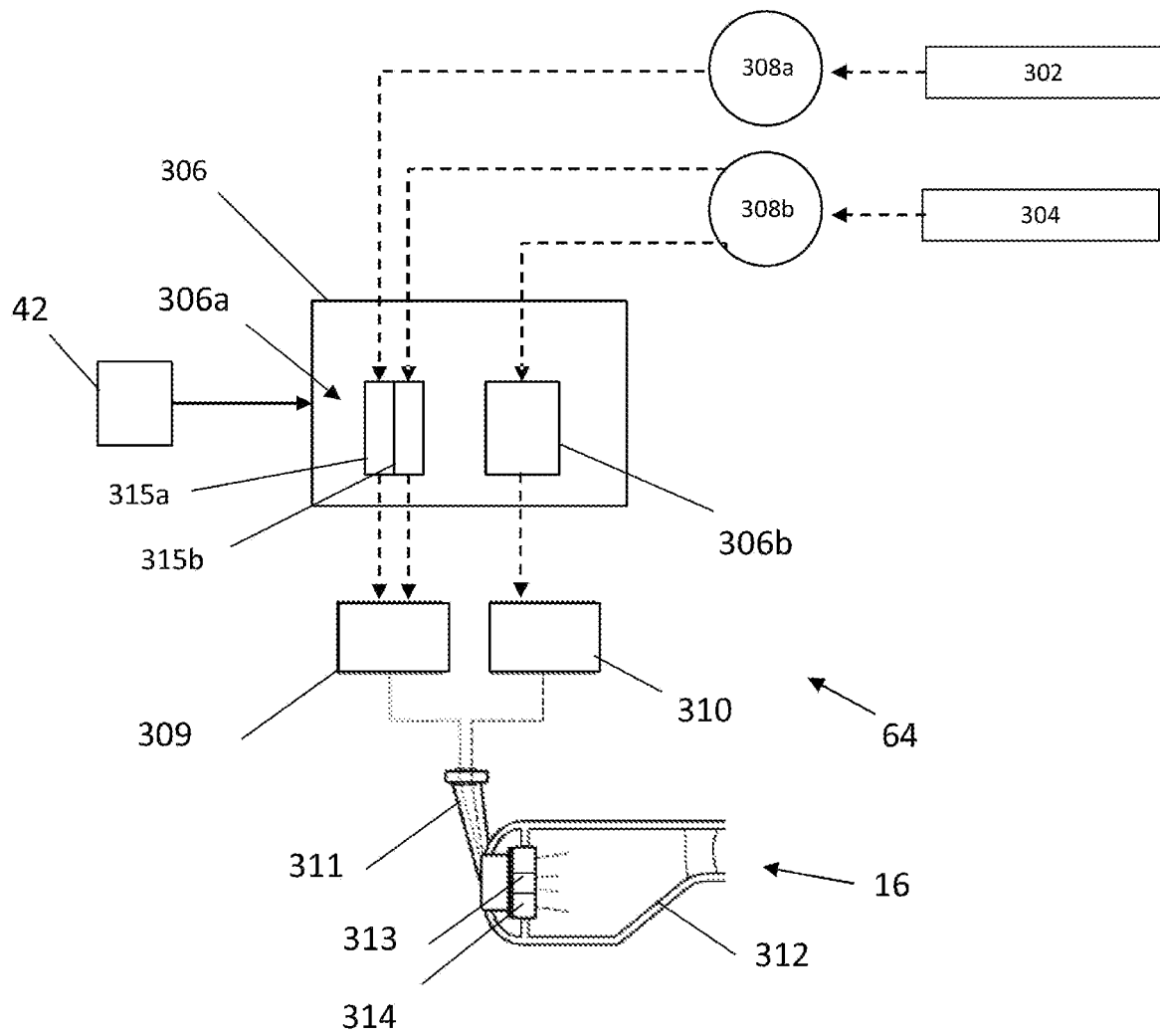


[Fig. 11]

