

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

①① N° de publication : **3 062 958**

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

②① N° d'enregistrement national : **17 51108**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **H 01 M 8/249** (2017.01), H 01 M 8/247

①②

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤④ MODULE ELEMENTAIRE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE.

②② Date de dépôt : 10.02.17.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 17.08.18 Bulletin 18/33.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 05.04.19 Bulletin 19/14.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥① Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE  
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES —  
FR.

⑦② Inventeur(s) : FAUCHEUX VINCENT, BLANCHOT  
OLIVIER, CAPRON PHILIPPE et THERY JESSICA.

⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE  
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET NONY.

**FR 3 062 958 - B1**



La présente invention concerne un module élémentaire d'une pile à combustible ainsi qu'une pile à combustible comportant au moins un module élémentaire.

On connaît deux types principaux de piles à combustibles pour générer un courant électrique par oxydation d'un combustible, généralement du dihydrogène par un oxydant, généralement du dioxygène.

Un premier groupe de piles est formé des piles dites « planaires » telles que décrites dans FR 3 000 615 A1 et WO 2011/079377 A1. De telles piles à combustibles sont minces, leurs longueurs et largeurs étant grandes en regard de leurs épaisseurs respectives. Elles sont généralement alimentées en dioxygène par convection naturelle et leur puissance est faible, limitée à 100 W au plus.

Un deuxième groupe de piles est constitué par les piles comportant une pluralité de modules élémentaires minces s'étendant chacun selon une direction longitudinale, empilés les uns sur les autres et connectés électriquement en série. Chaque module élémentaire comporte une unité d'oxydation formée d'une anode et d'une cathode prenant en sandwich une membrane électrolytique, l'unité d'oxydation étant elle-même prise en sandwich entre des plaques bipolaires assurant d'une part l'alimentation de la cathode d'un module élémentaire au moyen d'un flux contenant l'oxydant et l'alimentation de l'anode du module élémentaire contigu au moyen d'un flux contenant le combustible, et d'autre part, la connexion électrique des unités d'oxydation, en faisant office de collecteurs d'électrons anodiques et cathodiques. Afin de diminuer les résistances électriques de contact entre les unités d'oxydation et les plaques bipolaires, et pour assurer l'étanchéité au combustible, les plaques bipolaires sont pressées contre les unités d'oxydation, classiquement au moyen de tirants de compression liés à des plaques terminales prenant en sandwich l'ensemble des modules élémentaires, par exemple tels que décrits dans US 2005/0095485 A1. En variante, WO 2013/134789 A1 décrit une pile à combustible comportant une ceinture de compression entourant et comprimant un assemblage constitué de deux plaques terminales prenant en sandwich un empilement de modules élémentaires. WO 03/083977 A1 décrit une pile à combustible comportant un empilement de modules élémentaires logé dans un caisson comportant une boîte et un couvercle pour fermer la boîte, la hauteur du logement étant inférieure à la hauteur de l'empilement avant fermeture du caisson. La boîte et le couvercle présentent des reliefs complémentaires, si bien qu'en encliquetant le couvercle sur la boîte, une compression est appliquée sur l'empilement.

Cependant, pour assurer la mise en compression de l'empilement des modules élémentaires dans les piles à combustible de l'art antérieur, il s'avère nécessaire de mettre en œuvre des éléments lourds, tels que des plaques terminales ou un caisson, réduisant ainsi la densité massique de puissance de la pile, définie comme le rapport de la puissance  
 5 apte à être générée par la pile sur la masse de la pile. Par ailleurs, les plaques bipolaires mises en œuvre dans les piles de l'art antérieur présentent des formes généralement complexes, nécessitant des nombreuses, complexes et coûteuses étapes de fabrication.

Il existe donc un besoin pour une pile à combustible permettant de s'affranchir des inconvénients précédemment cités.

10 A cette fin, l'invention propose, selon un premier de ses aspects un module élémentaire utile pour une pile à combustible, le module élémentaire comportant :

- une unité d'oxydation configurée pour générer des électrons au moyen de l'oxydation d'un combustible, de préférence du dihydrogène, par un oxydant, de préférence du dioxygène, l'unité d'oxydation comportant une anode et une cathode prenant  
 15 en sandwich une membrane électrolytique,

- un bloc anodique comportant un support transporteur de combustible adapté au transport d'un flux d'alimentation anodique contenant le combustible vers une chambre anodique, et un collecteur d'électrons anodiques fixé sur le support transporteur de combustible,

20 - un support transporteur d'oxydant adapté au transport d'un flux d'alimentation cathodique contenant l'oxydant vers une chambre cathodique, et un collecteur d'électrons cathodiques fixé sur le support transporteur d'oxydant,

le module élémentaire étant conformé de sorte à définir la chambre anodique, respectivement la chambre cathodique, entre l'unité d'oxydation et le support transporteur  
 25 de combustible, respectivement le support transporteur d'oxydant, le collecteur d'électrons anodiques, respectivement le collecteur d'électrons cathodiques, et l'unité d'oxydation étant à la fois fixés par collage et connectés électriquement l'un à l'autre au moyen d'un pont conducteur anodique, respectivement d'un pont conducteur cathodique, contenant un adhésif électriquement conducteur.

30 Avantageusement, une pile comportant au moins un module élémentaire selon le premier aspect de l'invention ne nécessite pas de moyen de mise en compression tels que ceux de l'art antérieur pour assurer une bonne connexion électrique entre l'anode et le

collecteur anodiques d'électrons d'une part, et entre la cathode et le collecteur d'électrons cathodiques d'autre part. En particulier, les ponts conducteurs anodique et cathodique assurent un contact électrique parfait entre les collecteurs d'électrons anodiques et collecteur d'électrons cathodiques respectivement et l'unité d'oxydation. Le module  
 5 élémentaire selon l'invention présente ainsi une faible résistance électrique totale sans application d'une compression extérieure. Cette faible résistance totale est en partie liée aux faibles résistances de contact internes au module élémentaire. En outre, les ponts conducteurs anodique et cathodique assurent, au moins partiellement, voire intégralement, la résistance mécanique du module élémentaire, en reliant rigidement les blocs anodique et  
 10 cathodique à l'unité d'électrolyse. Par ailleurs, la masse totale des ponts conducteurs anodique et cathodique est faible au regard de la masse des moyens nécessaires pour assurer la mise en compression d'une pile de même volume et comportant le même nombre de modules élémentaires qu'une pile de l'art antérieur. Ainsi, une pile comportant un module élémentaire selon le premier aspect de l'invention présente une densité massique  
 15 de puissance supérieure.

Par ailleurs, l'unité d'oxydation et le support transporteur de combustible peuvent être à la fois fixés par collage l'un à l'autre et isolés électriquement l'un de l'autre au moyen d'un pont d'étanchéité anodique contenant un adhésif électriquement isolant et étanche au combustible,  
 20 le pont d'étanchéité anodique étant conformé de sorte que le flux d'alimentation anodique transporté vers la chambre anodique s'écoule essentiellement du support transporteur de combustible directement vers l'anode. Outre l'étanchéité qu'il assure, comme cela apparaîtra plus clairement par la suite, le pont d'étanchéité anodique peut avantageusement participer à la résistance mécanique du module élémentaire.

25 L'invention concerne encore, selon un deuxième de ses aspects, un module élémentaire utile pour une pile à combustible, le module élémentaire comportant :

- une unité d'oxydation configurée pour générer des électrons au moyen de l'oxydation d'un combustible, de préférence du dihydrogène, par un oxydant, de préférence du dioxygène, l'unité d'oxydation comportant une anode,
- 30 - un support transporteur de combustible adapté au transport d'un flux d'alimentation anodique comportant le combustible vers une chambre anodique,

le module étant conformé de manière à définir ladite chambre anodique entre l'anode et le support transporteur de combustible,

l'unité d'oxydation et le support transporteur de combustible étant à la fois fixés par collage l'un à l'autre et isolés électriquement l'un de l'autre au moyen d'un pont d'étanchéité anodique contenant un adhésif électriquement isolant et étanche au combustible,

le pont d'étanchéité anodique étant conformé de telle sorte que lorsque le flux d'alimentation anodique est transporté vers la chambre anodique par le support transporteur de combustible, ledit flux d'alimentation anodique s'écoule essentiellement du support transporteur de combustible directement vers l'anode.

