

Carburant pour moteur à compression

Domaine de l'invention

Le domaine de l'invention est celui des carburants pour moteur à allumage par compression, plus particulièrement les moteurs pour applications maritimes. Le carburant de l'invention fait partie des nouveaux carburants à impact réduit sur l'environnement, par exemple ceux communément appelés « e-fuels » lorsqu'ils sont fabriqués à partir d'électricité bas carbone, d'hydrogène à faible empreinte carbone et/ou de CO₂. Ils sont considérés comme une solution pour la décarbonation des transports pour mobilité lourde et longue distance. Le carburant de l'invention essentiellement composé d'ammoniac fait ainsi partie des alternatives écologiques pour le remplacement du diesel et du fuel lourd. L'invention porte sur un carburant de type ammoniac, utilisé avec un carburant pilote, lequel assure un meilleur allumage et une combustion plus rapide et énergétique du carburant dans le moteur.

Etat de la technique

L'ammoniac (NH₃) représente une alternative à impact réduit sur l'environnement et un carburant renouvelable crédible pour remplacer prochainement le diesel et le fioul lourd pour le transport maritime. La combustion de NH₃ ne génère que de l'eau et de l'azote et aucune émission de molécules carbonées (CO₂, CO), ni de particules de suies. L'ammoniac est un composé dont la fabrication est éprouvée et commune ce qui rend ses utilisations, transport et stockage connus. C'est aussi un produit dont le coût reste assez raisonnable pour être utilisé comme carburant. L'ammoniac comme carburant a une densité énergétique utilisable dans des moteurs à inflammation compressive mais a un nombre de cétane faible. Son inflammation dans des moteurs de type diesel reste problématique surtout aux faibles régimes moteurs. L'ammoniac est stocké sous pression (~9 bars) à l'état liquide dans un réservoir et injecté à l'état liquide ou gazeux dans le moteur.

Différents moyens pour améliorer l'inflammation de l'ammoniac dans un moteur à inflammation par compression ont été décrits.

La demande de brevet US 2010/288211 décrit un procédé de préparation d'un mélange d'ammoniac et de fuel lourd destiné à être utilisé dans un moteur à combustion interne, comprenant : (i) la fourniture d'une alimentation en ammoniac à un module de dosage-mélange ; (ii) la fourniture d'une alimentation en fuel lourd au module de dosage-mélange ; (iii) le mélange d'un rapport prédéterminé des alimentations en fuel lourd et en ammoniac dans le module de dosage-mélange.

L'article scientifique « Ignition and combustion study of premixed ammonia using GDI pilot injection in CI engine », publié dans Fuel Volume 331, Part 1, 1 January 2023, 125768, décrit l'intérêt du n-heptane comme carburant pilote avec l'ammoniac. Le n-heptane est choisi en raison de sa faible viscosité (facilitant son injection) et son indice de cétane (53 à 56) proche de celui d'un carburant diesel commercial.

La demande de brevet US 2011/0259290 décrit un moteur à combustion fonctionnant avec un mélange d'ammoniac d'une substance hautement combustible brûlant plus facilement que l'ammoniac. La demande de brevet US 2022/056856 décrit un système de propulsion comprenant un moteur à piston pouvant fonctionner avec de l'ammoniac (NH_3) comme carburant principal, et un système d'allumage pilote configuré pour allumer un carburant pilote pour allumer un mélange d'air et d'ammoniac, le carburant pilote comprenant de l'hydrogène, des biocarburants et/ou des carburants fossiles.

Les demandes de brevets US 2011/0259290 et US 2022/056856 ne précisent aucunement les ratios massiques entre l'ammoniac et le carburant additionnel utilisé.

Sur un autre plan, dans le domaine des carburants hydrocarbonés diesels ou biodiesels à indice de cétane naturel bas (typiquement proche de 42 à 55), on connaît, de longue date, le nitrate de 2-éthylhexyle (NEH) utilisé comme additif d'amélioration de cétane du carburant diesel. Une valeur de cétane plus élevée assure une consommation de carburant plus faible, une réduction des particules et des émissions de NO_x , un démarrage plus rapide du moteur à froid, un cliquetis et un bruit de moteur réduits, ainsi qu'une réduction de l'usure du moteur. Le mécanisme réactionnel du NEH en présence d'un carburant hydrocarboné diesel a été étudié par exemple dans la publication scientifique « The Autoignition Behavior of Surrogate Diesel Fuel Mixtures and the Chemical Effects of 2-Ethylhexyl Nitrate (2-EHN) Cetane Improver » (vol. 108, section 4: Journal of fuels and lubricants (1999), pp. 1029-1045). Cet additif est produit de façon industrielle et largement utilisé dans les carburants diesels commercialisés. Plus de cinquante mille tonnes de NEH sont produites par an en Europe depuis les années 1980. D'autres nitrates d'alkyles peuvent aussi être utilisés comme additifs d'amélioration de l'indice de cétane de carburant diesel. L'effet d'amélioration de l'indice de cétane est obtenu pour une incorporation en nitrate d'alkyle dans le carburant diesel proche de 0,03% en masse.