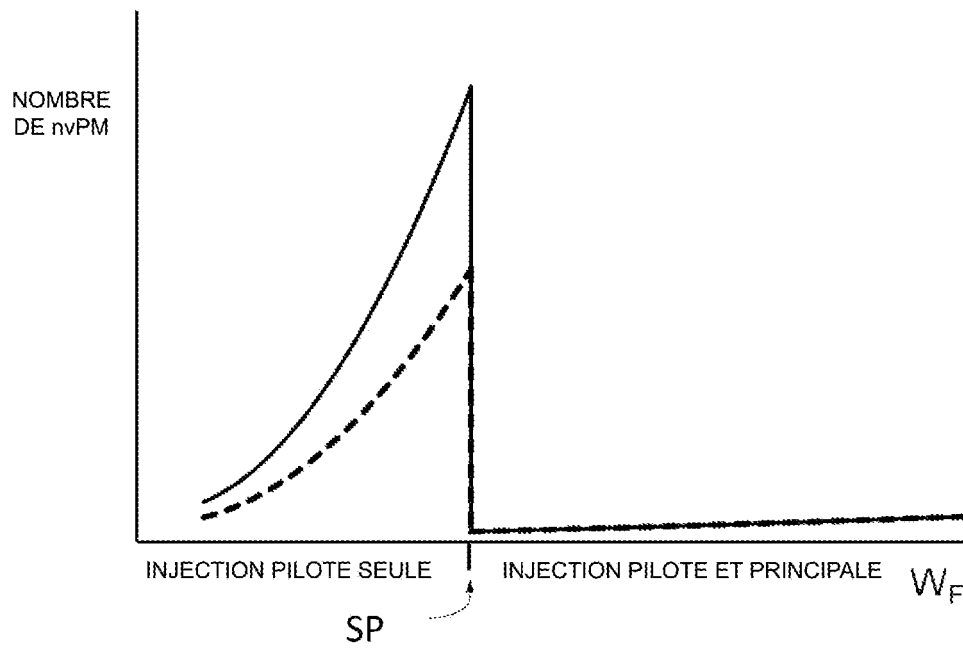
4000



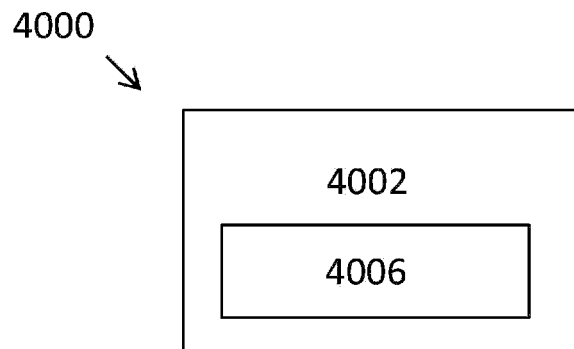
[Fig. 12]



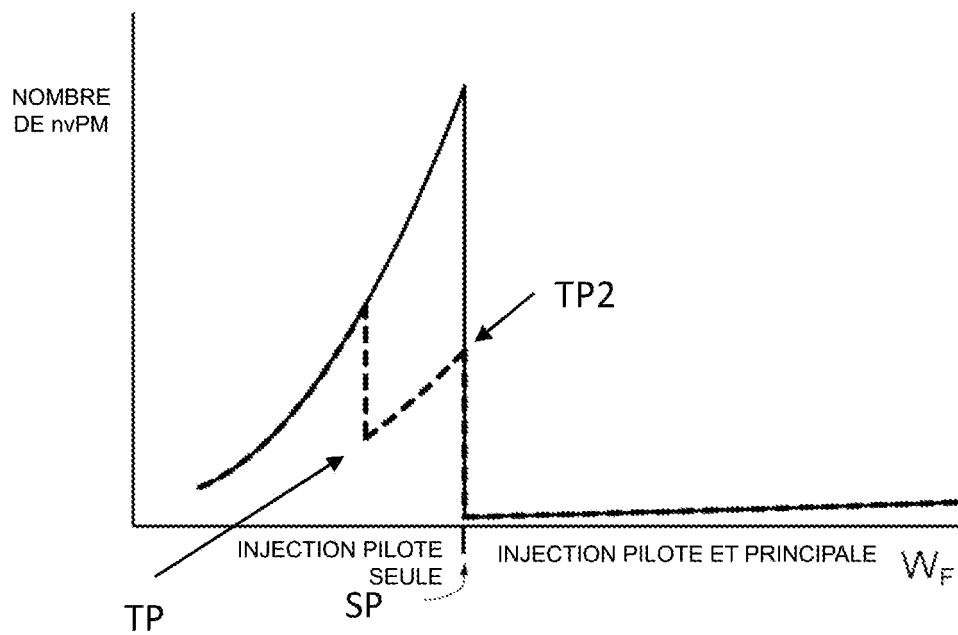
[Fig. 13]



[Fig. 14]

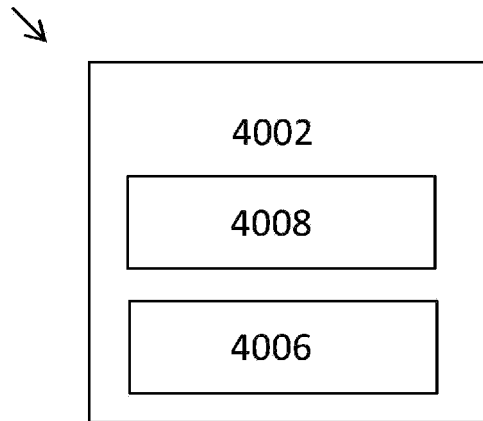


[Fig. 15]