Avantageusement, une pile comportant au moins un module élémentaire selon le deuxième aspect de l'invention ne nécessite pas de moyen de mise en compression tels que ceux de l'art antérieur pour assurer l'étanchéité de la pile au combustible. En particulier, le pont d'étanchéité anodique assure que le combustible entrant dans la chambre anodique au moyen du support transporteur de combustible atteint l'anode tout en évitant qu'il ne fuite hors de la chambre anodique. Par ailleurs, au sein d'une pile à combustible comportant une pluralité de modules élémentaires selon le deuxième aspect de l'invention, la masse totale des ponts d'étanchéité anodique est faible au regard de la masse des moyens nécessaires pour assurer la mise en compression d'une pile de même volume et comportant le même nombre de modules élémentaires qu'une pile de l'art antérieur. Pour une masse identique à celle d'une pile de l'art antérieur, une pile comportant au moins un module élémentaire selon le deuxième aspect de l'invention présente donc une densité massique de puissance supérieure.

En outre, l'unité d'oxydation peut comporter une membrane électrolytique en contact de l'anode, l'anode étant disposée entre la chambre anodique et la membrane électrolytique et, optionnellement une couche collectrice anodique au contact d'une face de l'anode disposée en regard de la chambre anodique.

Par ailleurs, le module élémentaire peut comporter un bloc cathodique comportant un support transporteur d'oxydant adapté à l'introduction d'un flux d'alimentation cathodique contenant l'oxydant dans une chambre cathodique, l'unité d'oxydation comportant une cathode disposée au contact de la membrane électrolytique, la membrane électrolytique étant prise en sandwich entre l'anode et la cathode,

le module étant conformé de manière à définir ladite chambre cathodique entre la cathode et le support transporteur d'oxydant,

l'unité d'oxydation et le support transporteur d'oxydant étant à la fois fixés par collage l'un à l'autre et isolés électriquement l'un de l'autre au moyen d'un pont de fixation cathodique contenant un adhésif électriquement isolant.

Le module élémentaire peut comporter un bloc anodique comportant le collecteur d'électrons anodiques fixé sur le support transporteur de combustible, et le bloc cathodique peut comporter un collecteur d'électrons cathodiques fixé sur le support transporteur d'oxydant,

le collecteur d'électrons anodiques, respectivement le collecteur d'électrons cathodiques, et l'unité d'oxydation étant à la fois fixés par collage et connectés électriquement l'un à l'autre au moyen d'un pont conducteur anodique, respectivement d'un pont conducteur cathodique, contenant un adhésif électriquement conducteur.

L'invention concerne encore une pile à combustible comportant un module élémentaire selon l'un quelconque des premier et deuxième aspects de l'invention, ou une pluralité de modules élémentaires empilés les uns sur les autres selon une direction d'empilement, au moins un, de préférence tous les modules élémentaires de la pluralité étant chacun selon l'un quelconque des premier et/ou deuxième aspects de l'invention.

L'invention concerne une pile à combustible comportant une pluralité de modules élémentaires empilés les uns sur les autres selon une direction d'empilement, au moins un, de préférence tous les modules élémentaires de la pluralité comportant :

- une unité d'oxydation configurée pour générer des électrons au moyen de l'oxydation d'un combustible, de préférence du dihydrogène, par un oxydant, de préférence du dioxygène, l'unité d'oxydation comportant une anode et une cathode prenant en sandwich une membrane électrolytique,

- un bloc anodique comportant un support transporteur de combustible adapté au transport d'un flux d'alimentation anodique contenant le combustible vers une chambre anodique, et un collecteur d'électrons anodiques fixé sur le support transporteur de combustible,

- un bloc cathodique comportant un support transporteur d'oxydant adapté au transport d'un flux d'alimentation cathodique contenant l'oxydant vers une chambre

cathodique, et un collecteur d'électrons cathodiques fixé sur le support transporteur d'oxydant,

le au moins un module élémentaire étant conformé de sorte à définir la chambre anodique, respectivement la chambre cathodique, entre l'unité d'oxydation et le support transporteur  
5 de combustible, respectivement le support transporteur d'oxydant,

le au moins un module élémentaire étant tel que préalablement à l'assemblage du au moins un module élémentaire au sein de la pluralité de modules élémentaires de la pile à combustible, le bloc anodique, respectivement le bloc cathodique, et l'unité d'oxydation sont fixés l'un à l'autre.

10 La pile à combustible selon l'invention ne nécessite pas de moyen de compression pour assurer la connexion électrique entre les modules élémentaires et l'étanchéité au combustible de chaque module élémentaire. Elle présente donc une densité massique de puissance supérieure à une pile à combustible de même masse de l'art antérieur.

15 Par ailleurs, un module élémentaire de la pile à combustible n'étant pas comprimé par une force externe autre que le poids potentiel d'autres modules élémentaires disposés verticalement au-dessus dudit module élémentaire, le changement dudit module élémentaire est aisé dans le cas où ledit module élémentaire est défectueux. Notamment, comme cela apparaîtra plus clairement par la suite, deux modules élémentaires consécutifs  
20 peuvent être séparés l'un de l'autre selon la direction d'empilement. Le module élémentaire peut ainsi être extrait facilement de la pile à combustible en le faisant glisser selon une direction transversale à la direction de l'empilement.

Au sens de la présente invention, on considère que deux organes, par exemple le bloc anodique ou le bloc cathodique d'une part et l'unité d'oxydation d'autre part, sont  
25 fixés l'un à l'autre, dès lors qu'un autre organe relie rigidement lesdits deux organes. Par exemple, ledit autre organe est un pont adhésif, une vis ou un rivet. Au contraire, par exemple, l'assemblage de deux plaques parallèles maintenues entre elles sous l'application d'une force de compression normale à leurs faces ne définit pas une fixation au sens de l'invention, puisque les plaques peuvent notamment être déplacées l'une par rapport à  
30 l'autre dès lors que la force de compression est supprimée.

De préférence, le bloc anodique, respectivement le bloc cathodique, et l'unité d'oxydation sont fixés par collage et connectés électriquement l'un à l'autre, au moyen

d'un pont conducteur anodique, respectivement d'un pont conducteur cathodique, contenant un adhésif électriquement conducteur.

De préférence, le bloc anodique, respectivement le bloc cathodique, comporte un collecteur d'électrons anodiques fixé sur le support transporteur de combustible, respectivement un collecteur d'électrons cathodiques fixé sur le support transporteur d'oxydant, le pont conducteur anodique et le collecteur d'électrons anodiques, respectivement le pont conducteur cathodique et le collecteur d'électrons cathodiques étant à la fois fixés par collage et connectés électriquement l'un à l'autre.

De préférence, l'unité d'oxydation et le support transporteur de combustible sont à la fois fixés par collage l'un à l'autre et isolés électriquement l'un de l'autre au moyen d'un pont d'étanchéité anodique contenant un adhésif électriquement isolant et étanche au combustible, le pont d'étanchéité anodique étant conformé de sorte que le flux d'alimentation anodique transporté vers la chambre anodique s'écoule essentiellement directement du support transporteur de combustible vers l'anode.

Enfin, l'invention concerne un appareil, notamment choisi parmi un objet volant, par exemple un drone, une bicyclette et un générateur électrique, par exemple un chargeur pour recharger électriquement un ensemble de dispositifs nomades, ledit appareil comportant une pile à combustible selon l'invention.

Le module élémentaire et la pile à combustible selon l'un quelconque des aspects de l'invention décrits ci-dessus peuvent en outre comporter une plusieurs des caractéristiques décrites ci-après.

De préférence, le module élémentaire est « planaire », c'est-à-dire qu'il s'étend de manière générale selon un plan longitudinal. Un module élémentaire planaire est particulièrement bien adapté à former un empilement d'une pile à combustible. En particulier, le module élémentaire peut être « mince », c'est-à-dire que son épaisseur, définie comme étant la valeur moyenne des distances, mesurée selon une direction transverse au plan longitudinal, entre deux faces extérieures longitudinales opposées du module élémentaire, est au moins 50 fois inférieure, de préférence au moins 2500 fois inférieure à la longueur du module élémentaire, mesurée dans le plan longitudinal.

