
Particules métalliques : combustible durable ?



Étudiants :

Yasmine BOGLIOLI
Benoit BONY
Scott DINAND

Selina DELAVICTOIRE
Anton TRICCA

Enseignant-responsable du projet :
Antoine BLAISE

Date de remise du rapport : 16/06/2023

Référence du projet : STPI/P6/2023 – 11

Intitulé du projet : Particules métalliques : combustibles durables ?

Type de projet : Bibliographique

Objectifs du projet :

Le but de ce projet est d'estimer si les particules métalliques, utilisées comme combustible, peuvent fournir une alternative viable aux combustibles et carburants fossiles. À ce jour, la combustion de particules métalliques est en développement au sein des laboratoires de recherche et n'a pas atteint le stade de maturité industrielle. Ainsi, une étude bibliographique rigoureuse doit permettre d'expliquer le principe de fonctionnement, de le comparer avec d'autres technologies et d'en donner des applications présentes ou futures.

Mots-clefs du projet : Particules - Combustion - Alternatif - Durable

Table des matières

Introduction	4
Méthodologie, organisation du travail	5
Travail réalisé et résultats	6
1.1 Pourquoi est-il nécessaire de changer les modes de combustion?	6
1.1.1 Aspects environnementaux	7
1.1.2 Aspects économiques	8
1.2 Fonctionnement de la combustion de particules métalliques	10
1.2.1 Fonctionnement global	10
1.2.2 Recyclage	14
1.3 Comparaison avec d'autres modes de combustions	16
1.4 Applications	18
1.4.1 Propulsion spatiale	18
1.4.2 Domaine aéronautique	19
Conclusion et perspectives	20
Bibliographie	22

Introduction

Les besoins énergétiques humains sont au cœur des préoccupations contemporaines. En effet, l'énergie est un élément essentiel de notre vie quotidienne, que ce soit pour alimenter nos sites industriels, nos logements, nos appareils électriques et électroniques, nos transports. Selon les estimations de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la consommation mondiale d'énergie devrait continuer d'augmenter d'ici 2040, avec une croissance annuelle moyenne de 1,7%. [1, 2]

L'énergie utilisée aujourd'hui est majoritairement produite à partir de combustibles. Un combustible est une matière capable de libérer de l'énergie en brûlant au contact du dioxygène. Il peut être fossile ou renouvelable.

Un combustible fossile est un combustible d'origine organique qui se forme naturellement dans le sol en plusieurs millions d'années à partir de matières organiques mortes, telles que les plantes et les animaux. Les trois principaux types de combustibles fossiles sont le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Lors de leur combustion, les combustibles fossiles libèrent du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre. [3] À l'inverse, un combustible renouvelable est un combustible qui se renouvelle à un rythme supérieur à celui de sa consommation. Il est alors dit durable si son utilisation répond aux besoins présents sans compromettre les besoins des générations futures. Le bois, la biomasse ou encore les biocarburants sont des combustibles durables et renouvelables.

Cependant, les combustibles fossiles représentent aujourd'hui 80% de la consommation énergétique mondiale. [4] C'est pourquoi la transition vers des sources d'énergie plus propres et le développement de nouveaux moyens de production d'énergie sont une priorité pour limiter les impacts négatifs sur le climat.

Des recherches, effectuées ces dix dernières années par le laboratoire de recherche sur les carburants de l'université McGill au Canada, ont mené à l'idée d'utiliser des particules métalliques comme combustibles durables. [5] Ces recherches expliquent que la combustion de fines particules de métaux pourrait produire une grande quantité d'énergie thermique sans émissions polluantes.

Alors, les particules métalliques peuvent-elles vraiment faire office de combustible durable ? Pour répondre à cette question, il est important de savoir pourquoi l'Homme essaie de changer les modes de combustion présentement existants. Et comment la combustion des particules métalliques peut-elle produire de l'énergie ? Quels sont les avantages et les inconvénients de cette source d'énergie par rapport à d'autres modes de combustion et quelles peuvent être les applications dans la vie courante ?

Méthodologie, organisation du travail

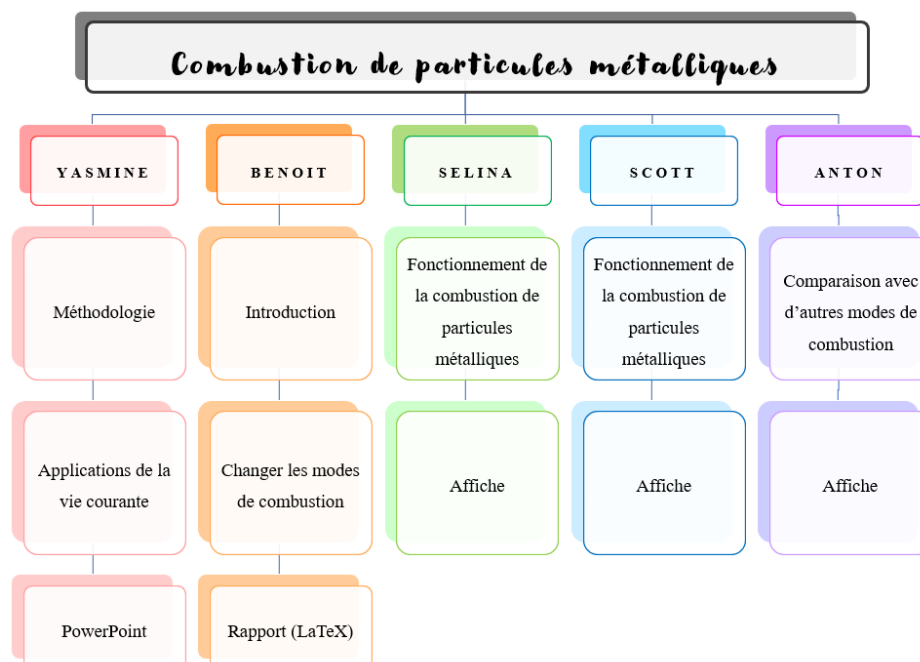
Nous nous sommes réunis chaque lundi pour réaliser nos recherches, étant donné que notre travail était purement bibliographique. Nos sessions ont alors été encadrées par notre enseignant référent Antoine Blaise.

Ce sujet étant encore assez peu connu du grand public, nos premières séances ont eu pour but de réaliser des recherches préliminaires (thèses, articles, conférences ...), assez générales afin d'en prendre connaissance. Ce n'est que par la suite que nous avons pu définir les axes de recherches à cibler, et par conséquent, donner une trame structurée à ce projet.

Nous avons également défini les échéances à respecter, tout en prévoyant bien sûr une marge de manœuvre afin d'anticiper les potentiels imprévus. Par ailleurs, nous nous sommes répartis le travail de la façon la plus équitable possible, en définissant les rôles de chacun au sein du groupe.

Comme évoqué précédemment, notre travail n'étant que bibliographique, nous avons choisi de travailler sur différents axes, qui selon nous, étaient essentiels à la bonne structuration de notre projet. Chaque sous-partie a été traitée par un voire deux membres du groupe. Nous mettions régulièrement nos recherches en commun, l'objectif étant bien sûr d'avancer ensemble sur le projet afin d'avoir une connaissance globale du sujet.

Une fois la rédaction terminée, nous avons entamé simultanément la réalisation de l'affiche, du PowerPoint ainsi que la rédaction du rapport. La dernière étape a donc consisté en la préparation de l'oral.