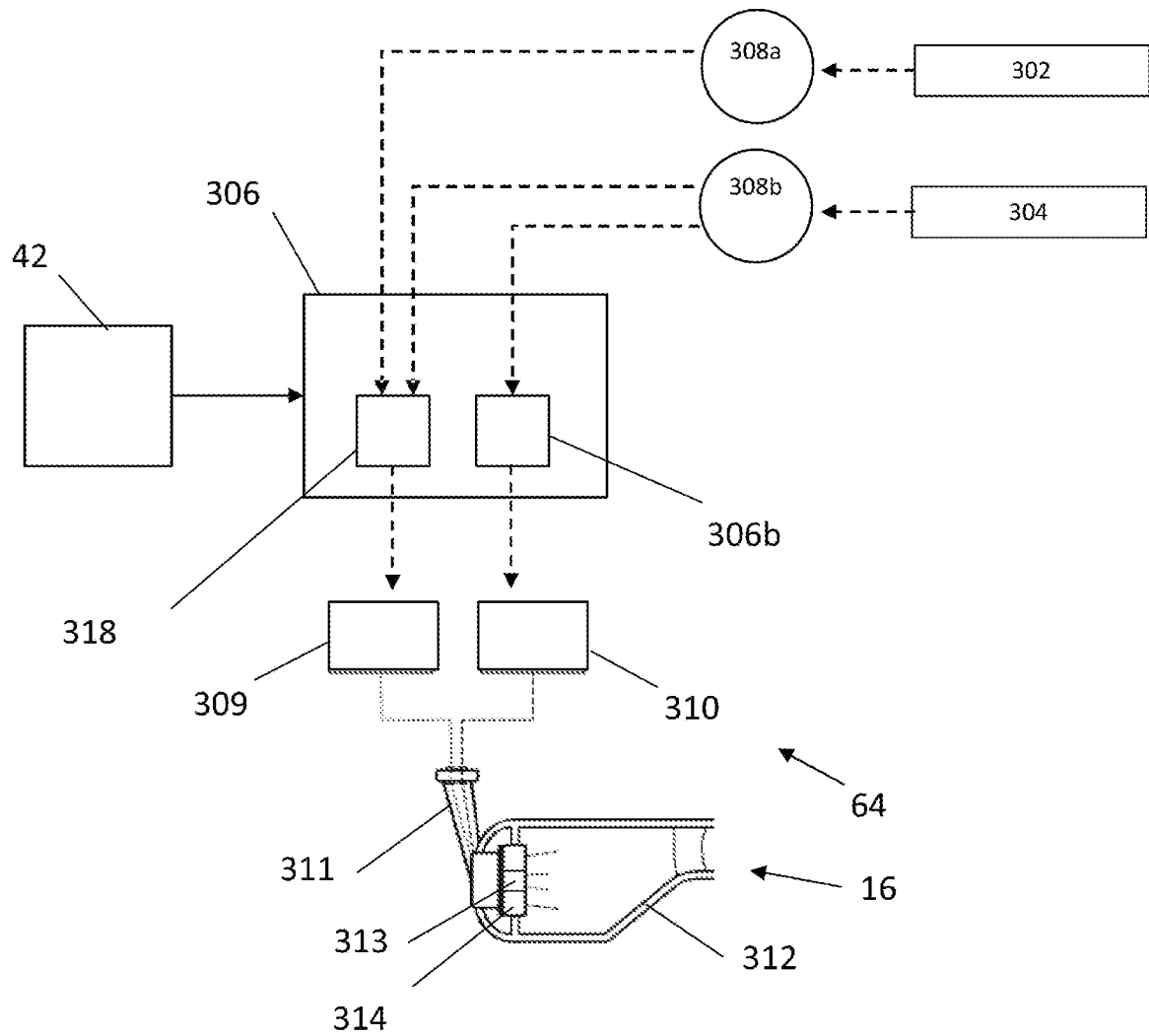


[Fig. 16]