En particulier, les longueur et/ou largeur et/ou épaisseur du module élémentaire peuvent être respectivement comprises entre 10 mm et 500 mm, entre 10 mm et 500 mm,

et entre 0,2 mm et 2 mm. De préférence, les faces extérieures longitudinales du module élémentaire opposées sont parallèles.

Par ailleurs, lorsque le bloc d'oxydation est alimenté en combustible et en oxydant, les électrons générés par l'unité d'oxydation sur les faces des anodes et cathodes opposées aux faces respectives en regard de la membrane, dits électrons anodiques et électrons cathodiques respectivement, transitent par le collecteur d'électrons anodiques et par le collecteur d'électrons cathodiques respectivement. Pour collecter plus d'électrons d'anodiques et/ou d'électrons cathodiques et ainsi améliorer le rendement énergétique du module élémentaire, l'unité d'oxydation comporte de préférence une couche collectrice anodique, disposée sur la face de l'anode opposée à la face de l'anode en regard de la membrane électrolytique, et/ou une couche collectrice cathodique, disposée sur la face de la cathode opposée à la face en regard de la membrane électrolytique.

De préférence, la couche collectrice anodique, respectivement la couche collectrice cathodique est séparée du support transporteur de combustible, respectivement du support transporteur d'oxydant par la chambre anodique, respectivement par la chambre cathodique.

La couche collectrice anodique et/ou la couche collectrice cathodique peuvent se présenter sous la forme d'un film mince, de préférence d'une épaisseur inférieure à 100  $\mu\text{m}$ , et poreux de sorte à permettre au flux d'alimentation anodique d'atteindre l'anode, respectivement au flux d'alimentation cathodique d'atteindre la cathode. La couche collectrice anodique et/ou la couche collectrice cathodique peuvent être déposées respectivement sur la face de l'anode et/ou sur la face de la cathode par impression 3D ou par dépôt sous vide, par exemple chimique en phase vapeur, ou physique en phase vapeur. De préférence, la couche collectrice anodique et/ou la couche collectrice cathodique sont formés d'un métal, de préférence de l'or.

En particulier, la couche collectrice anodique peut occuper entre 50 % et 100 % de l'aire de la face de l'anode qu'elle recouvre et/ou la couche collectrice cathodique peut occuper entre 50 et 100 % de l'aire de la face de la cathode qu'elle recouvre.

En ce qui concerne les ponts conducteurs anodique et cathodique, ils permettent respectivement le transfert des électrons anodiques de l'anode vers le collecteur d'électrons anodiques, et des électrons cathodiques de la cathode vers le collecteur d'électrons cathodiques.

En particulier, le pont conducteur anodique peut être fixé par collage sur l'anode et/ou sur la couche collectrice anodique et/ou sur la membrane électrolytique. Pour sa part, le pont conducteur cathodique peut être fixé par collage sur la cathode et/ou sur la couche collectrice cathodique et/ou sur la membrane électrolytique.

5 Le pont conducteur anodique peut être disposé entre l'anode et le support transporteur de combustible de sorte à définir partiellement la chambre anodique, et en particulier au moins partiellement, voire totalement, une paroi de ladite chambre anodique, notamment s'étendant selon une direction transversale. Pour sa part, le pont conducteur cathodique peut être disposé entre la cathode et le support transporteur d'oxydant de sorte à  
10 définir partiellement la chambre cathodique, et en particulier au moins partiellement, voire totalement, une paroi de ladite chambre cathodique, notamment s'étendant selon une direction transversale.

De préférence, le pont conducteur anodique est pris en sandwich entre le bloc d'oxydation et le collecteur d'électrons anodiques et/ou le pont conducteur cathodique est  
15 pris en sandwich entre le bloc d'oxydation et le collecteur d'électrons cathodiques.

De préférence, le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique recouvrent au moins partiellement, voire intégralement, le collecteur d'électrons anodiques et/ou le collecteur d'électrons cathodiques respectivement. De cette façon, le transfert électronique entre l'anode et le collecteur d'électrons anodiques et/ou  
20 entre la cathode et le collecteur d'électrons cathodiques est optimal.

Le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique peuvent être de formes variées. Ils peuvent chacun se présenter sous la forme d'au moins un plot ou d'au moins une bande, continue ou discontinue, ou d'au moins une surface s'étendant selon deux directions perpendiculaires.

25 Les plots ou les bandes peuvent former un motif régulier, voire périodique. Par exemple, les plots peuvent être disposés selon un réseau formé par la répétition périodique selon deux directions perpendiculaires d'un motif carré, et à chaque sommet d'un des motifs du réseau. Un plot peut présenter une forme de prisme droit, notamment à base carrée ou rectangulaire, ou une forme cylindrique de révolution. Le diamètre du plot,  
30 correspondant à la plus grande longueur dans une direction perpendiculaire à la génératrice du prisme, peut être compris entre 0,1 mm et 10 mm. Dans la variante où le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique se présentent sous la forme d'au

moins une bande, de préférence, la largeur d'au moins une, de préférence de chacune des bandes est comprise entre 0,1 mm et 10 mm.

En particulier, le rapport de l'aire de la projection du pont conducteur anodique sur l'aire de la projection du support transporteur de combustible peut être compris entre 1 % et 50 % et/ou le rapport de l'aire de la projection du pont conducteur cathodique, sur l'aire de la projection du support transporteur de combustible, peut être compris entre 1 % et 50 %, lesdites projections étant effectuées sur le plan longitudinal selon lequel s'étend le module élémentaire et selon une direction transverse audit plan longitudinal.

Le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique peuvent présenter une épaisseur, comprise entre 1  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ . En particulier, le pont conducteur anodique peut faire saillie de la face de l'anode sur laquelle il est disposé et/ou le pont conducteur cathodique peut faire saillie de la face de la cathode sur laquelle il est disposé.

Par ailleurs, dans la variante où le pont conducteur anodique, respectivement le pont conducteur cathodique se présente sous la forme d'au moins une bande discontinue, l'espace défini entre les deux portions de la bande et s'étendant entre des plans parallèles aux faces latérales de la bande peut être au moins partiellement, voire intégralement rempli par un pont d'isolation anodique, respectivement un pont d'isolation cathodique. Le pont conducteur anodique et le pont d'isolation anodique peuvent définir au moins partiellement une paroi transverse de la chambre anodique, par exemple ceinturant intégralement la chambre anodique, et/ou le pont conducteur cathodique et le pont d'isolation cathodique peuvent définir au moins partiellement une paroi transverse de la chambre cathodique, par exemple ceinturant intégralement la chambre cathodique.

Le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique peuvent être formés sur le bloc anodique et/ou sur le bloc cathodique respectivement, ou sur l'unité d'oxydation par impression d'une colle comportant l'adhésif électriquement conducteur, par exemple par sérigraphie, par pulvérisation ou par dispense.

Le pont conducteur anodique et le pont conducteur cathodique contiennent chacun un adhésif électriquement conducteur.

L'adhésif électriquement conducteur peut notamment présenter une conductivité anisotrope. De préférence, le pont conducteur anodique, respectivement le pont conducteur cathodique, est tel que la direction de plus grande conductivité électrique

de l'adhésif électriquement conducteur est parallèle à la direction normale à l'épaisseur du pont conducteur anodique, respectivement du pont conducteur cathodique.

De préférence, l'adhésif électriquement conducteur comporte, voire consiste en une résine polymère dans laquelle sont dispersées des particules de carbone, par exemple sous forme de graphène, et/ou des particules métalliques. De préférence, les particules métalliques comprennent, voire consistent en un métal choisi parmi l'argent, l'or et leurs alliages, ou sont formées d'un cœur métallique, de préférence en un métal choisi parmi le cuivre et le nickel et leurs alliages, recouvert d'un revêtement en carbone ou d'un revêtement métallique, de préférence en un métal choisi parmi l'or, l'argent et leurs alliages.

En particulier, l'adhésif électriquement conducteur du pont conducteur anodique peut être identique ou différent de l'adhésif électriquement conducteur du pont conducteur cathodique.

Par exemple, à titre illustratif, l'adhésif peut être Le TRA-DUCT 2902 commercialisé par la société Tra-Con.

Pour sa part, l'unité d'oxydation est de préférence disposée entre le bloc anodique et le bloc cathodique.