Travail réalisé et résultats

1.1 Pourquoi est-il nécessaire de changer les modes de combustion ?

La demande d'énergie ne fait que croître et continuera de croître dans les prochaines années. Jean-Marc Jancovici, ingénieur et président du « Shift Project » [6], explique d'ailleurs que la consommation d'énergie mondiale est directement proportionnelle à la croissance économique, représentée par le PIB mondial. [7]

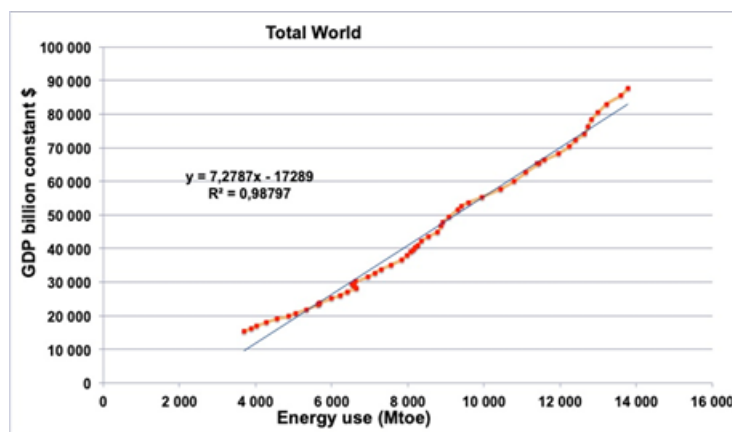


FIGURE 1.1 – PIB mondial en milliards de dollars constants de 2018 (axe vertical) en fonction de la consommation d'énergie mondiale en millions de tonnes équivalent pétrole (axe horizontal), pour les années 1965 à 2018.

Sources : BP statistical review 2019 et Banque Mondiale, 2019

Il est donc facile de constater que la croissance économique engendre une augmentation continue de nos besoins énergétiques. Ces besoins étant couverts à 80% par des énergies fossiles [8], les activités humaines accroissent aussi l'émissions de gaz à effet de serre.

A moins de limiter la croissance mondiale, voire de favoriser la décroissance, l'un des moyens de faire face au réchauffement climatique est de limiter l'impact environnemental des énergies utilisées dans le monde. Il est donc primordial de changer les modes de production d'énergie, en favorisant des modes de production durables.

1.1.1 Aspects environnementaux

Pour favoriser les modes de production durables, il est important de connaître les raisons du changement climatique et la responsabilité des gaz à effet de serre dans celui-ci.

L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet de maintenir la température de la Terre à un niveau propice à la vie en retenant une partie des rayons infrarouges, émis par le soleil et par le sol Terrestre, dans l'atmosphère. Cependant, d'après le dernier rapport du GIEC [9], "Les activités humaines ont sans équivoque provoqué le réchauffement de la planète". En particulier l'utilisation des combustibles fossiles, qui émettent une grande quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette augmentation entraîne un réchauffement climatique et des changements planétaires néfastes et sans précédents pour l'environnement et les écosystèmes.

Les gaz à effet de serre (GES) jouent un rôle prépondérant dans la régulation du climat. Sans eux, la température moyenne sur Terre serait de -18 °C au lieu de +15 °C et la vie y serait impossible. [10, 11] Certains gaz à effet de serre sont donc naturellement présents dans l'air (vapeur d'eau, dioxyde de carbone). L'eau (vapeur et nuages) est l'élément qui contribue le plus à l'effet de serre « naturel ».

Cependant, depuis le XVIIIe siècle et la révolution industrielle, l'Homme, par ses activités, a considérablement accru la quantité de gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère : on parle d'ère "Anthropocène". Ce terme fait référence à une période géologique récente de l'histoire de la Terre, qui est caractérisée par l'impact significatif de l'activité humaine sur l'environnement.

L'augmentation de l'effet de serre est induite par les émissions d'autres gaz à effet de serre d'origine anthropique. À titre d'exemple, l'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (principal GES) contribue pour 2/3 à l'augmentation de l'effet de serre induite par les activités humaines (combustion de gaz, de pétrole, déforestation, cimenteries, etc.). [12]

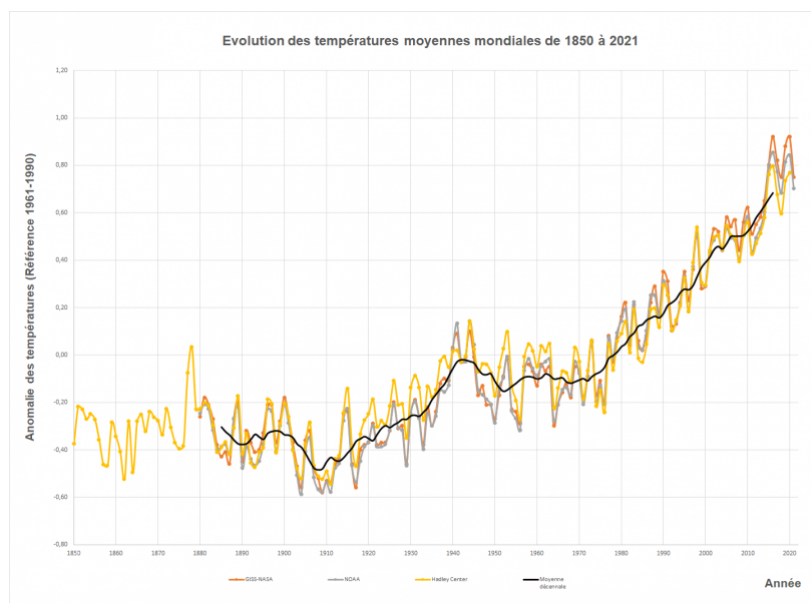


FIGURE 1.2 – Évolution des températures moyennes mondiales de 1850 à 2021
Sources : National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

En conséquence, la forte présence des GES d'origine anthropique dans l'atmosphère cause des bouleversements à l'échelle planétaire. Ces changements sont principalement causés par le changement climatique et la hausse des températures. Grâce au graphique ci-dessus (1.2), il est possible de constater que la température moyenne de la planète a augmenté de 1°C par rapport à l'ère préindustrielle. Cette température varie selon les sources, mais est globalement comprise entre 1 et 1,5°C. [9]

Voici quelques exemples de changement planétaire induits par le réchauffement climatique :

- Fonte des glaciers et des calottes glaciaires
- Acidification des océans
- Augmentation de la fréquence des événements climatiques et météorologiques extrêmes

Ces dérèglements planétaires sont une menace pour la biodiversité et la population humaine, et risquent de s'aggraver si les modes de combustion restent tels qu'ils sont.

1.1.2 Aspects économiques

Pour répondre à l'ensemble des problématiques causées par le changement climatique, des mesures doivent être mises en place par les gouvernements. Une première piste serait de développer des alternatives aux carburants fossiles.

Cependant, il est important de noter que les énergies fossiles présentent plusieurs avantages économiques et techniques par rapport aux énergies dites « bas carbone ». Elles présentent l'intérêt d'être facilement accessibles (pour le gaz et le charbon), peu chères, stockables et d'avoir une grande densité énergétique. La densité énergétique est la quantité d'énergie qui peut être stockée dans une masse donnée d'une substance ou d'un système. Plus la densité énergétique d'un système ou d'un matériau est élevée, plus la quantité d'énergie stockée dans sa masse est considérable. Les énergies « bas carbone » présentent souvent le désavantage d'avoir une faible densité énergétique (hydrogène) ou de ne pas être disponible à la demande à cause de leur intermittence (solaire et éolien).

En France, la stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) donne des orientations pour mettre en œuvre, dans tous les secteurs d'activité, la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable. Elle définit une trajectoire de réduction des émissions de GES jusqu'à 2050 et fixe des objectifs à court et moyen termes. Elle a deux ambitions : atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et réduire l'empreinte carbone de la consommation des français.