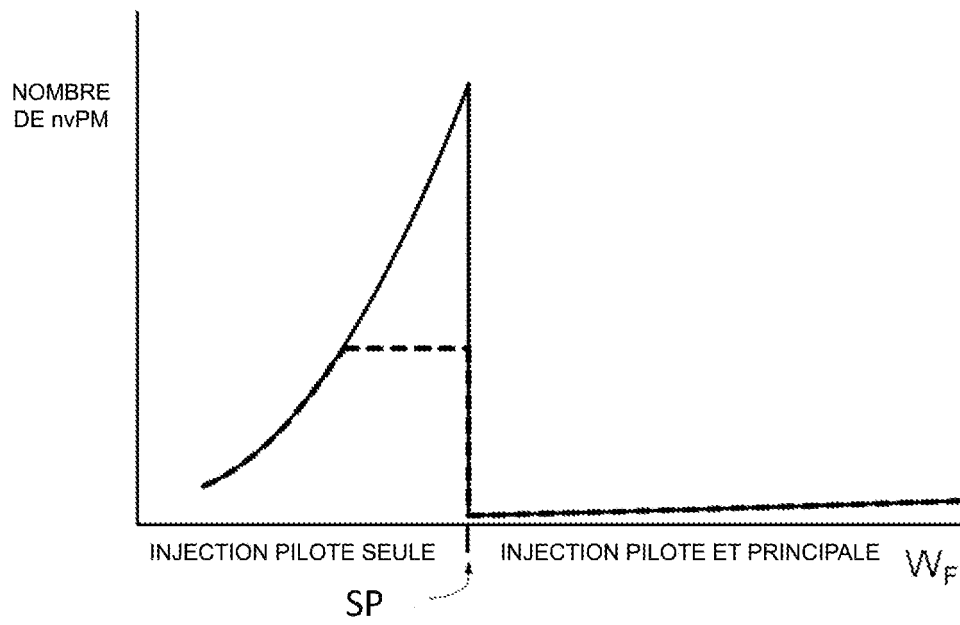
4000



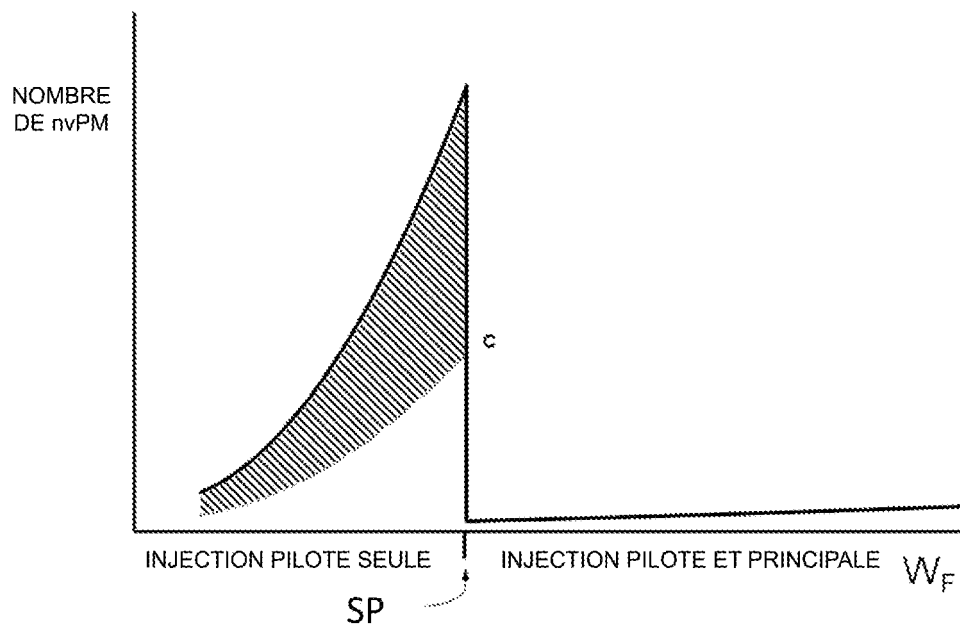
[Fig. 17]



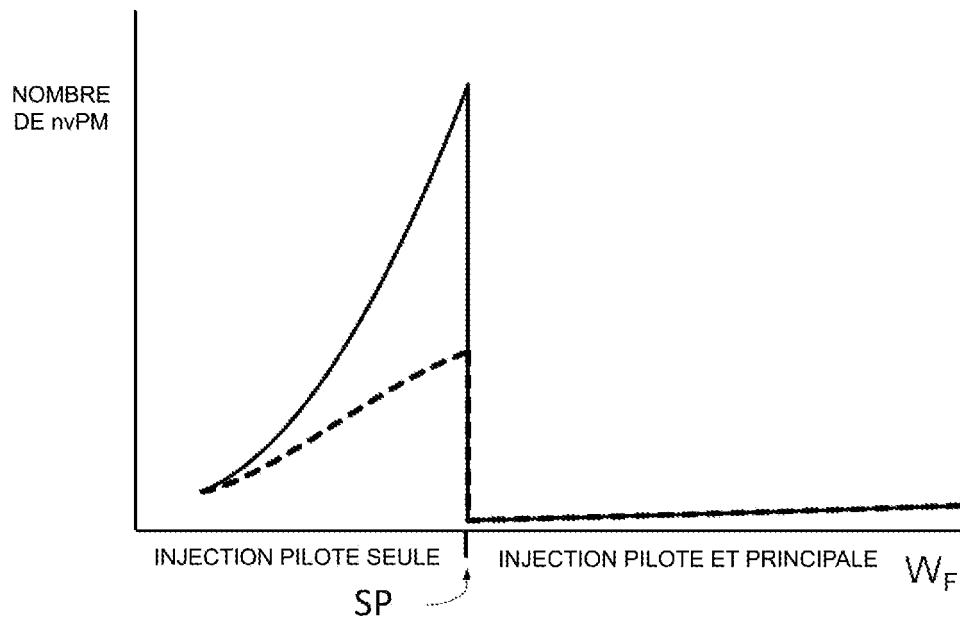
[Fig. 18]



[Fig. 19]

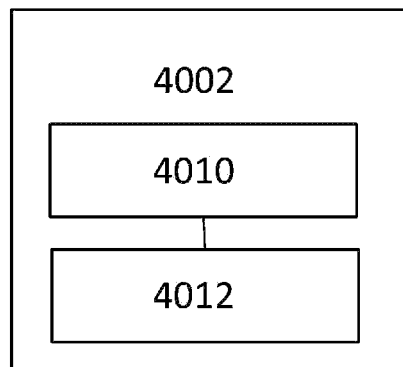


[Fig. 20]