De préférence, l'unité d'oxydation s'étend selon un plan parallèle ou confondu avec le plan longitudinal. En particulier, l'unité d'oxydation peut présenter la forme d'une plaque composite et/ou chacune des anode, cathode et membrane électrolytique peut présenter la forme d'une plaque s'étendant selon un plan parallèle au plan longitudinal.

En particulier, l'épaisseur de l'unité d'oxydation peut être supérieure ou égale à 0,01 mm et/ou inférieure ou égale à 0,5 mm.

De préférence, l'anode et/ou la cathode sont fixées sur la membrane électrolytique, par exemple par séchage d'une encre déposée par pulvérisation sur l'anode, respectivement la cathode et/ou la membrane, et contenant des catalyseurs à base de carbone platiné (C/Pt).

L'anode peut comporter, voire consister en un mélange de C/Pt et de Nafion, et/ou la membrane peut être au moins partiellement, voire intégralement formée de Nafion, et/ou la cathode peut comporter, voire consister en un mélange de C/Pt et de Nafion.

Par ailleurs, en ce qui concerne le support transporteur de combustible et le support transporteur d'oxydant, de préférence au moins l'un deux, de préférence tous les deux s'étendent selon un plan parallèle au plan longitudinal.

De préférence, le support transporteur de combustible et/ou le support transporteur d'oxydant peuvent se présenter chacun sous la forme d'une plaque. De tels supports transporteur de combustible et/ou support transporteur d'oxydant sont ainsi de fabrication simple, rapide et peu coûteuse.

Le support transporteur de combustible et le support transporteur d'oxydant sont conformés pour introduire respectivement le flux d'alimentation anodique contenant le combustible dans la chambre anodique et le flux d'alimentation cathodique contenant l'oxydant dans la chambre cathodique. A cette fin, le support transporteur de combustible et/ou le support transporteur d'oxydant peuvent comporter des trous, par exemple des perçages, traversant le support transporteur de combustible et/ou le support transporteur d'oxydant respectivement dans leurs épaisseurs respectives. En variante, le support transporteur de combustible et/ou le support transporteur d'oxydant peuvent se présenter chacun sous la forme d'une mousse présentant une porosité ouverte et percolante au moins dans la direction de son épaisseur. De cette manière, le flux d'alimentation anodique et/ou le flux d'alimentation cathodique peuvent s'écouler dans l'épaisseur du support transporteur de combustible et/ou du support transporteur d'oxydant respectivement.

Le support transporteur de combustible et le support transporteur d'oxydant peuvent comporter, voire consister en un matériau polymère, par exemple thermoplastique, et notamment choisi parmi le polyéthylène téréphtalate PET, le polyéthylène PE, le polycarbonate PC, le FR4, le Kapton et leurs mélanges.

Dans une variante, le support transporteur de combustible et/ou le support transporteur d'oxydant peuvent présenter la forme d'une grille plane. De préférence, la face de la grille en regard de la chambre anodique, respectivement de la chambre cathodique, est recouverte au moins partiellement, voire de préférence intégralement par un ensemble formé d'un film électriquement isolant et d'un film métallique électriquement conducteur définissant le collecteur d'électrons anodiques, respectivement le collecteur d'électrons cathodiques. De préférence, le film électriquement isolant, et optionnellement le film électriquement conducteur, est poreux, de manière à permettre le transport du combustible ou de l'oxydant selon son épaisseur. De préférence, l'épaisseur du film

électriquement isolant et/ou l'épaisseur du film électriquement conducteur est comprise entre 10  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$ . De préférence, le film électriquement conducteur et le film électriquement isolant recouvrent des portions distinctes et de préférence non superposées de la face de la grille en regard de la chambre anodique, respectivement de la chambre cathodique. Par exemple, le pont conducteur anodique cathodique est fixé par collage sur le film électriquement conducteur du support transporteur de combustible formant le collecteur d'électrons anodiques et le pont conducteur cathodique est fixé par collage sur le film électriquement conducteur du support transporteur d'oxydant formant le collecteur d'électrons cathodiques. De préférence, le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique sont disposés à distance du film électriquement isolant conducteur du support transporteur de combustible, respectivement du support transporteur d'oxydant.

Comme décrit précédemment, un collecteur d'électrons anodiques et un collecteur d'électrons cathodiques sont fixés, de préférence par collage sur le support transporteur de combustible et sur le support transporteur d'oxydant respectivement. Au moins une extrémité du collecteur d'électrons anodiques, respectivement du collecteur d'électrons cathodiques, peut faire saillie, par exemple latéralement, du module élémentaire, et être connecté électriquement à un connecteur de reprise de contact, pour connecter le module élémentaire à un appareil électrique ou à un autre module élémentaire, par exemple le module élémentaire consécutif de l'empilement de modules élémentaires d'une pile à combustible comportant une pluralité de modules élémentaires.

Dans un mode de réalisation, le collecteur d'électrons anodiques peut être imprimé sur le support transporteur de combustible et/ou le collecteur d'électrons cathodiques peut être imprimé sur le support transporteur d'oxydant, formant ainsi un bloc anodique, respectivement un bloc cathodique. Le bloc anodique et/ou le bloc cathodique ainsi formés se présentent alors sous la forme de circuit imprimés, ce qui facilite la fabrication du module élémentaire, et notamment le positionnement relatif du ou desdits supports transporteurs de combustible et d'oxydant par rapport à l'unité d'oxydation lors de l'assemblage des éléments constitutifs du module élémentaire.

De préférence, le collecteur d'électrons anodiques et/ou le collecteur d'électrons cathodiques se présentent au moins partiellement sous la forme de bandes espacées les unes des autres, de préférence formant un motif régulier voire périodique, par

exemple un quadrillage. Par exemple, la ou les bandes s'étendent latéralement dans le plan longitudinal, et notamment entre deux faces latérales opposées du module élémentaire.

Par ailleurs, le rapport  $R$  de l'aire  $S_A$  de la projection du collecteur d'électrons anodiques, sur l'aire  $S$  de la projection du support transporteur de combustible, est de préférence compris entre 0,01 et 0,50, et/ou le rapport  $R'$  de l'aire  $S'_A$  de la projection du collecteur d'électrons cathodiques, sur l'aire  $S'$  de la projection du support transporteur de combustible, est compris entre 0,01 et 0,50, lesdites projections étant effectuées sur le plan longitudinal, et selon une direction transversale audit plan longitudinal. Les rapports  $R$  et  $R'$  peuvent être différents ou égaux.

Ainsi, la résistance de contact entre le collecteur d'électrons anodiques et/ou le collecteur d'électrons cathodiques d'une part et l'unité d'oxydation d'autre part est réduite.

De préférence, le collecteur d'électrons anodiques, respectivement le collecteur d'électrons cathodiques, fait saillie, de préférence selon une direction transversale, de la face du support transporteur de combustible, respectivement à l'épaisseur du support transporteur d'oxydant sur laquelle il est fixé, la hauteur de ladite saillie étant par exemple égale à l'épaisseur dudit collecteur d'électrons anodiques, respectivement du collecteur d'électrons cathodiques. Le collecteur d'électrons anodiques, respectivement le collecteur d'électrons cathodiques, définit ainsi au moins partiellement un espaceur séparant le support transporteur de combustible, respectivement le support transporteur d'oxydant, de l'unité d'oxydation, ledit espaceur définissant partiellement la chambre anodique, respectivement la chambre cathodique.

De préférence, l'épaisseur du collecteur d'électrons anodique et/ou l'épaisseur du collecteur d'électrons cathodiques est inférieure à 100  $\mu\text{m}$ .

Le collecteur d'électrons anodiques et/ou le collecteur d'électrons cathodiques sont de préférence métalliques, et peuvent comporter, notamment pour plus de 99,0% de leur masse, du carbone et/ou un métal choisi parmi l'argent, le tantale, le molybdène, le cuivre et leurs alliages. Un tel métal ou alliage conduit aisément les électrons collectés sur les anode et cathode. Dans une variante, le collecteur d'électrons anodiques et/ou le collecteur d'électrons cathodiques peuvent comporter une couche formée dudit métal, fixée sur le support transporteur de combustible, respectivement sur le support transporteur d'oxydant, recouverte par un film protecteur et conducteur formé d'un autre métal ou

d'une superposition de couches, chaque couche étant en un métal différent de celui des autres couches du film, ledit film pouvant présenter une épaisseur inférieure à 10  $\mu\text{m}$ .