Les additifs d'amélioration de cétane du carburant, tels que les nitrates d'alkyle, n'ont pas d'intérêt lorsque les carburants ont déjà un indice de cétane naturel élevé typiquement de plus de 60. Il faut aussi souligner qu'au-delà d'une valeur de 67, les nombres de cétane restent difficiles à mesurer avec les méthodes standards de mesure en référence à la norme EN 16715.

Résumé de l'invention

La présente divulgation apporte une solution pour améliorer l'inflammation et la combustion de l'ammoniac dans des moteurs standards en utilisant en de très faibles proportions par rapport au carburant, un carburant pilote constitué d'un hydrocarbure à forte réactivité (à haut indice de cétane, supérieur à 60) renfermant un additif du type nitrate d'alkyle, tel que le nitrate de 2-Ethylhexyle (2-EHN ou NEH). La Fraction Energétique du carburant Pilote (PEF : « Pilot fuel Energetic Fraction) ajoutée au carburant principal ammoniac représente de 0,1% à 5% de la totalité du carburant (ammoniac + carburant pilote).

La PEF d'un carburant pilote est calculée selon la formule suivante :

$$PEF = \frac{m_{carb.} * PCI_{carb.}}{m_{carb.} * PCI_{carb.} + m_{NH_3} * PCI_{NH_3}}$$

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

$m_{carb.}$: masse du carburant pilote.

m_{NH_3} : masse du carburant principale (ammoniac).

Le pouvoir calorifique inférieur du carburant pilote est dépendant de la nature du carburant pilote et donc le pourcentage massique du carburant pilote par rapport à l'ammoniac correspondant au PEF varie en fonction de la nature du carburant pour des PEF équivalents. Par exemple pour un PEF de 1% si le carburant pilote est l'HVO (acronyme de l'expression anglaise « Hydrotreated Vegetable Oil »), le pourcentage massique HVO sur ammoniac sera d'environ 0,52%. Il est inattendu qu'une très faible fraction énergétique de carburant pilote puissent être très efficacement utilisée pour améliorer, voire permettre, l'allumage et la combustion d'un carburant principalement constitué d'ammoniac, à chaud comme à froid. La faible proportion de carburant pilote ajouté est avantageuse pour limiter l'émission de produits de combustion à effet de serre. L'hydrocarbure à indice de cétane élevé et l'additif du type nitrate d'alkyle, constituant le carburant pilote, agissent donc en synergie pour améliorer la combustion de l'ammoniac.

Brève description des figures

La figure 1 montre la pression mesurée dans une chambre de combustion rapportée à l'angle de vilebrequin (CA), avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué de dodécane renfermant 0%, 1% et 10% en masse de NEH.

La figure 2 montre la température mesurée dans une chambre de combustion rapportée à l'angle de vilebrequin (CA), avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué de dodécane renfermant 0%, 1% et 10% en masse de NEH.

La figure 3 montre le dégagement de chaleur mesuré dans une chambre de combustion rapporté à l'angle de vilebrequin (CA), avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué de dodécane renfermant 0%, 1% et 10% en masse de NEH.

La figure 4 montre la pression mesurée dans une chambre de combustion rapportée à l'angle du vilebrequin (CA) pour des démarrages à froid (30°C) et à chaud (80°C) avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué de dodécane renfermant 10% en masse de NEH.

La figure 5 montre la température mesurée dans une chambre de combustion rapportée à l'angle du vilebrequin (CA) pour des démarrages à froid (30°C) et à chaud (80°C) avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué de dodécane renfermant 10% en masse de NEH.

La figure 6 montre la pression mesurée dans une chambre de combustion rapportée à l'angle de vilebrequin (CA), avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué d'HVO renfermant 0%, 1% et 10% en masse de NEH.

La figure 7 montre la température mesurée dans une chambre de combustion rapportée à l'angle de vilebrequin (CA), avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué d'HVO renfermant 0%, 1% et 10% en masse de NEH.

La figure 8 montre le dégagement de chaleur mesuré dans une chambre de combustion rapportée à l'angle de vilebrequin (CA), avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué d'HVO renfermant 0%, 1% et 10% en masse de NEH.