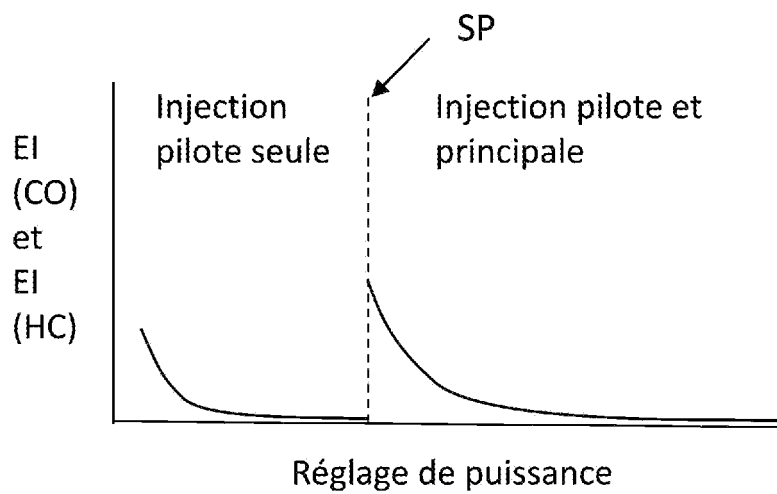


[Fig. 21]

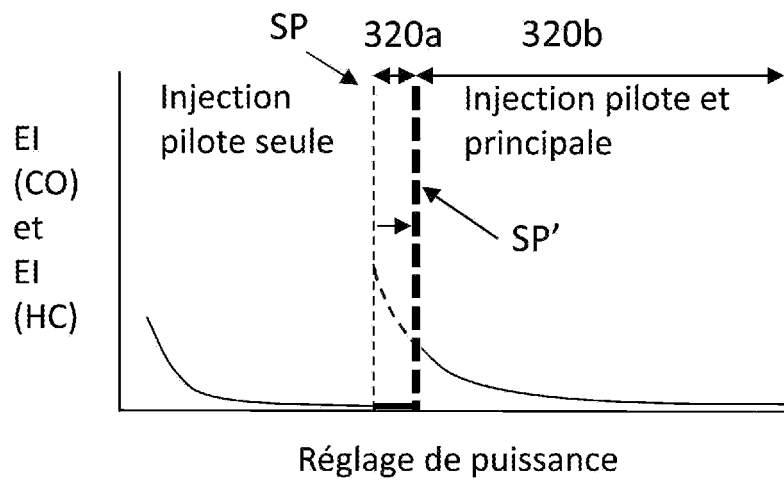
4000



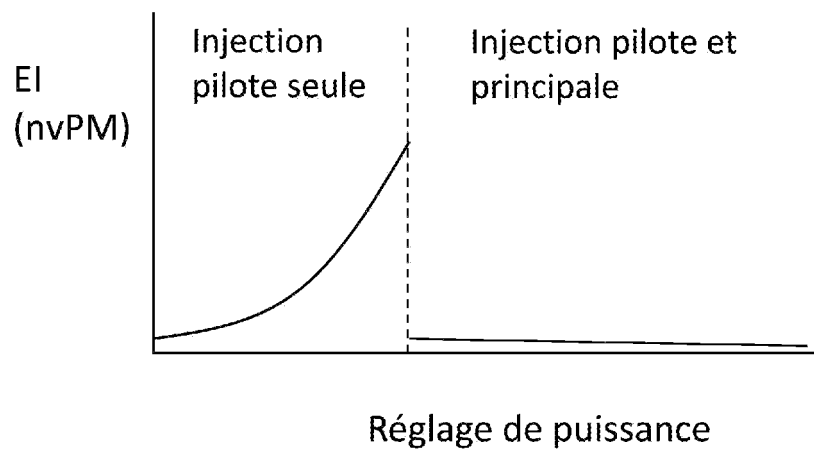
[Fig. 22]



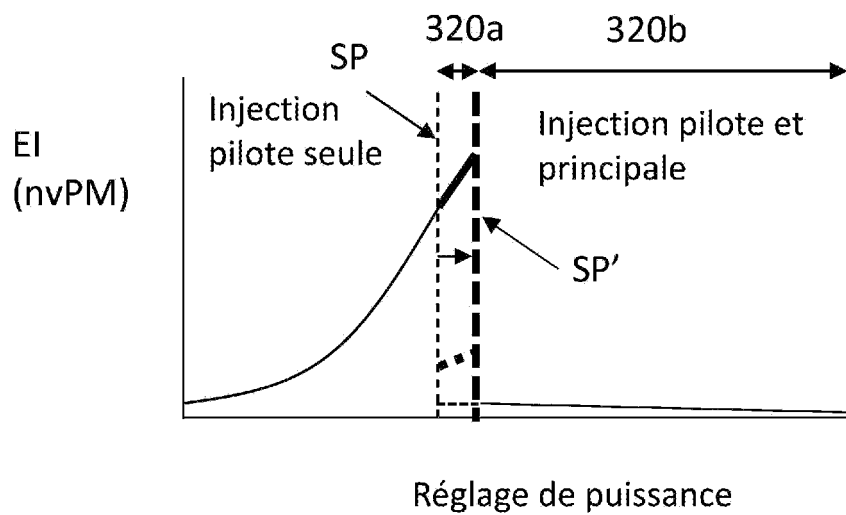
[Fig. 23]