Par ailleurs, comme cela a été décrit précédemment, le module élémentaire peut comporter un pont d'isolation anodique et/ou un pont d'isolation cathodique, le pont d'isolation cathodique étant formé d'au moins un matériau électriquement isolant. De préférence, le pont d'isolation anodique est disposé entre l'unité d'oxydation et le collecteur d'électrons anodiques. Il peut être en contact direct avec l'unité d'oxydation et avec le collecteur d'électrons anodiques. De préférence, le pont d'isolation cathodique est disposé entre l'unité d'oxydation et le collecteur d'électrons cathodiques. Il peut être en contact direct avec l'unité d'oxydation et avec le collecteur d'électrons cathodiques.

De préférence, le pont d'isolation anodique et/ou le pont d'isolation cathodique se présentent sous la forme d'un film mince, par exemple présentant une épaisseur comprise entre 1  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ . De préférence, le pont d'isolation anodique et/ou le pont d'isolation cathodique sont disposés respectivement sur une portion de la face du collecteur d'électrons anodiques en regard de l'unité d'oxydation et/ou sur une portion de la face du collecteur d'électrons cathodiques en regard de l'unité d'oxydation, ladite ou lesdites portions étant différentes de portions recouvertes par le pont conducteur anodique et/ou par le pont conducteur cathodique. Le pont d'isolation anodique, respectivement le pont d'isolation cathodique, protège ainsi la portion de la face du collecteur d'électrons anodiques, respectivement du collecteur d'électrons cathodiques, non recouverte par le pont conducteur anodique, respectivement par le pont conducteur cathodique.

Notamment, le pont isolant anodique et/ou le pont isolant cathodique peuvent se présenter sous la forme d'une ou plusieurs bandes interrompues, de plots, notamment formant un motif régulier, tel qu'un quadrillage.

Pour sa part, la chambre anodique, respectivement la chambre cathodique, est de préférence disposée entre le support transporteur de combustible, respectivement le support transporteur d'oxydant, et l'unité d'oxydation.

De préférence, la chambre anodique et/ou la chambre cathodique s'étendent selon un plan parallèle au plan longitudinal. De préférence, la chambre anodique est définie au moins partiellement, voire intégralement par :

- la face extérieure de l'anode opposée à la face au contact de la membrane électrolytique, et s'étendant de préférence selon un plan parallèle au plan longitudinal,
- 5 - la face du support transporteur de combustible en regard de la face extérieure de l'anode, et s'étendant de préférence selon un plan parallèle au plan longitudinal, et
- le pont d'étanchéité anodique.

La chambre anodique est conformée de telle sorte que lorsqu'elle est alimentée en combustible, la pression en combustible dans la chambre est supérieure à la pression atmosphérique, ce qui permet d'assurer une réaction d'oxydation efficace du combustible au niveau de l'unité d'oxydation. De préférence, le pont d'étanchéité anodique définit un joint d'étanchéité au combustible s'étendant transversalement au plan longitudinal entre le bloc anodique et l'unité d'oxydation et ceinturant, de préférence intégralement, la chambre anodique dans un plan parallèle au plan longitudinal. De cette façon, le pont d'étanchéité anodique réduit les fuites de combustible hors de la chambre anodique par écoulement du fluide selon des directions contenues dans le plan longitudinal.

De préférence, le pont conducteur anodique et/ou le pont d'étanchéité anodique sont conformés de sorte à éviter le délaminage de l'unité d'oxydation du bloc anodique, lorsque la pression de combustible est comprise entre 0.1 bar et 5 bar. L'homme du métier sait aisément déterminer les propriétés de l'adhésif électriquement isolant et étanche au combustible et/ou de l'adhésif électriquement conducteur et définir les dimensions du pont conducteur anodique et/ou du pont d'étanchéité anodique à cette fin.

De préférence, le pont d'étanchéité anodique est fixé par collage à l'anode et/ou à la couche collectrice anodique et/ou à la membrane électrolytique. Le pont d'étanchéité anodique peut notamment être obtenu par impression d'une colle comportant l'adhésif électriquement isolant et étanche au combustible, notamment par sérigraphie, ou pulvérisation ou dispense ou report d'un film adhésif.

L'adhésif électriquement isolant et étanche au combustible peut notamment être choisi parmi les adhésifs type polyuréthane ou de type époxy. Par exemple, il peut être la colle IRS 2125 commercialisée par la société Intertronics.

Le pont d'étanchéité anodique peut présenter des formes variées. Il se présente de préférence sous la forme d'une bande continue, de préférence fermée sur elle-même et au contact de chacune des faces longitudinales opposées de la chambre anodique.

5 Par ailleurs, le module élémentaire peut comporter un réservoir présentant un volume intérieur pour contenir le combustible, la chambre anodique étant en communication fluidique avec le volume intérieur du réservoir au moyen du support transporteur de combustible. Ainsi, le réservoir définit une réserve de combustible permettant d'assurer l'alimentation en combustible de la chambre anodique.

10 De préférence, le support transporteur de combustible définit une paroi du réservoir. Dans un mode de réalisation, le réservoir et le support transporteur de combustible peuvent former un bloc monolithique.

De préférence, le réservoir comporte un orifice de remplissage conformé pour être relié, par exemple au moyen d'un conduit, à une pompe d'alimentation en combustible ou à une cartouche de génération de combustible, par exemple à une cartouche de 15 génération de dihydrogène par hydrolyse d'hydrures. De préférence, dans la configuration du module élémentaire où l'orifice de remplissage est hermétiquement fermé, l'ensemble formé par le volume intérieur du réservoir et le volume de la chambre anodique est hermétiquement clos et étanche au combustible.

Pour leur part, dans un mode de réalisation, le support transporteur d'oxydant 20 et l'unité d'oxydation peuvent être à la fois fixés l'un à l'autre par collage et isolés électriquement l'un de l'autre au moyen d'un pont de fixation cathodique contenant un adhésif électriquement isolant. L'adhésif électriquement isolant du pont de fixation cathodique peut être identique ou différent de l'adhésif électriquement isolant du pont d'étanchéité anodique.

25 Ainsi, les pont de fixation cathodique et/ou pont conducteur cathodique assurent au moins partiellement, de préférence intégralement la résistance mécanique de la liaison entre le support transporteur et d'oxydant et l'unité d'électrolyse.

Par ailleurs, de préférence, le pont de fixation cathodique peut définir une paroi 30 transversale de la chambre cathodique, qui peut être fermée sur elle-même de sorte à définir un joint d'étanchéité à l'oxydant, ou au contraire présenter des ouvertures, de sorte à faciliter l'écoulement de l'oxydant hors de ou vers la chambre cathodique.

Par ailleurs, le module élémentaire peut comporter une pluralité d'unités d'électrolyse partageant la même membrane électrolytique et étant de préférence disposées selon un agencement planaire. En variante, il peut comporter une unique unité d'électrolyse.

5 Le module élémentaire peut aussi comporter une couche de diffusion de gaz, de préférence disposée sur une face du support transporteur d'oxydant opposée à la face en regard de la chambre anodique, et recouverte d'une grille poreuse. La couche de diffusion de gaz et la grille participent au maintien d'un niveau d'humidité adapté à la génération d'électricité. La couche de diffusion du gaz peut être électriquement isolante ou au  
10 contraire électriquement conductrice. Elle peut être hydrophile ou au contraire hydrophobe. La grille poreuse peut être métallique, et optionnellement recouverte d'un matériau électriquement isolant, ou en matière plastique.

Le module élémentaire peut être configuré pour générer une puissance électrique comprise entre 1 W et 500 W.

15 La masse du module élémentaire peut être comprise entre 1 g et 1000 g.

Pour ce qui concerne la pile à combustible, de préférence chaque module élémentaire de la pluralité de modules s'étend selon un plan longitudinal oblique, de préférence perpendiculaire à la direction d'empilement.