La figure 9 montre la pression mesurée dans une chambre de combustion rapportée à l'angle (CA) du vilebrequin pour des démarrages à froid (30°C) et à chaud (80°C) avec une injection pour un CA = -10° d'un carburant pilote constitué d'HVO renfermant 30% en masse de NEH.

Description de l'invention

La présente divulgation concerne un carburant pour moteur à combustion, notamment un moteur à inflammation par compression, utilisant de l'ammoniac comme carburant principal additionné d'un carburant pilote, ledit carburant pilote étant constitué d'un hydrocarbure ayant un indice de cétane supérieur à 60 et contenant environ 0,02% à environ 30,0% en masse d'un additif constitué d'un nitrate d'alkyle ou d'un mélange de nitrates d'alkyle. Dans certains modes de réalisation, l'hydrocarbure ayant un indice de cétane supérieur à 60 contient environ 0,5% à environ 30,0% en masse, ou encore environ 1,0 % à environ 30,0% en masse, ou encore environ 1,0% à environ 20,0% en masse, ou encore environ 1,0% à environ 10,0% en masse, de l'additif constitué d'un nitrate d'alkyle ou d'un mélange de nitrates d'alkyle.

Comme indiqué ci-dessus, le carburant pour moteur à combustion conforme à l'invention comprend de l'ammoniac comme carburant principal, à raison d'environ 95,00% à environ 99,75% en masse.

Comme expliqué ci-après, le carburant pilote est injecté dans la chambre de combustion d'un
5 moteur à inflammation avant ou après l'apport d'ammoniac. Dans certains modes de réalisation, le carburant ainsi formé (ammoniac + carburant pilote) comprend environ 0,25% à environ 5,0% en masse de carburant pilote, par rapport à la masse totale du carburant (ammoniac + carburant pilote). Dans certains modes de réalisation, lorsque la somme de la quantité d'ammoniac et de la quantité de carburant pilote n'est pas égale à 100% en masse,
10 le complément à 100% est apporté au carburant par un ou plusieurs autres additifs, comme par exemple des additifs avec des fonctions de lubrification, anticorrosion ou de détergence. Ce ou ces additif(s) peut être contenu dans le carburant pilote, ou peu(ven)t être amené(s) séparément dans la chambre de combustion.

L'hydrocarbure du carburant pilote est obtenu à partir de la distillation du pétrole ou obtenu
15 par moyen de synthèse à partir de matières premières renouvelables. Le carburant pilote peut aussi être une matière pure dans la famille des alcanes linéaires ou branchés.

Dans certains modes de réalisation, ledit hydrocarbure du carburant pilote ayant un nombre de cétane élevé (> 60) est choisi parmi au moins l'un des composés suivants :

- 20 - un carburant diesel à faible taux en aromatiques ($<10\%$) et en polyaromatiques ($<10\%$),
- une huile végétale hydrotraitée HVO (ou diesel renouvelable à partir d'huiles usagées ou diesel renouvelable à partir de graisses animales), par exemple du type du carburant HVO 100 commercialisé par la société TotalEnergies,
- un iso-alcane, par exemple un mélange d'isoparaffines de type Isane Biolife
25 commercialisé par la société TotalEnergies),
- un n-alcane, tel le dodécane,
- un carburant d'Aviation Durable (CAD ou SAF – acronyme anglais pour "sustainable aviation fuels" - selon les normes établie par « Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation », dépendant de l'OACI/ONU).

30 Dans certains modes de réalisation, l'hydrocarbure du carburant pilote est choisi parmi une huile végétale hydrotraitée ; un n-alcane, en particulier le dodécane ; et leurs mélanges.

Ledit additif renfermé pour environ 0,02% à environ 30,0 % dans le carburant pilote, représente de environ 0,0002% à environ 1,5 % en masse totale du carburant.

L'additif additionné au carburant pilote est constitué d'un nitrate d'alkyle ou d'un mélange de
35 nitrates d'alkyle choisi parmi les nitrates d'alkyle linéaire, ramifié ou cyclique. Dans certains

modes de réalisation, le nitrate d'alkyle est choisi parmi les nitrates d'alkyle linéaire comportant 4 à 36, avantageusement 4 à 24 atomes de carbone, les nitrates d'alkyle ramifié comportant 4 à 36, avantageusement 4 à 24 atomes de carbone, les nitrates d'alkyle cyclique (ou nitrates de cycloalkyle) comportant 5 à 18 atomes de carbone, et leurs
5 mélanges. Dans certains modes de réalisation, ledit nitrate d'alkyle est choisi parmi le nitrate de 2-éthylhexyle, le nitrate de cyclohexyle, le nitrate de dodécyle, le nitrate de n-nonyle, le nitrate de 2-tétradecyl-1-octadécyle, le nitrate d'iso-nonyle, le nitrate d'hexyle, le nitrate de 2-octyle, le nitrate d'isononyle, le nitrate de 2-propylheptyle, un mélange de nitrates d'alkyle ramifié en C₉-C₁₃, et leurs mélanges. Dans certains modes de réalisation, le nitrate d'alkyle
10 est le nitrate de 2-éthylhexyle seul ou en mélange avec un ou plusieurs autres nitrates d'alkyle tels que définis ci-dessus, avantageusement le nitrate d'alkyle est- le nitrate de 2-éthylhexyle seul.