[Fig. 24]

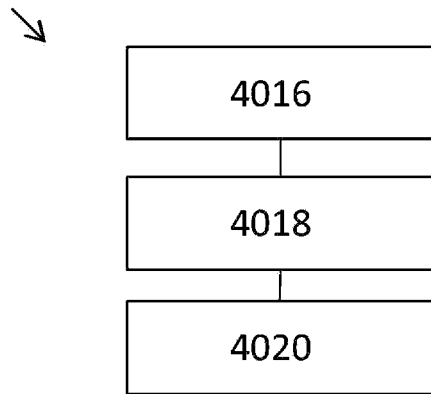


[Fig. 25]

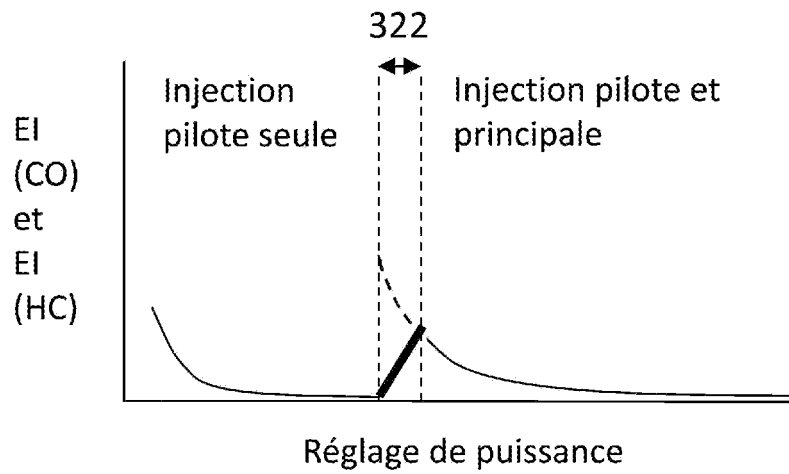


[Fig. 26]

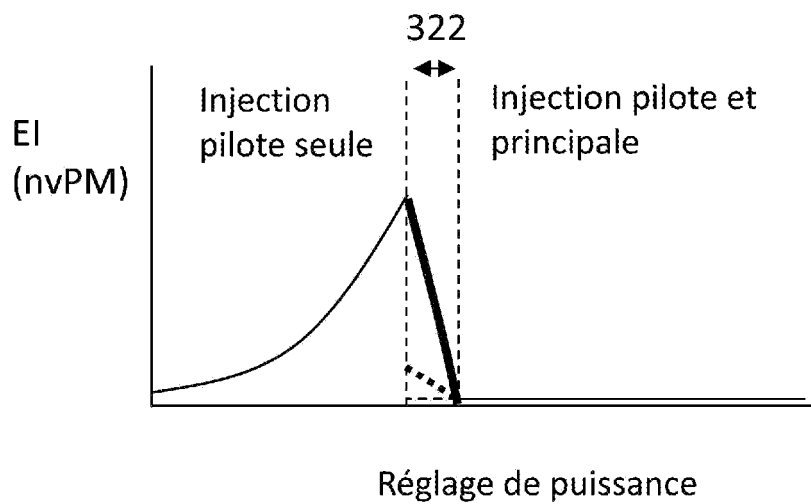
4014



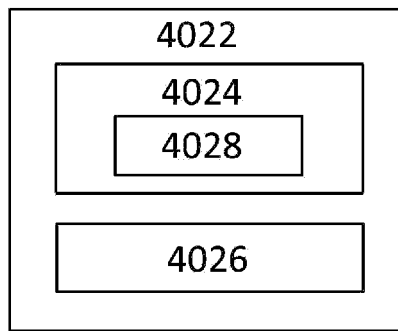
[Fig. 27]



[Fig. 28]

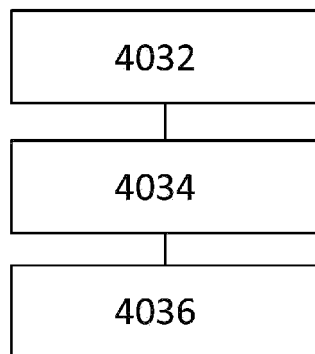


[Fig. 29]