20 Les modules élémentaires de la pile peuvent être électriquement connectés entre eux en série ou en parallèle.

De préférence, la pile à combustible est exempte de moyens de compression de la pluralité de modules élémentaires. En particulier, la pile à combustible peut être exempte de plaques terminales disposées aux extrémités opposées de l'empilement et notamment reliées par au moins un organe de compression.

25 Par exemple, la pile peut comporter un châssis sous forme d'une étagère comportant une pluralité de casiers disposés les uns à la suite des autres selon la direction d'empilement, chaque casier s'étendant selon un plan transverse à la direction d'empilement. De préférence, au moins un, voire de préférence plusieurs casiers sont configurés pour loger chacun au moins un module élémentaire. En particulier, au moins  
30 deux modules consécutifs de l'empilement peuvent être séparés l'un de l'autre. De cette façon, les modules élémentaires de l'empilement ne reposent pas les uns sur les autres, le

poids de chaque module élémentaire étant supporté par le châssis. Le remplacement d'un module élémentaire défectueux est ainsi facilité.

5 Dans un mode de réalisation, les modules élémentaires peuvent être espacés les uns des autres selon la direction d'empilement, de manière régulière, notamment périodique.

Par ailleurs, d'une façon préférée, au moins deux modules consécutifs de l'empilement sont disposés tête-bêche selon la direction d'empilement. Comme cela sera détaillé par la suite, cette disposition permet de limiter le nombre d'organes nécessaires pour alimenter l'empilement de modules élémentaires en combustible et/ou en oxydant.

10 Par ailleurs, la pile peut comporter au moins un moyen pour générer le flux d'alimentation en oxydant, et optionnellement un moyen pour générer le moyen d'alimentation en combustible, de manière à assurer la génération d'énergie électrique par le au moins un module élémentaire. Elle peut aussi comporter au moins un moyen, par exemple un ventilateur, pour générer un flux de refroidissement, de manière à récupérer  
15 par échange convectif la chaleur générée par le au moins un module élémentaire lors de la réaction d'oxydation du combustible.

De préférence, la pile est conformée pour définir au moins un canal d'alimentation cathodique configuré pour transporter le flux d'alimentation cathodique contenant l'oxydant jusqu'à au moins un module élémentaire, et/ou au moins un canal de  
20 refroidissement configuré pour transporter un flux de refroidissement comportant un fluide caloporteur, de préférence de l'air, de manière à échanger de la chaleur par convection avec le au moins un module élémentaire.

En particulier, le canal d'alimentation cathodique et/ou le canal de refroidissement peuvent présenter une forme tubulaire, s'étendant selon une direction  
25 contenue dans un plan parallèle aux plans longitudinaux selon lesquels s'étendent les modules élémentaires entre lesquels est disposé le canal d'alimentation cathodique et/ou le canal de refroidissement respectivement. De préférence le canal d'alimentation cathodique est défini par deux faces latérales, de préférence parallèles à la direction d'empilement, opposées de la pile et par les faces latérales en regard des modules élémentaires entre  
30 lesquels ledit canal est disposé. La perte de charge liée à la forme tubulaire du canal d'alimentation cathodique et/ou du canal de refroidissement est faible et la pile à

combustible peut être exempté de moyen pour générer le flux d'alimentation cathodique et/ou le flux de refroidissement respectivement.

En variante, le canal d'alimentation cathodique et/ou le canal de refroidissement peuvent présenter une forme comportant une pluralité de portions de tube  
5 reliées par des portions coudées. Les portions de tube peuvent par exemple effectuer des allers et retours entre les faces latérales opposées de la pile. De telles formes coudées favorisent notamment l'échange de chaleur dans le canal de refroidissement. En variante, le canal d'alimentation cathodique et/ou le canal de refroidissement peuvent être formés  
10 chacun d'une pluralité de serpentins s'étendant entre les ouvertures d'entrée et de sortie dudit canal d'alimentation cathodique et/ou dudit canal de refroidissement respectivement, les serpentins étant parallèles les uns aux autres. Dans une autre variante, le canal d'alimentation cathodique est formé d'une pluralité de tubes, deux tubes voisins partageant une paroi commune. En particulier, les tubes de la pluralité peuvent être parallèles les uns  
15 aux autres et être disposés entre les faces en regard de deux modules élémentaires consécutifs. De telles formes de canal d'alimentation cathodique et/ou de canal de refroidissement favorisent l'alimentation en oxydant et/ou l'échange thermique respectivement. De préférence, pour compenser la perte de charge liées à la présence de multiples parois internes et/ou de coudes dans le canal d'alimentation cathodique et/ou  
20 dans le canal de refroidissement, la pile à combustible peut comporter un générateur de flux d'alimentation cathodique et/ou un générateur de flux de refroidissement respectivement, de préférence comportant un compresseur.

En particulier, le générateur de flux de refroidissement et/ou le générateur de flux d'alimentation cathodique peuvent être choisis parmi un ventilateur, notamment axial ou radial, une turbine et un compresseur.

25 Dans la variante préférée ou l'oxydant est du dioxygène, le flux d'alimentation cathodique est de préférence un flux d'air. En particulier, le générateur de flux de refroidissement et/ou le générateur de flux d'alimentation cathodique peuvent fonctionner en extraction ou en soufflerie d'air, en régime continu ou en mode de modulation de largeur d'impulsion (ou « PWM » pour l'acronyme anglais de Pulse Width Modulation).

30 Par ailleurs, la pile peut comporter un unique ou plusieurs générateur de flux de refroidissement et/ou un unique ou plusieurs générateurs de flux d'alimentation cathodique. Par exemple, la pile à combustible peut comporter une pluralité de générateurs

de flux de refroidissement tel que chacun des générateurs de la pluralité alimente un unique couple formé de deux modules élémentaires.

De préférence, le au moins un module élémentaire est disposé entre le canal d'alimentation cathodique et le canal de refroidissement. De préférence, le canal  
5 d'alimentation cathodique s'étend selon une direction d'extension oblique, de préférence orthogonale, à la direction d'extension selon laquelle s'étend le canal de refroidissement. De préférence, les plans selon lesquels s'étendent généralement le canal d'alimentation cathodique et le canal de refroidissement sont distincts et parallèles, et de préférence perpendiculaires à la direction d'empilement.

10 De préférence, le canal d'alimentation cathodique présente au moins une ouverture d'entrée, respectivement au moins une ouverture de sortie, pour l'écoulement en entrée, respectivement en sortie de pile du flux d'alimentation cathodique, et le canal de refroidissement présente au moins une ouverture d'entrée, respectivement au moins une  
15 ouverture de sortie, pour l'écoulement en entrée, respectivement en sortie de pile du flux de refroidissement, les ouvertures d'entrée et ouvertures de sortie desdits canaux d'alimentation cathodique et canaux de refroidissement étant conformées pour que les flux d'alimentation cathodique en entrée et sortie de pile s'écoulent selon au moins une direction oblique, de préférence perpendiculaire, à la au moins une direction d'écoulement des flux de refroidissement en entrée et sortie de pile.

20 De préférence, les ouvertures d'entrée et ouvertures de sortie desdits canaux d'alimentation cathodique et de refroidissement sont conformées pour que la ou les directions d'écoulement des flux d'alimentation cathodique en entrée et sortie de pile et la ou les directions d'écoulement des flux de refroidissement soient contenues dans des plans distincts et parallèles, et de préférence perpendiculaires à la direction d'empilement.

25 Par l'une quelconque des caractéristiques décrites dans les trois paragraphes immédiatement précédents, on limite ainsi les risques d'interaction entre le flux d'alimentation cathodique et le flux de refroidissement, qui peut avoir un impact négatif sur le rendement énergétique de la pile.

30 Les ouvertures d'entrée et ouvertures de sortie desdits canaux d'alimentation cathodique et de refroidissement peuvent présenter des formes variées. Par exemple, elles présentent un contour circulaire, ou rectangulaire, ou carré, ou ovale.

Par ailleurs, le canal de refroidissement et/ou le canal d'alimentation cathodique peuvent présenter plusieurs ouvertures d'entrée et/ou plusieurs ouvertures de sortie.

5 La forme et/ou les dimensions de l'ouverture d'entrée du canal de refroidissement peuvent être identiques ou différentes de la forme et/ou des dimensions de l'ouverture de sortie du canal de refroidissement. La forme et/ou les dimensions de l'ouverture d'entrée du canal d'alimentation cathodique peuvent être identiques ou différentes de la forme et/ou des dimensions de l'ouverture de sortie du canal d'alimentation cathodique.