Les mélanges de nitrates d'alkyle ramifié en C₉-C₁₃ peuvent être obtenus à partir des mélanges correspondants d'alcools ramifiés en C₉-C₁₃, par exemple les alcools disponibles
15 auprès de la société Exxon sous la dénomination commerciale Exxal™. A titre indicatif, on peut préparer un mélange d'au moins deux alcools ramifiés choisis parmi un alcool ramifié en C₉, un alcool ramifié en C₁₀, un alcool ramifié en C₁₁, un alcool ramifié en C₁₂ et un alcool ramifié en C₁₃, puis synthétiser le mélange de nitrates d'alkyle correspondant.

Le carburant constitué d'ammoniac, de carburant pilote et éventuellement d'additif(s) peut
20 être utilisé dans un moteur (notamment un moteur à combustion), par exemple un moteur de véhicule (tel que voiture, poids lourd, tracteur, etc.), ou de navire (tel que pétrolier, porte-conteneurs, etc.). Un aspect de la présente divulgation concerne donc un moteur de véhicule ou de navire comprenant un carburant tel que défini ici. La présente divulgation concerne aussi un véhicule ou navire comprenant un moteur tel que défini ici.

25 L'ammoniac en général est injecté dans la chambre de combustion du moteur sous forme liquide ou admis dans la chambre de combustion en phase gazeuse, prémélangé ou non avec l'air à l'admission.

Le carburant pilote et l'ammoniac (sous forme liquéfiée) sont stockés séparément. Le carburant pilote est injecté dans le chambre de combustion avant l'apport d'ammoniac, ou
30 après l'apport d'ammoniac (plus particulièrement injecté après l'apport d'ammoniac admis en phase gazeuse prémélangé avec l'air comme dans les exemples 1 et 2 ci-après) ou co-injecté avec l'ammoniac via un système d'injection double.

Selon un aspect, la présente divulgation concerne ainsi un procédé d'obtention du carburant tel que défini ici, qui comprend le mélange, dans la chambre de combustion du moteur, de
35 carburant pilote (tel que défini ici) et d'ammoniac liquéfié ou gazeux prémélangé ou non

avec l'air d'admission. Dans certains modes de réalisation, le carburant pilote est co-injecté avec l'ammoniac via un système d'injection double dans la chambre de combustion. Dans certains modes de réalisation, le carburant pilote est injecté dans la chambre de combustion en avance par rapport à l'admission ou l'injection d'ammoniac. Dans certains modes de réalisation, le carburant pilote est injecté dans la chambre de combustion après l'admission ou l'injection de l'ammoniac.

L'injection du carburant pilote aide l'inflammation de l'ammoniac qui peut être difficile voire impossible dans certaines conditions moteur (telles que la richesse, la température ou la charge).

10 L'utilisation de carburant pilote, telle que définie dans la présente divulgation, assure des performances d'allumage et de combustion améliorées par rapport à l'ammoniac seul, et aide à assurer un allumage à froid.

Selon un aspect, la présente divulgation concerne donc l'utilisation du carburant pilote tel que défini ici, à raison de 0,25 % à 5,0% en masse dans un carburant comprenant d'environ 15 95,00% à environ 99,75% en masse d'ammoniac, comme agent d'amélioration de l'allumage dudit carburant. La présente divulgation concerne également une méthode pour améliorer l'allumage, dans un moteur, d'un carburant comprenant d'environ 95,00% à environ 99,75% en masse d'ammoniac, méthode qui comprend l'ajout à l'ammoniac d'un carburant pilote tel que défini ici à raison de 0,25 % à 5,0% en masse.

20 Selon un aspect, la présente divulgation concerne un moteur de véhicule ou de navire contenant (fonctionnant avec) un carburant tel que défini ci-dessus.

Selon un aspect, la présente divulgation concerne un véhicule ou navire comprenant un moteur tel que défini ci-dessus.

La présente divulgation est illustrée par les exemples ci-après, donnés à titre indicatif.