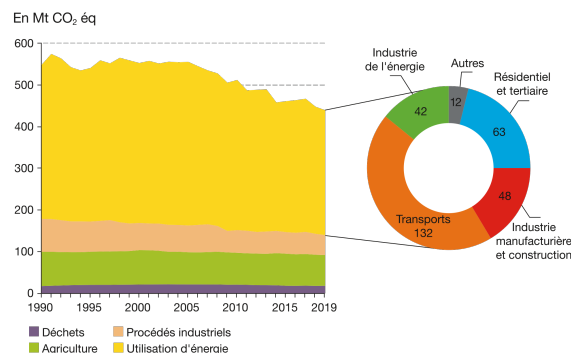


FIGURE 1.3 – Répartition par source des émissions de GES en France entre 1990 et 2019
Sources : Agence Européenne pour l'Environnement (AEE)

Comme l'indique la figure 1.3, le secteur des transports est la principale cause de GES en France. Selon l'études de l'AIE [1], ces émissions proviennent à 60% des voitures particulières.

Le moteur à combustion interne, alimenté par des combustibles fossiles, ne semble donc pas en mesure de répondre aux exigences des futures normes d'émissions. En effet, l'Union Européenne a instauré des normes sur le taux de CO2 des voitures neuves de 130g par km en 2015 à 95g par km en 2020. Elle a aussi voté début 2023, l'interdiction de la vente de véhicules thermiques après 2035. [13]

Pic pétrolier

D'autre part, les moteurs alimentés par des carburants dérivés du pétrole sont voués à évoluer. Le pétrole est une ressource limitée, qui ne se renouvelle qu'à une échelle de temps géologique. Il est produit à partir de la décomposition de matière organique accumulée puis transformée sous de très fortes pressions sur une période s'étalant sur des millions d'années. Depuis quelques années, l'extraction de pétrole devient de plus en plus difficile car les puits très accessibles ont été épuisés. [1] L'extraction se fait dorénavant dans de plus petit gisement, dans des sols à sable bitumeux ou dans les fonds marins. Tous ces sites d'extractions sont difficiles d'accès et très coûteux à aménager, réduisant la rentabilité de tels puits. [14]

Les scientifiques et experts en économie parlent de "pic pétrolier". Le pic pétrolier d'un gisement correspond au moment où la production de pétrole extrait commence à décliner après avoir atteint son maximum.

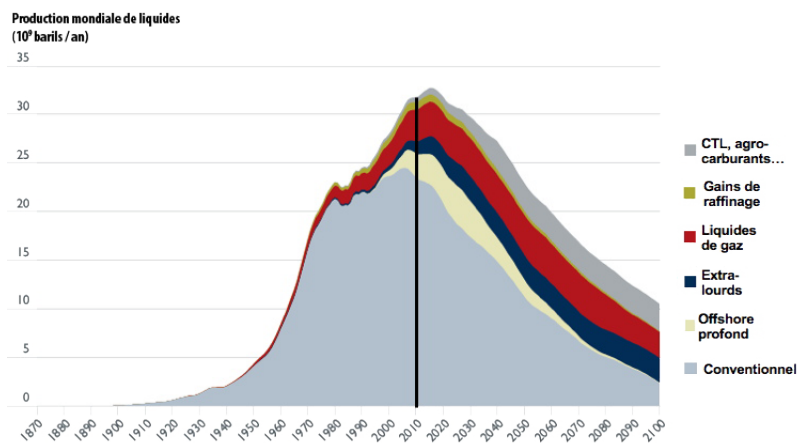


FIGURE 1.4 – Simulation de la production mondiale de liquides pétroliers et autres carburants de 1870 à 2100

Sources : Transport and Regional Economics (BITRE), Canberra (Australie), 2009

D'après la figure 1.4, ce pic pétrolier a été atteint aux alentours de 2020. [14] Cependant, selon l'AIE, la demande totale de pétrole atteindra 101,9 millions de barils par jour en 2023, soit 2 millions de plus qu'en 2022. [1] La demande en pétrole ne pourra pas être satisfaite dans le futur : les modes de combustion sont donc contraints de changer et de ne plus dépendre d'une ressource fossile.

1.2 Fonctionnement de la combustion de particules métalliques

1.2.1 Fonctionnement global

Au contact d'une flamme, les poudres métalliques réagissent avec l'oxygène de l'air pour produire un oxyde métallique solide non toxique pouvant être récupéré, puis recyclé, contrairement au dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère lors de la combustion de pétrole par exemple. Cette réaction est exothermique. Le terme "poudre" est employé car les métaux brûlent bien plus facilement à l'état divisé que lorsqu'ils sont compacts, en plus gros morceaux. En poudre, la surface de contact avec l'oxygène est bien plus importante. Lorsque celles-ci brûlent, des oxydes métalliques sont produits. Voici un exemple simple de combustion de particules de cuivre : $2\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{CuO}$.

On voit du CuO qui apparaît; c'est l'oxyde métallique. En plus des oxydes, il y a aussi émission d'un rayonnement thermique provenant de la flamme qu'il faudrait capturer et convertir sous forme d'électricité ou d'énergie mécanique. Différentes options existent afin d'effectuer cette récupération : la conversion en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques, ou l'utilisation de matériaux réfractaires qui vont absorber la lumière et donc chauffer et échanger avec l'air, ce qui pourra alimenter une petite turbine à gaz par exemple. Ce principe sera expliqué par la suite.

Nouveau type de moteur

Les métaux ayant une forte densité d'énergie, leur combustion produit énormément de chaleur. Il s'agit ensuite de pouvoir récupérer cette chaleur et de la convertir sous forme d'électricité ou d'énergie mécanique, selon le besoin. Si l'on veut utiliser ces métaux comme vecteurs d'énergie, il faudrait alors faire appel à un moteur thermique dans lequel aurait lieu la combustion.

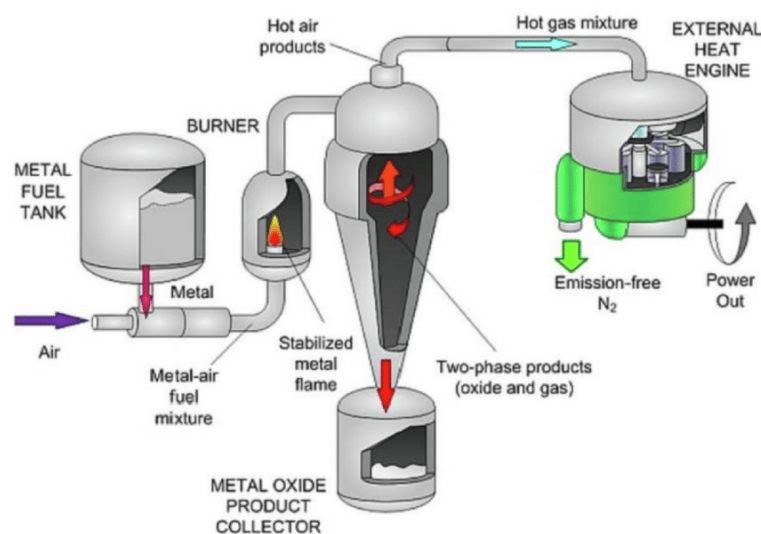


FIGURE 1.5 – Moteur à combustion de particules métalliques [15]

Il faut donc développer un nouveau type de moteur puisque celui utilisé actuellement dans le secteur de l'automobile, que l'on appelle "moteur à combustion interne" ou MCI, ne serait pas adapté, du fait des caractéristiques abrasives des poudres. Le risque d'explosion serait alors trop élevé et cela représenterait un danger pour l'utilisateur. De plus, il serait impossible d'évacuer les oxydes, alors qu'il est fondamental de les recycler. Il faudrait donc utiliser un moteur dit "de combustion externe" ou MCE. Ce type de moteur est aujourd'hui employé pour des productions stationnaires d'énergie comme les centrales nucléaires. Il fonctionne de la manière suivante : il exploite la chaleur produite par une source chaude, ici la combustion des particules métalliques, et transmet cette chaleur à un fluide qui permet la conversion en énergie mécanique ou électrique par le biais d'un cycle thermodynamique. De cette manière, la dilatation des gaz brûlés est valorisée, et utilisable pour alimenter un système.