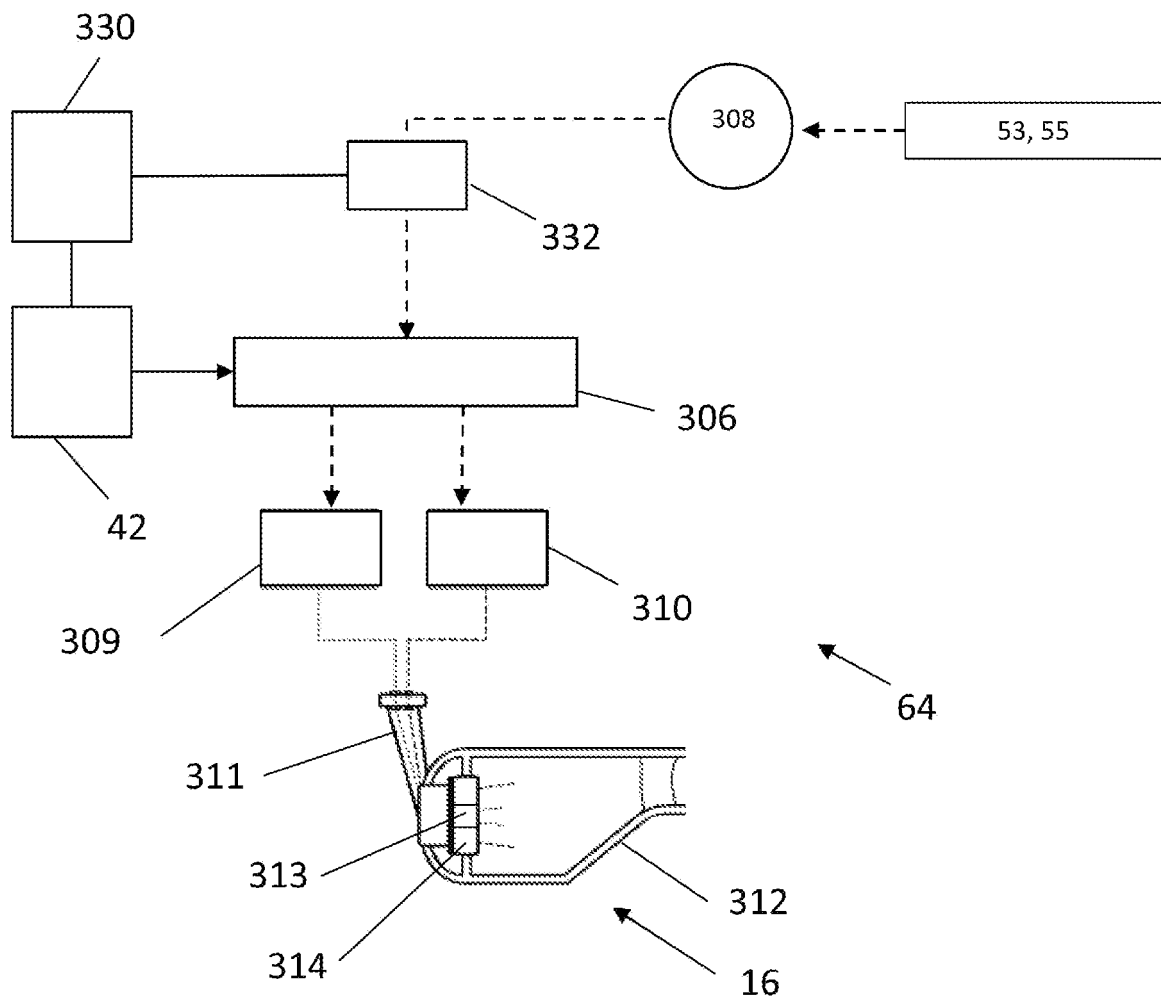


[Fig. 30]

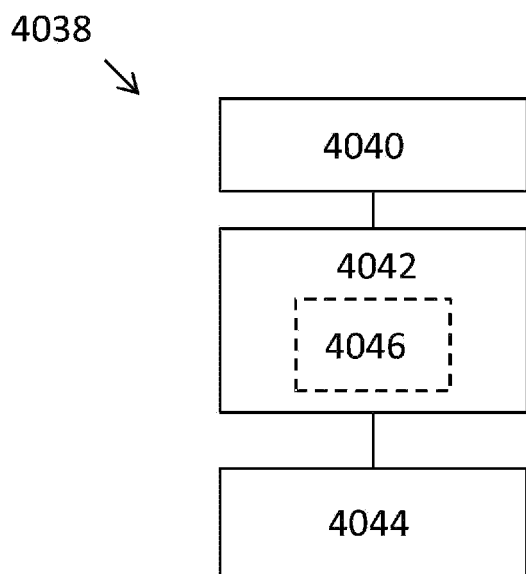
4030



[Fig. 31]

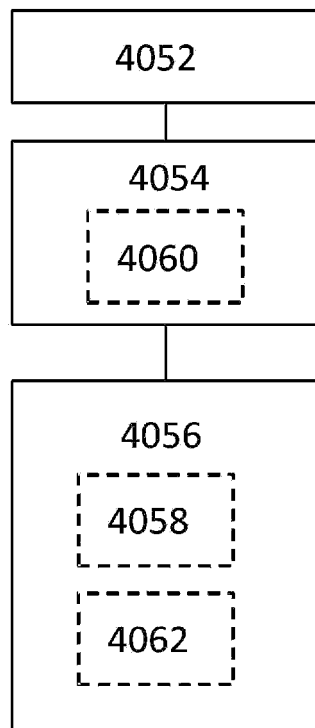


[Fig. 32]