25 **Exemples**

Des tests de performance de carburants conformes à la présente divulgation ont été réalisés avec un moteur à allumage par compression à réactivité contrôlée (de type « RCCI »). Le fonctionnement d'un moteur en mode RCCI consiste à enflammer un carburant faiblement réactif par l'apport énergétique d'un carburant à haute réactivité. Le carburant faiblement réactif, injecté ou admis en indirecte entre dans le moteur lors de la phase d'admission. Le carburant à haute réactivité, présent en faible quantité dans le mélange global est, à l'image d'un moteur à allumage par compression, injecté directement dans le cylindre en une ou plusieurs injections. Cela implique un prémélange à l'admission d'un carburant faiblement réactif avec de l'air, où la richesse est alors connue, enflammé par une ou des injections directes d'un carburant à haute réactivité en faible quantité. De ce fait, chaque point est

indépendamment contrôlable : richesse de prémélange, conditions du mélange faiblement réactif (température, pression) et injection(s) du carburant hautement réactif (pression, durée, phasage).

Les études avec un moteur RCCI permettent de définir de manière appropriée les réactivités des charges de carburant, leurs quantités relatives, leur synchronisation et leur combustion peuvent être adaptées pour obtenir un fonctionnement optimal.

Les données expérimentales relevées pour les différents exemples sont données pour une Pression Moyenne Indiquée (PMI) et une richesse (Air/NH₃) imposées.

La Pression Moyenne Indiquée (PMI) correspond à la pression moyenne dans le cylindre due à la combustion du carburant. Elle représente le travail fourni par cette combustion rapporté à la cylindrée du moteur.

Les données expérimentales mesurées dans la chambre de combustion sont :

- P : la pression dans la chambre de combustion.
- T : Température dans la chambre de combustion.

15 - Q : la chaleur produite par la combustion

Ces données expérimentales sont rapportées en fonction de l'angle CA (« Crank angle) du vilebrequin (CA = 0° ⇔ Point Mort Haut (PMH))

Pour les exemples 1 et 2, le carburant pilote est injecté pour un angle CA = -10° après l'apport d'ammoniac admis en phase gazeuse prémélangé avec l'air.

20 **Exemple 1**

Dans cet exemple, le carburant pilote est le dodécane (à indice de cétane > 67) seul (0% de nitrate de 2-éthylhexyle) ou renfermant pour 1% ou 10% en masse de nitrate de 2-éthylhexyle (NEH). Le carburant principal est de l'ammoniac.

La quantité de carburant pilote injectée correspond à un PEF de 2% en apport énergétique par rapport à l'apport global énergétique du mélange ammoniac + carburant pilote. La fraction massique du carburant pilote rentrant dans le total du carburant (ammoniac + carburant pilote) est de 0,9%.

Fonctionnement en régime établi à chaud (température d'admission = 80°C)

Le point de fonctionnement du moteur correspond à une PMI de 3 bars pour une richesse Air/NH₃ de $\Phi = 0,7$ avec une température d'admission de 80°C. Les données expérimentales sont recueillies après au moins 200 cycles de fonctionnement du moteur

Dans ces conditions de fonctionnement, l'ammoniac utilisé seul sans carburant pilote ne parvient pas à s'enflammer.

En référence aux figures 1, 2 et 3, on constate que :

- Lorsque le carburant pilote est constitué de dodécane sans NEH, un premier pic de pression à lieu presque au PMH (la compression du mélange, $CA = 0^\circ$) et un second autour de 20° , les pics de dégagement de chaleur dûs à la combustion amorcée et d'augmentation de température sont observés pour environ un angle $CA = 5^\circ$.

5 - Lorsque le carburant pilote est constitué de dodécane renfermant 1% en masse de NEH, la pression augmente de façon continue après environ un angle $CA=0^\circ$. On observe un très léger palier mais la pression continue à augmenter jusqu'à environ un angle $CA = 20^\circ$. La combustion est amorcée pour environ un angle $CA = 0^\circ$ avec une production de chaleur et une augmentation de température.

10 - Lorsque le carburant pilote est constitué de dodécane renfermant 10% en masse de NEH, on observe une augmentation continue de pression dans la continuité du pic de pression dû à la compression jusqu'à un niveau plus élevé que celui observé pour le carburant pilote renfermant 1% de NEH. L'amorçage de la combustion débute donc presque à un angle CA environ égal $-2,5^\circ$. Cette avance de l'amorçage de production de chaleur est aussi visible sur
15 la courbe de température et de chaleur dégagée en fonction du CA .