Principe de fonctionnement d'un MCE

Il faut alors procéder à l'étude du fonctionnement de ce nouveau type de moteur, en le prenant en compte dans son intégralité [15]. Ainsi, nous verrons comment valoriser la dilatation des gaz lors de la combustion.

Tout d'abord, un réservoir de poudre alimente le système. Il est alors placé de façon extérieure au moteur. Un système de dispersion vient suspendre les particules métalliques dans les airs pour le transporter via un tube vers la chambre de combustion. Le métal est alors brûlé et la flamme s'auto-entretient. Cela veut dire qu'il suffit d'un élément déclencheur pour que la combustion s'initie. La combustion du métal réussit alors à s'auto entretenir, et brûle aussi longtemps que nécessaire. Dans ce cas-ci, l'élément déclencheur pourrait être une simple étincelle.

En brûlant, des particules d'oxydes métalliques sont formées, et séparées de l'air chaud grâce à un système cyclonique, permettant d'entraîner les oxydes vers le bas. Les gaz chauds, quant à eux, s'élèvent et sont aspirés par le haut. L'oxyde métallique est donc collecté dans un second réservoir. Ce sont ces oxydes qui seront recyclés pour être réintroduits dans le réservoir externe du moteur et alimenter de nouveau le système. Le processus de recyclage des oxydes tant au cœur de l'intérêt de l'utilisation des particules métalliques en tant que combustible, une partie de ce rapport y est dédiée. L'énergie produite sous forme de chaleur est ensuite convertie en énergie mécanique ou électrique selon le besoin. Pour ce faire, les gaz chauds produits lors de la combustion viennent alimenter une turbine à gaz, ce qui permet d'entraîner une hélice, produisant alors de l'énergie mécanique ou électrique.

Néanmoins, il existe une limite à ce système. Il est parfois difficile de capturer la totalité des oxydes métalliques formés lors de la combustion. Et de fait, le principe du cyclone permettant de récupérer les oxydes fonctionne seulement si les particules sont supérieures à 10 micromètres [15]. Or la taille des oxydes dépend du mode de combustion utilisé. Un autre mode de combustion permettrait d'obtenir des oxydes de la taille de l'ordre du nanomètre, ce qui invalide l'utilisation du cyclone. Dans ce cas-là, il faudrait mettre en place un système de filtre permettant de capter ces oxydes pour les récupérer par la suite. Cependant, le processus d'installation et de suppression de tels filtres dans un moteur reste tout de même complexe. C'est pourquoi, du point de vue de la captation des particules, il est préférable d'essayer d'utiliser un mode de combustion qui produit des oxydes de taille plus grande.

Contrôler la taille des particules oxydées

Le changement de taille des particules est lié à de nombreux paramètres, autres que le mode de combustion utilisé. Tout d'abord, la température à laquelle s'effectue la combustion, appelée température de flamme, joue un rôle important puisqu'elle différencie deux grands modes de combustion.

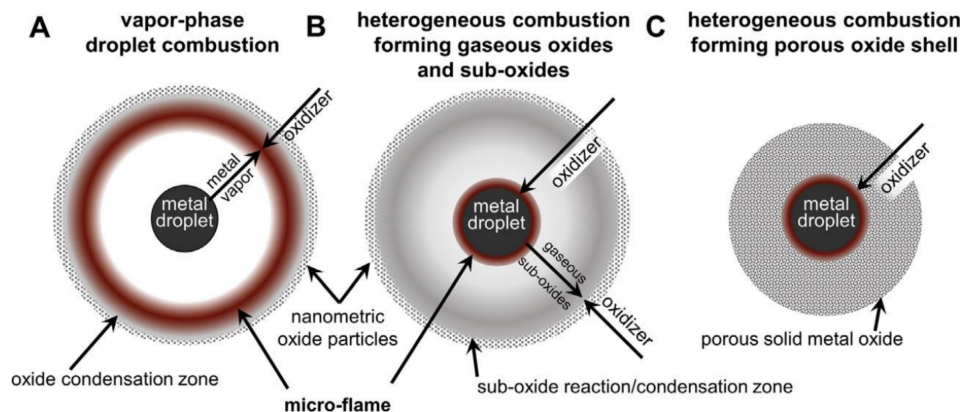


FIGURE 1.6 – Schéma des différents modes de combustions de particules [16]

Comme représenté sur le schéma A ci-dessus, le premier mode s'effectue en phase vapeur : dans ce cas, la température de flamme est supérieure à celle de vaporisation du métal. L'oxydant, ici l'air, réagit avec la vapeur formée lors du réchauffage de la particule de métal. Cette réaction forme une flamme-enveloppe autour de la surface, se trouvant à proximité de la zone de condensation de l'oxyde. Les oxydes, sous forme de nanoparticules, créent une couche qui se place à l'extérieur de la flamme.

Le deuxième mode de combustion considéré se nomme combustion hétérogène. Il peut être observé dans les schémas B et C. Dans ce cas, c'est la température de vaporisation de la particule métallique qui est supérieure à la température de la flamme. Contrairement au premier mode de combustion, cette dernière s'effectue en différentes phases à la surface de la particule. Deux cas de figure résultent de cette méthode : la combustion hétérogène peut avoir pour produits des oxydes gazeux et des sous-oxydes, ou des solides poreux métalliques. Le schéma B représente le premier cas de figure, où l'on peut voir que la température de la flamme est proche de celle de la vaporisation des oxydes/sous-oxydes.

Il y a ensuite condensation des oxydes formés, qui mène à la formation de nanoparticules. Il est possible de voir que ces particules se placent loin de la micro-flamme et de la zone de réaction. Dans le schéma C, il y a formation de solides poreux et la température de volatilisation de l'oxyde formé est supérieure à celle de la flamme : l'oxyde solide se forme alors directement sur la surface de la particule métallique. Finalement, des particules d'oxyde sont formées, qui sont plus grandes que celles utilisées en début de combustion.

Force est de constater que les métaux ne brûlent pas tous de la même manière. Le magnésium, le béryllium et l'aluminium sont les seuls à pouvoir brûler sous phase vapeur (schéma A). Tous les autres métaux brûlent de manière hétérogène dans l'air, comme vu dans les schémas B et C. Il y aurait donc un choix de combustion à faire. De plus, les modes A et B permettent d'obtenir des oxydants de l'ordre de grandeur des nanomètres alors que le mode C permet d'obtenir des oxydants de la taille des micromètres. Cette différence de taille des particules oxydées va déterminer le filtre utilisé pour les récupérer. Il serait plus simple de récupérer des particules oxydées de l'ordre du micromètre, c'est pourquoi il faudrait privilégier le mode de combustion C, si l'on se base seulement sur ce critère.

Dans tous les cas, les trois modes de combustion ainsi présentés correspondent à une combustion de poudre métallique à température élevée allant de 1650K à 4063K [15]. Ils sont communément désignés par le terme de "combustion rapide". C'est d'ailleurs ce que l'on retrouve aujourd'hui dans les moteurs de fusées et autres systèmes nécessitant une forte poussée. Pour une voiture cependant, un autre type de combustion pourrait être considéré, la combustion lente, où la température de flamme est bien plus basse, aux alentours de 1000K [16]. Mais cette combustion lente n'a été que très peu étudiée et il n'existe pas encore d'application concrète. Théoriquement, cette combustion lente libérerait l'énergie sur une plus longue durée avec moins d'intensité que dans le cas d'une combustion rapide.

Quel métal choisir ?