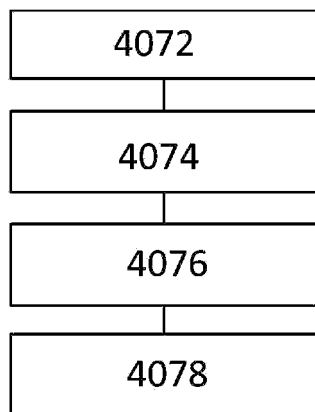
[Fig. 33]

4050



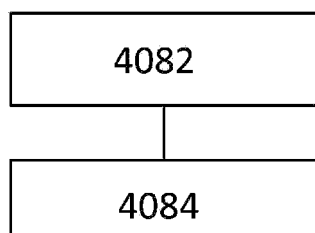
[Fig. 34]

4070

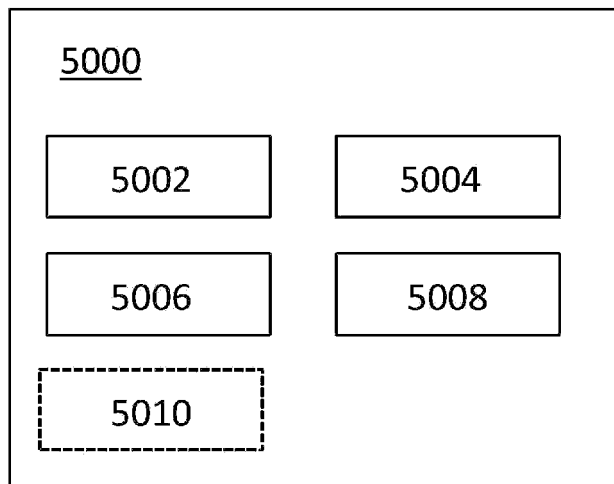


[Fig. 35]

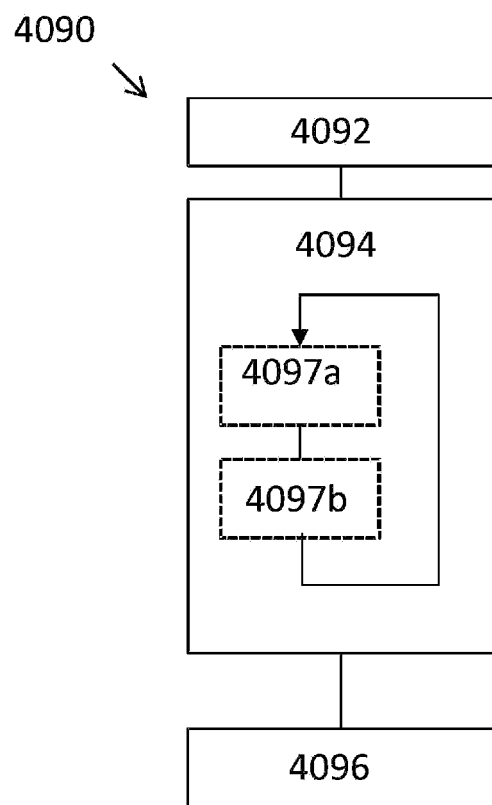
4080



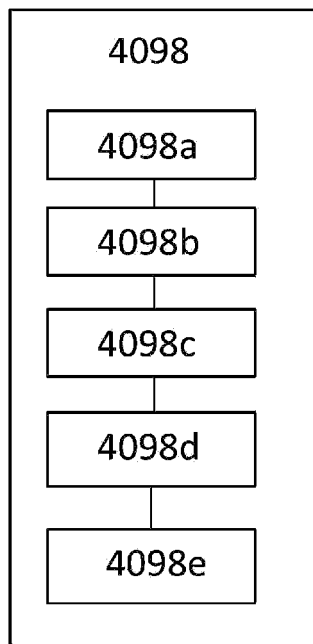
[Fig. 36]



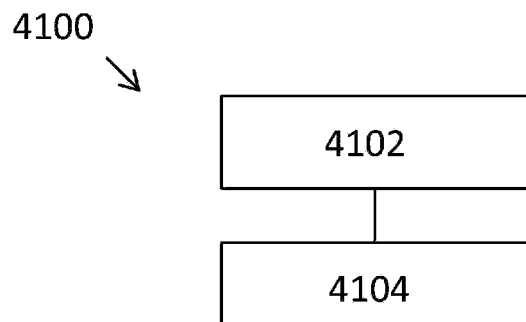
[Fig. 37]



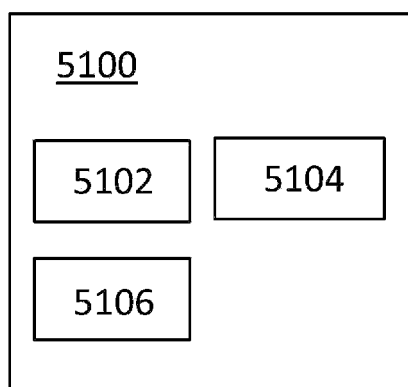
[Fig. 38]



[Fig. 39]



[Fig. 40]



[Fig. 41]