En conclusion, l'injection du carburant pilote de type alcane à haute réactivité (à indice de cétane élevé), le dodécane dans le présent exemple, renfermant jusqu'à 10% de NEH conduit à gain significatif du délai d'amorçage, de la combustion et de la chaleur produite.

Le même type d'essai conduit avec un carburant pilote dodécane renfermant 30% en masse
20 de NEH ne montre pas de différence significative avec celui réalisé avec un carburant pilote dodécane renfermant 10% en masse de NEH.

Démarrage à froid et à chaud

L'intérêt du carburant pilote de l'invention a aussi été démontré en ce qui concerne l'allumage à froid du carburant. Le point de fonctionnement du moteur correspond à une PMI
25 d'environ 8,5 bars pour une richesse air/ NH_3 de $\Phi = 1$ avec une température d'admission de $80^\circ C$ à chaud et de $30^\circ C$ à froid.

Dans ces conditions de fonctionnement, à froid, pour une température d'admission de $30^\circ C$, il n'y a pas d'amorçage de la combustion pour :

- l'ammoniac seul,
- 30 - l'ammoniac + carburant pilote constitué de dodécane seul (ne renfermant pas de NEH),
- l'ammoniac + carburant pilote constitué de dodécane renfermant 1% en masse de NEH.

En référence aux figures 4 et 5, on constate un amorçage en combustion à chaud comme à
35 froid avec le carburant pilote dodécane renfermant 10 % en masse de NEH.

En comparant les fonctionnements à froid et à chaud sur les figures 4 et 5, on observe que :

- La PMI est plus élevée à froid, étant donné que la combustion dure plus longtemps, plus d'énergie est récupérée tout au long du cycle, même si le pic de dégagement de chaleur est plus faible.

5 - La combustion démarre plus tard à froid pour environ un angle CA = 5° que celle observée à chaud qui démarre pour environ un angle CA = 0°.

- La pression et température de combustion sont moins élevées à froid.

Le même type d'essai conduit avec un carburant pilote dodécane renfermant 30% en masse de NEH ne montre pas de différence significative avec celui réalisé avec un carburant pilote dodécane renfermant 10% en masse de NEH.

En conclusion pour l'exemple 1, le carburant pilote constitué de dodécane, renfermant 10 % en masse de NEH, présent dans la totalité du carburant à un faible PEF de 2% (correspondant à une fraction massique de 110 ppm à 1200 ppm de la totalité du carburant (ammoniac + carburant pilote)) permet d'améliorer significativement les performances de

15 fonctionnement du moteur à chaud comme à froid.

Une augmentation du taux de NEH dans le cas de cet exemple au-delà de 10% en masse n'apporte pas de gain significatif de performance.

Les tableaux 1 et 2 résument les résultats de l'exemple 1.

Tableau 1

Conditions de fonctionnement	PMI = 3 bars $\Phi_{Air/NH_3} = 0,7$ T d'admission = 80°C PEF = 2% Injection du carburant pilote à CA = -10°		
Carburant (% massique)	Angle CA d'amorçage de la combustion	Coefficient de Variation de la PMI (Covariance de la PMI en % sur 200 Cycles)*	Pmax (bars)
NH ₃ seul (100%)	Pas de combustion	-	Pas de combustion
NH ₃ 99,1% + 0,9% dodécane	~ 5°	9%	30 (2 Pics)
NH ₃ 99,1% + 0,9% (dodécane + 1% en masse de NEH)	~ 0°	6%	35
NH ₃ 99,1% + 0,9% (dodécane + 10% en masse de NEH)	~ -2,5°	5%	40

* Indicateur de stabilité de la combustion sur 200 cycles.

Tableau 2

Conditions de fonctionnement	PMI ~ 8,5 bars $\Phi_{Air/NH_3} = 1$ PEF = 2% Injection du carburant pilote à CA = -10°	
Carburant (% massique)	Angle CA d’amorçage de la combustion à Chaud (80°C)	Angle CA d’amorçage de la combustion à froid (30°C)
NH ₃ seul	-	Pas de combustion
NH ₃ 99,1%+ 0,9% dodécane		Pas de combustion
NH ₃ 99,1% + 0,9% (dodécane + 1% en masse de NEH)		Pas de combustion
NH ₃ 99,1%+ 0,9% (dodécane + 10% en masse de NEH)	~ 0°	~ 5°

Exemple 2

Dans cet exemple, le carburant pilote est de l’huile végétale hydrotraitee HVO 100 (ayant un indice de cétane > 60) commercialisée par la société TotalEnergies, seul (0% de nitrate de 2-éthylhexyle) ou renfermant pour 1% ou 10% en masse de nitrate de 2-éthylhexyle (NEH). Le carburant principal est de l’ammoniac.