Après avoir étudié le fonctionnement global de ce phénomène, il serait intéressant de se pencher sur la question du choix du métal. De nombreux métaux se présentent comme potentiels combustibles puisqu'ils possèdent en effet, une densité volumique énergétique supérieure à celle du diesel ou de l'essence. Le Bore, par exemple, a longtemps été considéré comme option envisageable, au vu de sa densité énergétique extrêmement élevée (140 MJ L⁻¹). Mais comme beaucoup d'autres métaux (vanadium, titane, béryllium), son insuffisance dans la croûte terrestre limite le choix de cette alternative.

De plus, certains métaux sont dangereux voire très toxiques pour l'être humain. Il ne reste alors plus que le Silicium, l'Aluminium, le Fer et le Magnésium. Ils présentent tous les quatre une densité volumique énergétique élevée ainsi qu'une énergie spécifique importante. De plus, ils sont abondants dans la croûte terrestre (respectivement 27.7%, 8,1%, 5.0% et 2.1% en masse de la croûte terrestre [17]). Il faut noter que l'aluminium et le magnésium font partie d'une seule et même famille : les métaux légers. Ces métaux sont de potentiels candidats en tant que carburant de demain. Ces métaux sont présents dans la nature sous forme de minerais oxydés et doivent être traités pour isoler le métal recherché. Il est alors possible de les réduire sous forme de poudre et ainsi, de les utiliser pour la combustion.

1.2.2 Recyclage

Une fois la combustion terminée, il est indispensable de procéder à la phase de recyclage. C'est ce qui fait de cette source d'énergie une énergie renouvelable. Lorsqu'elles sont brûlées, les particules métalliques réagissent avec l'air pour produire un oxyde solide non toxique pouvant être recueilli, puis recyclé. Le but est alors de créer un processus de réduction et de combustion circulaire, permettant de réutiliser les mêmes particules métalliques le plus longtemps possible. Des méthodes de séparation de métal et de son oxygène existent d'ores et déjà.

Cependant, elles se basent toutes sur l'utilisation de charbon ou de carbone. De plus, la plupart des cycles de recyclage ne sont pas parfaits, avec un rendement tout de même faible. C'est pour cela que nous allons poursuivre notre étude sur deux processus de recyclage des oxydes métalliques, qui se basent sur l'utilisation d'une énergie verte ou renouvelable. Pour rappel, le but principal de la combustion des particules métalliques est de développer une nouvelle forme d'énergie, plus respectueuse de l'environnement. C'est donc pour cela que nous allons seulement aborder ces deux méthodes de recyclage dites "vertes".

Méthode par four solaire

La première méthode permettant de recycler les oxydes métalliques, repose sur la voie solaire [18]. C'est une méthode dite de carboréduction utilisant une voie solaire propre. Le principe est plutôt simple, mais difficile à mettre en place à petite échelle dans un moteur de voiture par exemple.

Néanmoins, il a été testé en laboratoire dans des conditions très particulières. Dans ce laboratoire se trouve l'Odeillo, un four solaire de grande taille, représenté sur la figure 1.7. Il est composé de centaines de miroirs ultra-réfléchissants, qui permettent de concentrer les rayons du soleil en un seul et unique point. Au centre de ce foyer de rayons, la température est extrême et permet de concentrer près de 15 000 fois la puissance du Soleil. Le but serait alors de placer l'échantillon de métal oxydé au centre de ce foyer pour que sa température augmente de manière importante et ce, très rapidement. Ce four permet d'atteindre les 2000°C en quelques secondes seulement [18], et aujourd'hui, il n'existe pas d'autre moyen d'atteindre une telle température en aussi peu de temps. Lorsque l'oxydant est chauffé, une réaction est initiée à se produire. En effet, l'oxydant est d'abord vaporisé, ce qui induit l'apparition de vapeurs du métal. Celles-ci se condensent puis sont récupérées une fois la réaction terminée. Les particules de métal ainsi collectées sont désormais chargées en énergie, qui pourra être utilisée lors d'une nouvelle combustion.



FIGURE 1.7 – L'Odeillo : Four solaire

Ce système, à première vue pratique et fonctionnel, ne peut être réduit. De nombreux miroirs sont nécessaires, et il n'est aujourd'hui pas possible de développer cela pour une utilisation à taille inférieure à celle du four solaire. A l'heure actuelle, si l'objectif est de réduire ces oxydants en particules métalliques, il faudrait les envoyer à un laboratoire qui posséderait un four solaire pour que des experts fassent cette carboréduction.

Cette méthode de recyclage présente par ailleurs certaines limites. Il est clair que comme dans la majorité des cas, son rendement n'est pas parfait. Le métal injecté lors de la première combustion ne pourra pas être réutilisé indéfiniment et une proportion de métal pur devra être réinjectée. Ainsi, lors du recyclage, une partie de la matière est perdue et le rendement de conversion est loin d'être assez élevé, ayant une valeur que le CNRS ne souhaite pas à ce jour révéler. Aujourd'hui, des chercheurs continuent d'aborder la question, et cherchent à améliorer ce taux de rendement. Pour cela, de nombreux facteurs entrent en jeu : la variation de la pression, la température ou encore l'écoulement des gaz. D'après le CNRS, le but serait d'atteindre un rendement autour des 90%, pour que cette forme de recyclage des oxydants métalliques soit une méthode viable.

Méthode par électrolyse

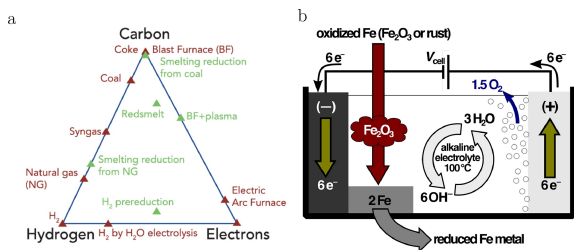


FIGURE 1.8 – Procédés de réduction de l'oxyde de fer

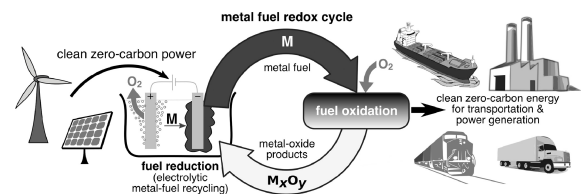


FIGURE 1.9 – Schéma du recyclage des particules métalliques

Une autre manière de recycler les oxydes métalliques serait d'utiliser la méthode de l'électrolyse. C'est un recyclage qui utilise lui aussi de l'énergie verte pour séparer le métal et l'oxygène. Cette méthode a souvent été testée en laboratoire sur des métaux tels que le fer et l'aluminium, et permet alors d'éviter des émissions de carbone supplémentaires [19]. La figure 1.8 montre différentes manières de réduire l'oxyde de fer en fer réutilisable, en utilisant par exemple de l'hydrogène, du carbone ou encore de l'électricité en tant qu'énergie source. La base du triangle représente des méthodes n'utilisant aucune source de carbone, et la méthode de l'électrolyse est inscrite directement dessus. La figure 1.8 représente schématiquement l'électrolyse pour réduire l'oxyde de fer, et dans cette représentation, seul de l'oxygène est produit [19]. Il n'y a pas d'émissions de carbone supplémentaires. Cette méthode de recyclage est donc tout aussi efficace que la méthode solaire. La figure 1.9 quant à elle, propose un schéma global du cycle de combustion du métal, en le recyclant grâce à l'électrolyse. Cette fois-ci, l'électrolyse est alimentée par des énergies renouvelables telles que de l'énergie solaire ou éolienne. Au final, il existe deux méthodes dites vertes dans le processus de recyclage des oxydants métalliques, chacune d'elles ayant ses avantages et ses inconvénients.

Entre les deux, la solution la plus viable semble être la carboréduction via la voie solaire, mais cela demanderait de récupérer le métal oxydé, de le stocker, avant de l'envoyer à un laboratoire pour qu'il soit transformé en métal pur. C'est une solution efficace mais très peu fonctionnelle si l'on veut que les particules métalliques deviennent le combustible de demain. Il faudrait donc commencer à chercher des solutions pour rendre ce cycle de recyclage plus accessible.