10 La forme et/ou les dimensions des ouvertures d'entrée et de sortie du canal de refroidissement peuvent être identiques ou différentes de la forme et/ou des dimensions des ouvertures d'entrée et de sortie du canal d'alimentation cathodique.

Par ailleurs, le canal d'alimentation cathodique peut être disposé entre les blocs cathodiques respectifs d'au moins deux modules élémentaires consécutifs de la pluralité de  
 15 modules élémentaires selon la direction d'empilement, et être conformé pour transporter le flux d'alimentation cathodique vers le support transporteur d'oxydant de chacun desdits deux modules élémentaires respectifs, et/ou le canal de refroidissement peut être disposé entre au moins deux modules élémentaires consécutifs de la pluralité de modules élémentaires selon la direction d'empilement et est conformé pour transporter le flux de  
 20 refroidissement de sorte à échanger de la chaleur par convection avec lesdits deux modules élémentaires. Ainsi, un canal d'alimentation cathodique peut alimenter plusieurs modules élémentaires et/ou un canal de refroidissement peut échanger de la chaleur avec plusieurs modules élémentaires. On limite ainsi la masse des moyens d'alimentation en oxydant et des moyens de refroidissement de la pile à combustible.

25 Par ailleurs, la pile à combustible comporte de préférence :

- une pluralité de canaux d'alimentation cathodique, chaque canal d'alimentation cathodique étant conformé pour alimenter en flux d'alimentation cathodique au moins un module élémentaire,
- une sonde d'alimentation cathodique disposée dans un canal de la pluralité  
 30 de canaux d'alimentation cathodique et configurée pour mesurer au moins une propriété d'alimentation cathodique choisie parmi l'humidité, la température et la pression,

- un générateur de flux d'alimentation cathodique configuré pour générer le flux d'alimentation cathodique à transporter dans ledit canal ou dans un autre canal de la pluralité de canaux d'alimentation cathodique, et

- une unité de commande dudit générateur de flux d'alimentation cathodique configurée pour régler, en fonction de la mesure de la propriété d'alimentation cathodique, au moins un paramètre dudit flux d'alimentation cathodique à transporter dans ledit canal et/ou ledit flux d'alimentation cathodique à transporter dans l'autre canal.

Le au moins un paramètre dudit flux d'alimentation cathodique peut être choisi parmi la température, la pression, le débit, la vitesse du flux d'alimentation cathodique en sortie de générateur de flux d'alimentation cathodique, et leurs combinaisons.

De préférence, la pile à combustible comporte :

- une pluralité de canaux de refroidissement, chaque canal de refroidissement étant conformé pour transporter un flux de refroidissement de manière à échanger de la chaleur par convection avec au moins un module élémentaire,

- une sonde de refroidissement disposée dans un canal de la pluralité de canaux de refroidissement et configurée pour mesurer au moins une propriété de refroidissement choisie parmi l'humidité, la température et la pression,

- un générateur de flux de refroidissement configuré pour générer le flux de refroidissement à transporter dans ledit canal ou dans un autre canal de la pluralité de refroidissement, et

- une unité de commande dudit générateur de flux de refroidissement configurée pour régler, en fonction de la mesure de la propriété de refroidissement, au moins un paramètre dudit flux de refroidissement à transporter dans ledit canal et/ou ledit flux de refroidissement à transporter dans l'autre canal.

De cette façon, on régule par exemple la température des unités d'oxydation de chaque module élémentaire au moyen d'un nombre limité de capteurs, en particulier au moyen d'un unique capteur.

Le au moins un paramètre dudit flux de refroidissement peut être choisi parmi la température, la pression, le débit, la vitesse du flux de refroidissement en sortie du générateur de flux de refroidissement, et leurs combinaisons.

Par ailleurs, la pile à combustible peut comporter un capteur disposé dans un module élémentaire en communication fluïdique avec le canal d'alimentation cathodique

dans lequel est disposée la sonde d'alimentation cathodique et/ou apte à échanger de chaleur par convection avec un flux de refroidissement s'écoulant dans le canal de refroidissement dans lequel est disposé la sonde de refroidissement, ledit capteur étant configuré pour mesurer une résistance électrique choisie parmi une résistance interne la  
5 pile, la résistance de polarisation de la pile, ou la résistance totale de la pile. De préférence, l'unité de commande dudit générateur de flux d'alimentation cathodique est configurée pour régler en fonction de la mesure de la propriété d'alimentation cathodique et de la mesure de la résistance électrique, au moins un paramètre dudit flux d'alimentation cathodique à transporter dans ledit canal et/ou ledit flux d'alimentation cathodique à  
10 transporter dans l'autre canal, et/ou l'unité de commande dudit générateur de flux de refroidissement est configurée pour régler en fonction de la mesure de la propriété de refroidissement et de la mesure de la résistance électrique, au moins un paramètre dudit flux de refroidissement à transporter dans ledit canal de refroidissement et/ou ledit flux de refroidissement à transporter dans l'autre canal de refroidissement.

15 Dans un mode de réalisation, la pile à combustible comporte au moins un diaphragme et/ou au moins un volet configuré pour limiter le débit en entrée du canal d'alimentation cathodique et/ou du canal de refroidissement. Par exemple, dans une variante où la pile à combustible est disposée dans un objet volant, les mouvements d'air lors d'un vol de l'objet volant peuvent provoquer la formation de flux parasites pouvant  
20 modifier le comportement de la pile. Dans un tel mode de réalisation, un moyen de génération des flux d'alimentation cathodique et/ou de refroidissement peut être le déplacement de l'objet volant. De préférence, tous les volets et/ou diaphragmes sont commandés par un unique module de commande des volets et/ou diaphragmes configuré pour disposer les volets et/ou diaphragme dans une même configuration ouverte ou fermée.  
25 Les volets et/ou diaphragmes peuvent être disposés tous en regard d'une face latérale de la pile. En particulier, les volets et/ou diaphragmes disposés en regard des ouvertures des canaux de refroidissement peuvent être disposés en regard de la même face que les volets et/ou diaphragmes disposés en regard des ouvertures des canaux d'alimentation cathodique. Dans une variante, des volets et/ou diaphragmes peuvent être disposés sur  
30 d'autres faces latérales, et notamment sur une face opposée.

En ce qui concerne ses dimensions, la pile peut présenter une hauteur comprise entre 20 mm et 600 mm et/ou une largeur comprise entre 20 mm et 600 mm, et/ou une profondeur comprise entre 20 mm et 600 mm.

Enfin, la masse de la pile à combustible peut être comprise entre 0,01 kg et 10 kg. La pile à combustible est configurée pour générer une puissance électrique comprise entre 1 W et 50kW.

De préférence, la pile présente une densité massique de puissance comprise entre  $100 \text{ W.kg}^{-1}$  et  $5000 \text{ W.kg}^{-1}$ .

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront encore à la lecture de la description détaillée qui va suivre et du dessin annexé dans lequel :

- les figures 1 à 5 représentent schématiquement, en vue selon une coupe transversale, différentes variantes de réalisation d'un module élémentaire selon l'invention,
- la figure 6 représente schématiquement une pile à combustible comportant une pluralité de modules élémentaires selon l'invention, vue en coupe selon la direction d'empilement des modules élémentaires,
- les figures 7 à 9 représentent schématiquement en perspective des variantes de piles à combustible selon l'invention, et
- la figure 10 est une photographie d'une pile selon un mode de réalisation de l'invention.

Dans les différentes figures, des références identiques sont utilisées pour désigner des organes identiques ou analogues.

Le module élémentaire 5 de la figure 1 s'étend selon un plan P longitudinal comportant une direction longitudinale X. Il comporte une unité d'oxydation 10 formée d'un empilement constitué en succession d'une anode 15, d'une membrane électrolytique 20 et d'une cathode 25, toutes trois se présentant chacune sous la forme d'une plaque s'étendant selon un plan parallèle au plan longitudinal. L'unité d'électrolyse est disposée entre un support transporteur d'oxydant 30 et un support transporteur de combustible 35, se présentant chacun sous la forme d'une plaque poreuse s'étendant selon un plan parallèle au plan longitudinal du module élémentaire.