La quantité de carburant pilote injectée correspond à un PEF de 2% en apport énergétique par rapport à l’apport global énergétique du mélange du mélange (Ammoniac + carburant pilote). La fraction massique du carburant pilote rentrant dans le total du carburant (ammoniac + carburant pilote) est de 1,1%.

Fonctionnement en régime établi (température d’admission = 80°C)

Le point de fonctionnement du moteur correspond à une PMI de 3 bars pour une richesse Air/NH₃ de $\Phi = 0,7$ avec une température d’admission de 80°C. Les données expérimentales sont recueillies après au moins 200 cycles de fonctionnement du moteur

En référence aux figures 6, 7 et 8, on observe que :

- Lorsque le carburant pilote est constitué d’HVO sans NEH, un premier pic de pression à lieu presque au PMH à environ un angle CA = 0° et un second pic à environ un angle CA = 20°, le pic de dégagement de chaleur dû à la combustion amorcée et d’augmentation de température est observé environ pour un angle CA = 5°.
- Lorsque le carburant pilote est constitué d’HVO renfermant 1% en masse de NEH, les courbes de combustion du carburant sont proches de celles obtenues pour le carburant pilote constitué d’HVO sans NEH. Le carburant pilote constitué d’HVO renfermant 1% en masse de NEH apporte un gain faible mais significatif en termes d’avance à l’inflammation, de pic de pression de chaleur et de température.

- Lorsque le carburant pilote est constitué d'HVO renfermant 10% en masse de NEH, on observe une augmentation continue de pression dans la continuité du pic de pression dû à la compression jusqu'à un niveau plus élevé que celui observé pour le carburant pilote renfermant 1% de NEH. L'amorçage de la combustion débute à environ un angle $CA = -2,5^\circ$.

- 5 Cette avance de l'amorçage de production de chaleur est aussi visible sur la courbe de température et de chaleur dégagée en fonction du CA.

En conclusion, l'injection du carburant pilote constitué d'HVO (ayant un indice de cétane > 67), renfermant 10% de NEH, conduit à gain significatif du délai d'amorçage de la combustion et de la chaleur produite.

- 10 Le même type d'essai conduit avec un carburant pilote constitué d'HVO renfermant 30% en masse de NEH ne montre pas de différence significative avec celui réalisé avec un carburant pilote HVO renfermant 10% en masse de NEH.

Démarrage à froid et à chaud

L'intérêt du carburant pilote tel que décrit ici a aussi été démontré en ce qui concerne l'allumage à froid du carburant. Le point de fonctionnement du moteur correspond à une PMI d'environ 8,5 bars pour une richesse Air/ NH_3 de $\Phi = 1$ avec une température d'admission de 80°C à chaud et de 30°C à froid. Le PEF du carburant est de 2%.

- 15

Dans les conditions de fonctionnement, à froid, pour une température d'admission de 30°C, il n'y a pas d'amorçage de la combustion pour :

- 20
- l'ammoniac seul,
 - l'ammoniac + carburant pilote constitué d'HVO seul (ne renfermant pas de NEH),
 - l'ammoniac + carburant pilote constitué d'HVO renfermant 1% en masse de NEH,
 - l'ammoniac + carburant pilote constitué d'HVO renfermant 10% en masse de NEH.

En référence aux figures 9 et 10, on constate un amorçage en combustion à chaud comme froid avec le carburant pilote constitué d'HVO renfermant 30 % en masse de NEH.

- 25

En comparant les fonctionnements à froid et à chaud sur les **figures 9 et 10**, on observe que :

- La combustion démarre plus tard à froid à environ un angle $CA = 5^\circ$ par rapport au démarrage à chaud à environ un angle $CA = 0^\circ$ et dure moins longtemps pour une injection

- 30 réalisée au même moment.

En conclusion pour l'exemple 2, le carburant pilote constitué d'HVO renfermant au moins 10 % de NEH présent dans la totalité du carburant à un faible PEF de 2% (correspondant à une fraction massique de 0,14 % de la totalité du carburant (ammoniac + carburant pilote)) permet d'améliorer significativement les performances de fonctionnement du moteur.

- 35 Les tableaux 3 et 4 résument les résultats de l'exemple 2.