1.3 Comparaison avec d'autres modes de combustions

Tout d'abord, il est nécessaire de parler de l'usage de ces énergies dans le domaine des transports. Actuellement, sur les 38,2 millions de voitures [20, 21] circulant en France (en 2022), près de 97% d'entre elles sont des voitures utilisant des énergies fossiles, et 3% d'entre elles sont basées sur les énergies renouvelables, ou hybrides. Cette répartition nous pousse à nous demander si les particules pourraient remplacer les énergies utilisées actuellement dans le domaine des transports.

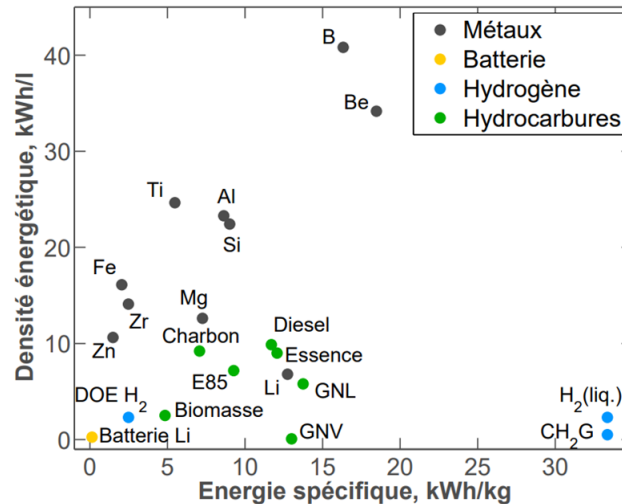


FIGURE 1.10 – Comparaison des valeurs des densités énergétiques pour différents combustibles

Sources : Bergthorson et al. (2015)

Aujourd'hui, les énergies fossiles liquides sont les sources d'énergie les plus développées et les plus efficaces à volume équivalent sur le marché de l'automobile. Comparé à l'électrique et au gaz naturel, les voitures à essence possèdent une plus grande autonomie. Cependant il ne faut pas oublier que dans le contexte de décarbonisation, ces énergies fossiles, responsables de 31% de la production de CO₂ des français, sont majoritairement ciblées par les mesures gouvernementales pour la diminution des émissions polluantes. Les stocks actuels des énergies fossiles sont en effet en forte diminution. D'ici 50 ans, le stock de pétrole sera presque entièrement consommé, et dans 60 ans, le stock de gaz sera lui aussi épuisé. [22]

L'électrique, actuellement favorisé par la plupart des états dans la transition énergétique, se développe rapidement avec une augmentation de près de 2.5% en 2 ans, entre 2020 et 2022. Cette énergie étant couramment employée dans tous les domaines, elle est très accessible partout dans le monde. Mais ses avantages présentent également des inconvénients, comme le manque d'autonomie, une densité énergétique faible, ainsi qu'une durée de vie limitée à une vingtaine d'années. [23] N'oublions pas que les batteries usagées ne sont pas entièrement recyclées, seules 60% d'entre elles le sont. Il est aussi nécessaire de réfléchir à la question de production de ces batteries, nécessitant elles aussi de ressources épuisables. Une question sur la durée de vie de l'électrique va se poser. Ainsi, si l'on venait à produire 500 millions voitures électriques, près de 35% du stock mondial du lithium serait utilisé. On ne peut donc pas dire que cette énergie soit durable à long terme si toutes les voitures fonctionnaient à l'électrique, car il serait difficile de pouvoir subvenir aux besoins énergétiques.

Les piles à hydrogène fonctionnent de la même manière que les piles classiques. Elles présentent tout de même un avantage sur le stockage, en permettant une source d'énergie rechargeable facilement et rapidement tout en produisant uniquement de l'eau. La production de cette énergie n'employant pas de méthodes complexes, elle peut être rapidement mise en place. Elle se base sur la méthode de l'hydrolyse de l'eau. Cependant, cette source d'énergie est plus dangereuse que les batteries. L'hydrogène étant à la fois explosif et très volatil, les piles à hydrogène présentent un danger pour l'utilisateur en cas de fuite ou de dysfonctionnement.

Dans ce domaine, les particules métalliques se présentent comme étant une solution innovante, à la fois sur le plan de l'efficacité énergétique et aussi sur le plan de l'écologie. Actuellement, les particules métalliques possèdent une densité énergétique similaire à celle de l'essence. En d'autres termes, cette énergie, à volume égal, permettrait une même autonomie. De plus, un combustible fossile sous forme de poudre est facile à transporter. Cette nouvelle source d'énergie ne produisant aucune particule responsable du changement climatique, comme le CO₂ et le SO₂, et recyclable actuellement à 80%, elle se présente comme une solution alternative à l'électrique, dans la lutte contre la pollution dans le domaine du transport. [24]

Aspects économiques

Afin de savoir si les particules métalliques sont des combustibles durables, nous devons aussi la comparer aux autres sources d'énergie dans l'industrie. En France, 40% de l'énergie primaire consommée vient des parcs nucléaires, 28% vient du pétrole, 14% du gaz naturel, 2% du charbon et le reste des énergies renouvelables. [25]

Sur le plan de la production d'énergie en France, les énergies renouvelables sont en pôle position, avec une production d'énergie entre 20 et 50€/MWh en moyenne, avec 20€/MWh pour l'hydraulique et 40€/MWh pour le solaire. Cependant, ces énergies sont souvent disponibles par intermittence, les éoliennes ne produisant de l'énergie que lorsque le vent souffle, ou le photovoltaïque lorsque le soleil brille. Toujours sur le plan de la production d'énergie en France, le nucléaire est très proche du renouvelable, avec un prix à 80€/MWh en comptant le coût de construction, à 40€/MWh de coût "pur". Les combustibles fossiles finissent derniers avec un coût de 70€/MWh et jusqu'à 100€/MWh en période de pointe. La combustion de particules métalliques, possédant une densité énergétique équivalente à celle du pétrole, serait une source d'énergie bien plus efficace pour la production d'énergie du fait de son coût de combustible inférieur. Cette énergie aurait ainsi un prix à la production aux alentours de 63€/MWh, se plaçant bien devant les sources fossiles. [26]

Dans le cadre de la décarbonisation de la société, la combustion de particules métalliques peut se comparer aux énergies nucléaires en coût de production tout en restant propre. Elle se présente alors comme une alternative aux centrales à charbon, au fuel et au gaz, grâce à une production modulable. Elle est aussi plus facile d'exploitation que le nucléaire, ne demandant que très peu d'entretien, et étant bien moins dangereuse en cas d'accident. De plus, les chercheurs envisagent la possibilité de remplacer le charbon par les particules métalliques sans modifications majeures des systèmes d'injection et de combustion.

Un avantage non négligeable à la combustion de particules métalliques est sa capacité de retour à l'état initial lors de la désoxydation du métal. À la manière d'une batterie, cette énergie pourra fournir de l'énergie pendant les périodes de pics (forte demande énergétique) puis être régénérée pendant les périodes de creux. Contrairement aux batteries classiques, ces "piles à particules métalliques" possèdent une durée de vie théoriquement infinie tant qu'elles sont stockées à l'abri de toute source d'oxydation.

1.4 Applications

Comme évoqué précédemment, la combustion est une réaction chimique au cours de laquelle un corps réagit avec le dioxygène, en dégageant une quantité importante de chaleur en un bref instant. C'est ainsi que dans le cas de la combustion de particules métalliques, le métal utilisé produit un oxyde métallique, lors de son oxydation et de sa mise au contact d'une flamme. Ce phénomène sera illustré ici par le biais de différents exemples, que sont les fusées ou encore la propulsion automobile.