Tableau 3

Conditions de fonctionnement	PMI = 3 bars $\Phi_{Air/NH_3} = 0,7$ T d'admission = 80°C PEF = 2% Injection du carburant pilote à CA = -10°		
Carburant (% massique)	Angle CA d'amorçage de la combustion	Milieu de combustion (CA ₅₀ , 200 cycles)*	Pmax (bars)
NH ₃ seul (100%)	Pas de combustion	Pas de combustion	Pas de combustion
NH ₃ 98,9%+ 1,1% HVO	~ 5°	20°	30 (2 pics)
NH ₃ 98,9%+ 1,1% (HVO + 1% en masse de NEH)	~ 5°	18°	32
NH ₃ 98,9%+ 1,1% (HVO + 10% en masse de NEH)	~ -2,5°	13°	40

* CA₅₀° : Angle moyen déterminé pour une atteindre 50% de l'énergie de combustion.

Tableau 4

Conditions de fonctionnement	PMI ~ 8,5 bars $\Phi_{Air/NH_3} = 1$ PEF = 2% Injection du carburant pilote à CA = -10°	
Carburant (% massique)	Angle CA d'amorçage de la combustion à Chaud (80°C)	Angle CA d'amorçage de la combustion à froid (30°C)
NH ₃ seul	-	Pas de combustion
NH ₃ 98,9%+ 1,1% HVO		Pas de combustion
NH ₃ 98,9%+ 1,1% (HVO + 1% en masse de NEH)		Pas de combustion
NH ₃ 98,9%+ 1,1% (HVO + 10% en masse de NEH)		Pas de combustion
NH ₃ 98,9%+ 1,1% (HVO + 30% en masse de NEH)	~ 0°	~ 5°

Revendications

1. Carburant pour moteur à combustion comprenant de 95,00% à 99,75% en masse d'ammoniac et de 0,25% à 5,00% en masse d'un carburant pilote constitué d'un hydrocarbure ayant un indice de cétane supérieur à 60 et contenant de 0,02% à 30,0 % en masse d'un nitrate d'alkyle ou d'un mélange de nitrates d'alkyle.
2. Carburant selon la revendication 1, dans lequel le carburant pilote contient de 0,5% à 30,0% en masse, de préférence de 1,0 % à 30,0% en masse, de préférence encore de 1,0% à 20,0% en masse, de préférence encore de 1,0% à 10,0% en masse, de nitrate d'alkyle ou de mélange de nitrates d'alkyle.
3. Carburant selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel l'hydrocarbure est choisi parmi au moins l'un des composés suivants : un carburant diesel à faible taux en aromatiques (<10%) et en polyaromatiques (<10%), une huile végétale hydrotraitee HVO, un iso-alcane, un n-alcane, et un carburant d'aviation durable.
4. Carburant selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le nitrate d'alkyle est un nitrate d'alkyle linéaire comportant de 4 à 36 atomes de carbone, un nitrate d'alkyle ramifié comportant de 4 à 36 atomes de carbone, un nitrate d'alkyle cyclique comportant de 5 à 18 atomes de carbone, ou un mélange de ces nitrates.
5. Carburant selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le nitrate d'alkyle est choisi parmi le nitrate de 2-éthylhexyle, le nitrate de cyclohexyle, le nitrate de dodécyle, le nitrate de n-nonyl, le nitrate de 2-tétradecyl-1-octadécyle, le nitrate d'hexyle, le nitrate de 2-octyle, le nitrate d'isononyl, le nitrate de 2-propylheptyle, un mélange de nitrates d'alkyle ramifié en C₉-C₁₃, et leurs mélanges.
6. Carburant selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le nitrate d'alkyle est le nitrate de 2-éthylhexyle.
7. Procédé d'obtention du carburant selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, qui comprend le mélange, dans la chambre de combustion du moteur, du carburant pilote et de l'ammoniac liquéfié ou gazeux prémélangé ou non avec l'air d'admission.

8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel le carburant pilote est co-injecté avec l'ammoniac via un système d'injection double dans la chambre de combustion.
9. Procédé selon la revendication 7, dans lequel le carburant pilote est injecté dans la
5 chambre de combustion en avance par rapport à l'admission ou l'injection d'ammoniac.
10. Procédé selon la revendication 7, dans lequel le carburant pilote est injecté dans la chambre de combustion après l'admission ou l'injection de l'ammoniac.
- 10 11. Moteur de véhicule ou de navire contenant le carburant tel que défini dans l'une quelconque des revendications 1 à 6.
12. Véhicule ou navire comprenant le moteur tel que défini à la revendication 11.
- 15 13. Utilisation, à raison de 0,25% à 5,0% en masse, dans un carburant comprenant de 95% à 99,75% en masse d'ammoniac, d'un carburant pilote constitué d'un hydrocarbure ayant un indice de cétane supérieur à 60 et contenant de 0,02% à 30,0% en masse d'un nitrate d'alkyle ou d'un mélange de nitrates d'alkyle, comme agent d'amélioration de l'allumage dudit carburant à base d'ammoniac.