1.4.1 Propulsion spatiale

Les moteur-fusée utilisent également la combustion de particules métalliques. Rappelons tout d'abord qu'un moteur-fusée est un type de moteurs à réaction, autrement dit un engin qui propulse un gaz vers l'arrière pour le faire avancer, voire décoller dans le cas des fusées. La poussée résulte de l'éjection des gaz produits par la combustion de substances chimiques, sans intervention de l'oxygène de l'air, ce qui lui permet de fonctionner hors de l'atmosphère terrestre. Un moteur-fusée convertit ainsi l'énergie dégagée lors de la réaction chimique en énergie cinétique. Cette réaction chimique met en jeu deux composés : le comburant (oxydant) et le combustible (réducteur). Ces substances, dont la réaction assure la propulsion (de la fusée notamment), sont appelées propergols. Selon la nature du couple comburant/combustible, il existe des propergols solides et des propergols liquides. Les fusées sont ainsi propulsées par des moteur-fusée de grande puissance. Ces explications peuvent être illustrées par l'étude du lanceur spatial de l'ESA (Agence Spatiale Européenne), Ariane 5. [27].

Le schéma ci-contre permet de dénombrer quatre principales parties de la fusée, à savoir l'étage supérieur cryotechnique (ESC), l'étage principal cryotechnique (EPC), le moteur Vulcain et enfin, l'étage d'accélération à poudre (EAP). C'est sur ce dernier élément que l'étude va être penchée.

Dans un premier temps, il serait intéressant de se demander pourquoi ce lanceur comporte plusieurs étages (dans ce cas, au nombre de trois). De manière succincte, le premier étage emporte toute la fusée au décollage. Il s'agit du plus gros étage, avec des moteurs extrêmement puissants. Il ne brûle que peu de temps, permet de sortir de l'atmosphère puis retombe en mer. Le deuxième continue la montée et la mise en vitesse mais prépare la trajectoire plus horizontale du dernier étage. Il retombe lui aussi en mer après avoir brûlé dans l'atmosphère. Le troisième et dernier étage ne gagne que peu d'altitude mais communique à lui seul environ la moitié de la vitesse totale à acquérir. Lorsque l'orbite est atteinte, ce moteur est coupé et de petits moteurs auxiliaires permettent d'orienter exactement le satellite comme il le souhaite avant sa séparation. Un lanceur contient donc de grandes quantités d'ergols (solides) dans des réservoirs et possède également de puissants moteurs.

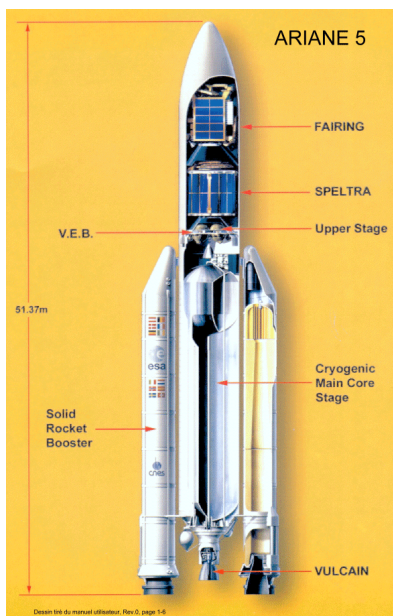


FIGURE 1.11 – Écorché de la fusée Ariane 5 Eca-533
Étageage séquentiel de vol et orbite de transfert
(Esa - III. D.Ducros, 2005)

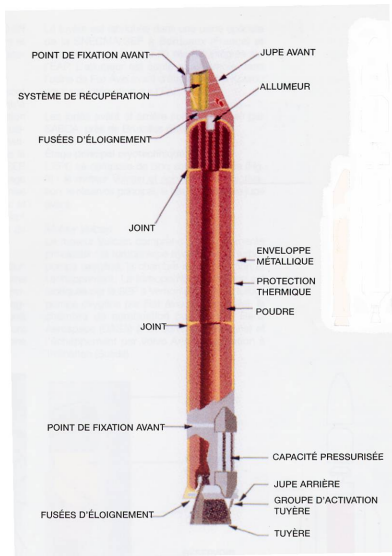


FIGURE 1.12 – Éléments constitutifs d'un EAP

Qu'en est-il dès du mode de fonctionnement des EAP d'Ariane 5? Il faut savoir que les EAP fournissent 90 % de la poussée au décollage. Est alors représentée ci-contre la schématisation des éléments constitutifs d'un EAP. Chacun des deux moteurs d'appoint (EAP) du lanceur Ariane 5 est un moteur à propergol solide. En effet, une poudre est introduite dans les segments. Elle se compose de :

- 68 % de perchlorate d'ammonium (oxydant de la réaction chimique) : NH_4ClO_4 (s)
- 18 % d'aluminium (réducteur de la réaction chimique) : Al (s)
- 14 % de polybutadiène et autres (liant)

C'est ainsi que le perchlorate d'ammonium et l'aluminium réagissent ensemble pour former les gaz de propulsion. À la base, se trouve une tuyère permettant, effectivement, d'évacuer ces gaz. Au total, 480 tonnes de poudre (propergol solide) sont réparties dans les deux EAP. Chacun d'eux consomme deux tonnes de poudre par seconde, pendant environ deux minutes.[28].

1.4.2 Domaine aéronautique

Le secteur aéronautique est un très grand consommateur de combustible fossile. Et de fait, les avions sont parmi les plus importants producteurs de GES dans le monde. Cependant, face à l'urgence de la crise écologique et des défis environnementaux auxquels la société doit faire face, ce secteur doit s'adapter.

L'une des solutions pour répondre à ces problématiques de transition énergétique serait de mélanger le carburant fossile avec des additifs oxygénés et métalliques. Les universités d'Amasya (Turquie) et de Coventry (Angleterre) ont travaillé sur ce projet et ont alors mis au point un nano fluide qui permettrait d'améliorer les propriétés thermiques et physiques des carburants : d'une part, les additifs oxygénés permettent une combustion complète et efficace du carburant. D'autre part, les nanoparticules métalliques, telles que l'alumine, l'oxyde de zinc ou encore la silice, donnent lieu à un meilleur transfert de chaleur. Elles favorisent ainsi l'interaction entre l'oxygène et les molécules de carburant afin de stimuler les réactions de combustion à haute altitude. En somme, les appareils peuvent augmenter leur capacité de charge utile, étendre leur distance de vol et voler à plus haute altitude, et ce, tout en économisant du carburant. Dans ces conditions, le processus de combustion se fait plus rapidement et plus proprement.[29].

Conclusion et perspectives

Conclusion sur le travail réalisé

Ce projet P6, traitant des particules métalliques utilisées comme combustible durable, a permis d'explorer de nouvelles perspectives dans le domaine de l'énergie et du développement durable. L'étude approfondie de ce sujet a révélé de nombreux avantages potentiels mais également des défis à relever.

D'une part, l'utilisation de particules métalliques comme combustible présente des avantages significatifs. Leur haute densité énergétique offre une alternative prometteuse aux sources d'énergie conventionnelles. En effet, elles peuvent stocker une quantité importante d'énergie et être utilisées de manière plus efficace que les combustibles fossiles. De plus, leur disponibilité abondante et leur potentiel de recyclage contribuent à réduire la dépendance aux ressources fossiles.

D'autre part, le projet a également mis en évidence certains défis à surmonter. Les questions liées à la sécurité, à la stabilité et à la durabilité des particules métalliques doivent être étudiées en profondeur afin d'assurer leur utilisation sans danger et de minimiser les impacts environnementaux potentiels. De plus, l'efficacité de conversion de l'énergie des particules métalliques en énergie utilisable doit être améliorée pour les rendre véritablement compétitives par rapport aux technologies existantes.

En conclusion, ce projet a ouvert la voie à de nouvelles recherches et à des avancées technologiques dans le domaine de l'énergie. Bien que des défis subsistent, l'utilisation des particules métalliques présente un potentiel prometteur pour une transition vers des sources d'énergie plus durables. Des efforts supplémentaires de recherche, de développement et de collaboration sont nécessaires pour optimiser cette technologie et la rendre viable industriellement. En combinant les avantages des particules métalliques avec des mesures adéquates de sécurité et de durabilité, nous pouvons envisager un avenir énergétique plus propre et plus durable.

Conclusion sur l'apport de l'EC projet

Ce projet a indéniablement renforcé notre esprit d'équipe et notre capacité à collaborer. En travaillant ensemble, nous avons développé une organisation structurée, ce qui a exigé méthode et coordination.

Il est important de souligner que la combustion de particules métalliques est un domaine relativement méconnu du grand public. Cela nous a incités à cultiver notre curiosité lors de nos recherches. Néanmoins, les informations disponibles provenaient principalement de sources spécialisées telles que des thèses et des articles pointus. Ainsi, nous avons pu affiner notre esprit critique et notre capacité de synthèse, en adoptant une approche de vulgarisation scientifique et en simplifiant le sujet pour le rendre plus accessible. Ce projet a donc constitué une occasion précieuse pour développer des compétences transversales telles que le travail d'équipe, la planification, la recherche et l'analyse critique. Il nous a également permis de nous familiariser avec un domaine émergent et complexe, et d'acquérir une meilleure compréhension des enjeux liés à l'utilisation des particules métalliques comme combustible durable.

Dans l'ensemble, cette expérience a été enrichissante à bien des égards. Elle nous a non seulement permis d'approfondir nos connaissances sur un sujet spécialisé, mais elle a également renforcé notre capacité à collaborer efficacement, à communiquer de manière claire et à présenter des informations de manière accessible. Ces compétences seront sans aucun doute précieuses dans notre parcours académique et professionnel futur.

Perspective pour la poursuite de ce projet

Il est évident que la combustion de particules métalliques doit passer du stade de la recherche à celui de l'industrialisation. Bien qu'elle soit encore peu connue du grand public, certains observent déjà de véritables enjeux économiques et écologiques dans la combustion de particules métalliques. C'est notamment le cas de Philip De Goey, professeur à l'Université de technologie d'Eindhoven aux Pays-Bas. Son organisation, Metalot, vise notamment la réutilisation complète des matières premières et l'application neutre en carbone des métaux et de l'énergie. L'un des premiers projets de Metalot, appelé MP100, est un système de 100 kW qui permet de produire de la chaleur à partir de ce processus.

Ainsi, à terme, nous pouvons espérer l'utilisation des particules métalliques dans nos moteurs thermiques ou même en remplacement des centrales à charbon. Cette transition pourrait contribuer de manière significative à la réduction des émissions de carbone et à la promotion d'une économie plus durable. L'engagement et les efforts déployés par des organisations telles que Metalot démontrent la volonté d'explorer et de concrétiser les avantages potentiels de la combustion de particules métalliques dans divers domaines.

En conclusion, bien que la combustion de particules métalliques en tant que combustible durable soit encore au stade de la recherche, les premières initiatives et les perspectives prometteuses démontrent un potentiel intéressant pour l'avenir. Il reste encore beaucoup à découvrir et à développer, mais avec un engagement continu, il est envisageable que les particules métalliques puissent jouer un rôle important dans la transition énergétique vers un avenir plus durable.

Bibliographie

- [1] IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY), *World Energy Outlook 2022*, Novembre 2022.
- [2] CÉDRIC PHILIBERT ET FRANÇOIS CATTIER, "L'énergie dans les pays en développement : les scénarios de l'AIE", La Jaune et la Rouge, N°597, Pages 49-52, Septembre 2004.
- [3] NATIONAL GEOGRAPHIC
<https://www.nationalgeographic.fr/environnement/tout-comprendre-e-sur-les-energies-fossiles>
(Valide à la date du 08/06/2023)
- [4] BP, "bp Statistical Review of World Energy 2022", 71e édition, 2022.
- [5] MCGILL UNIVERSITY
<https://www.mcgill.ca/newsroom/fr/channels/news/les-particules-de-metal-carburant-propre-de-lavenir-257172> (Valide à la date du 08/06/2023)
- [6] THE SHIFT PROJECT
<https://theshiftproject.org/> (Valide à la date du 13/06/2023)
- [7] JEAN-MARC JANCOVICI, "Vive la croissance verte !", L'Express, 24 Janvier 2021.
- [8] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, *Chiffres clés de l'énergie à l'international*
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/11-international> (Valide à la date du 13/06/2023)
- [9] GIEC, *Sixth Assessment Report, AR6*, 2023.
- [10] C'EST PAS SORCIER - L'EFFET DE SERRE
https://www.youtube.com/watch?v=M4Rg7zMIqdc&ab_channel=C%27estpassorcier
(Valide à la date du 08/06/2023)
- [11] GEO - QU'EST CE QUE L'EFFET DE SERRE
<https://www.geo.fr/environnement/quest-ce-que-leffet-de-serre-193565>
(Valide à la date du 08/06/2023)
- [12] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
<https://www.ecologie.gouv.fr/changement-climatique-causes-effets-et-enjeux>
(Valide à la date du 08/06/2023)
- [13] CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE
<https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/>
(Valide à la date du 08/06/2023)
- [14] AUSTRALIAN GOVERNMENT, "Transport energy futures : long-term oil supply trends and projections", Report 117, 2009.

- [15] ETUDE DE LA COMBUSTION LENTE DE PARTICULES DE MAGNÉSIUM
learning-center.uha.fr/sebinaBO/repository/images/UHA1/2019MULH2948_these_MOSER.pdf
 (Valide à la date du 08/06/2023)
- [16] LA COMBUSTION MÉTALLIQUE DANS LES MACHINES THERMIQUES
<https://theses.hal.science/tel-01622621>
 (Valide à la date du 08/06/2023)
- [17] LES PRINCIPAUX MINÉRAUX CONSTITUTIFS DE L'ÉCORCE TERRESTRE
<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/princ.mineraux.html>
 (Valide à la date du 08/06/2023)
- [18] CNRS - LE CARBURANT VENU DU SOLEIL
<https://lejournal.cnrs.fr/videos/le-carburant-du-futur-sera-t-il-une-poudre-metallique>
 (Valide à la date du 08/06/2023)
- [19] PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128518300327>
 (Valide à la date du 08/06/2023)
- [20] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/382-millions-de-voitures-en-circulation-en-france>
 (Valide à la date du 12/06/2023)
- [21] NOTRE ENVIRONNEMENT
<https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-des-transport>
 (Valide à la date du 12/06/2023)
- [22] EDF
<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/l-epuisement-des-ressources>
 (Valide à la date du 12/06/2023)
- [23] BEEV
<https://www.beev.co/voitures-electriques/recyclage-batterie-voiture-electrique/>
 (Valide à la date du 12/06/2023)
- [24] RICARDO LOMBA, "*Utilisation de la combustion métallique dans les machines thermiques*", Université d'Orléans, 2016.
- [25] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, *Bilan Énergétique en France*
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/6-bilan-energetique-de-la-france>
 (Valide à la date du 12/06/2023)

[26] HAPP-E

<https://www.happ-e.fr/actualites/comment-ca-marche/cout-production-electricite-france>

(Valide à la date du 12/06/2023)

[27] WIKIPÉDIA - MOTEUR-FUSÉE

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur-fus%C3%A9e>

(Valide à la date du 08/06/2023)

[28] ARIANE 5

http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/ariane/ariane5/caracteristiques.htm

(Valide à la date du 08/06/2023)

[29] ALTERNATIVE TO AVIATION FUEL BASED ON AN OXYGENATED NANOFUID

<https://techxplore.com/news/2022-11-alternative-aviation-fuel-based-oxygenated.html>

(Valide à la date du 08/06/2023)