Un collecteur d'électrons cathodiques 40, sous la forme d'une bande faisant saillie selon une direction transversale T au plan longitudinal, est fixé sur le support transporteur d'oxydant, définissant ainsi avec le support transporteur d'oxydant un bloc

cathodique 45. Il est fixé à la cathode au moyen d'un pont conducteur cathodique 50 formé d'un adhésif électriquement conducteur. Le pont conducteur cathodique s'étend selon la direction transversale entre deux faces opposées 55 et 60, l'une 55 d'entre elles étant au contact du collecteur d'électrons cathodiques, l'autre 60 étant au contact de la cathode.

5 Ainsi, l'unité d'oxydation et le bloc cathodique sont fixés l'un à l'autre par collage et reliés électriquement.

Par ailleurs, le support transporteur d'oxydant, le collecteur cathodique d'électrons, le pont conducteur cathodique et la cathode définissent une chambre cathodique 65. Ainsi, en fonctionnement, le flux d'alimentation cathodique, par exemple  
10 généré par un ventilateur et transporté dans un canal d'alimentation cathodique, comme cela sera décrit par la suite, traverse le support transporteur d'oxydant, poreux, comme indiqué par la flèche O pour pénétrer dans la chambre cathodique et entrer en contact avec la cathode de manière à assurer la réaction d'oxydation du combustible. Les électrons cathodiques résultant de la réaction d'oxydation formés sur la cathode peuvent être  
15 collectés puis, comme indiqué par la flèche Ec, peuvent alors être transférés par l'intermédiaire du pont collecteur cathodique vers le collecteur d'électrons cathodiques.

Un collecteur d'électrons anodiques 70, se présentant sous la forme d'une bande faisant saillie selon la direction transversale, est fixé sur le support transporteur de combustible 35, définissant ainsi avec le support transporteur de combustible un bloc  
20 anodique 75. Le collecteur d'électrons anodiques est fixé à l'anode au moyen d'un pont conducteur anodique 80 formé d'un adhésif électriquement conducteur. Le pont conducteur anodique s'étend selon la direction transversale entre deux faces opposées 85 et 90, l'une 90 d'entre elles étant au contact du collecteur d'électrons anodiques, l'autre 85 étant au contact de l'anode. Ainsi, l'unité d'oxydation et le bloc anodique sont fixés l'un à  
25 l'autre par collage. En outre, les électrons anodiques résultant de la réaction d'oxydation du combustible, formés sur l'anode peuvent être collectés puis, comme indiqué par la flèche Ea, peuvent alors être transférés par l'intermédiaire du pont conducteur anodique vers le collecteur d'électrons anodiques.

De cette façon, les fixations par collage des blocs anodique et cathodique au  
30 moyen des ponts conducteurs anodique et cathodique respectifs sur l'unité d'oxydation assurent la tenue mécanique du module élémentaire, sans nécessiter la mise en place de moyens de compression permanente à cet effet.

Par ailleurs, un pont d'étanchéité anodique 100, formé d'un joint en adhésif électriquement isolant et étanche au combustible, est pris en sandwich entre le bloc anodique et le support transporteur de combustible et les maintient à distance l'un de l'autre, définissant une chambre anodique 105 s'étendant selon un plan parallèle au plan longitudinal. Le pont d'étanchéité anodique forme un joint d'étanchéité s'étendant entre les faces en regard de l'anode et du support transporteur de combustible, selon une direction transversale au plan longitudinal. Le pont d'étanchéité anodique ceinture ladite chambre anodique dans un plan parallèle au plan longitudinal. Outre sa fonction d'étanchéité décrite ci-après, il renforce la résistance mécanique du module élémentaire, en ajoutant une fixation supplémentaire entre le bloc anodique et l'unité d'oxydation. En fonctionnement, la fixation de l'unité d'oxydation au moyen du pont d'étanchéité anodique et du pont conducteur anodique permet au module élémentaire de résister à la pression de combustible dans la chambre anodique, supérieure à la pression atmosphérique.

Par ailleurs, le module élémentaire comporte un réservoir 108, définissant un volume intérieur 110, comportant un orifice 115 de remplissage pour alimenter le réservoir en combustible. Le support transporteur de combustible définit par ailleurs une paroi 118 séparant la chambre anodique du volume intérieur du réservoir.

En fonctionnement, un compresseur peut injecter un flux de combustible dans le volume intérieur du réservoir par l'orifice de remplissage, dans lequel le combustible est ainsi stocké. Le flux d'alimentation anodique contenant le combustible traverse ensuite le support transporteur de combustible, qui est poreux et pénètre dans la chambre anodique où il s'écoule, selon une direction transversale à la direction longitudinale jusqu'à entrer en contact avec l'anode, comme indiqué selon la flèche C. Le pont d'étanchéité anodique limite l'écoulement du flux de combustible dans la chambre selon toute direction contenue dans le plan longitudinal, comme indiqué par les flèches  $L_1$  et  $L_2$ , et ainsi réduit les fuites de combustible hors de la chambre anodique.

Le module élémentaire de la figure 2 se distingue du module élémentaire de la figure 1 en ce qu'une couche collectrice anodique 120 et une couche collectrice cathodique 125 sont disposées sur les faces 130 et 135 des anode et cathode respectivement, disposées en regard des chambres anodiques et cathodiques respectivement.

Les couches collectrices anodique et cathodique améliorent la collecte des électrons anodiques et cathodiques générés à distance des collecteurs d'électrons anodiques et cathodiques respectivement.

Afin que le combustible et l'oxydant puissent entrer en contact avec l'anode et la cathode respectivement, les couches collectrices d'électrons peuvent recouvrir partiellement lesdites faces des anode et cathode, et par exemple être étanches au combustible ou à l'oxydant respectivement. Dans cette variante, le combustible et l'oxydant peuvent entrer en contact avec l'anode et la cathode respectivement dans les zones desdites faces des anodes et cathodes non recouvertes par les couches collectrice et cathodique respectivement. Les couches collectrices anodique et cathodique peuvent aussi se présenter sous la forme d'un film poreux au combustible et à l'oxydant respectivement, et recouvrir par exemple intégralement lesdites faces des anode et cathode respectivement.

Dans l'exemple de la figure 2, le pont conducteur anodique 80 et le pont d'étanchéité anodique 100 sont fixés par collage à la couche anodique.

Par ailleurs, pour renforcer encore la tenue mécanique du module élémentaire, le module élémentaire de la figure 2 comporte un pont de fixation cathodique 140 formé d'un adhésif électriquement isolant, s'étendant entre deux faces opposées de la chambre cathodique selon une direction transversale au plan longitudinal, l'une des faces 145 du pont de fixation cathodique étant collée aux support transporteur d'oxydant, l'autre face 150 dudit pont étant collée sur la couche collectrice cathodique 125.

Bien que cela ne soit pas illustré, le module élémentaire de la figure 1 peut comporter un tel pont de fixation cathodique collé à la fois au support transporteur de combustible et à la cathode.

Le module élémentaire de la figure 3 diffère du module élémentaire de la figure 2 en ce que l'anode, respectivement la cathode, comporte une fenêtre anodique 155, respectivement une fenêtre cathodique 160, traversant l'anode, respectivement la cathode, dans son épaisseur, et découchant sur la membrane électrolytique. Le pont conducteur anodique 80, respectivement le pont conducteur cathodique 50, est logé dans la fenêtre anodique, respectivement dans la fenêtre cathodique, et est fixé par collage sur la membrane électrolytique 10.

Dans la variante où la liaison mécanique entre l'anode, respectivement la cathode, et la membrane électrolytique est faible, on améliore la tenue résistance

mécanique du module élémentaire, les liaisons des blocs anodique et cathodique respectivement au moyen des ponts conducteurs anodique et cathodique respectivement avec l'unité d'oxydation étant réalisées directement avec la membrane électrolytique.

Le pont conducteur anodique 80, respectivement le pont conducteur cathodique 50 présente un relief 165, respectivement 170 faisant saillie longitudinale et étant disposé au contact de la couche collectrice anodique, respectivement de la couche collectrice cathodique. Le relief du pont conducteur anodique, respectivement du pont conducteur cathodique met en contact électriquement l'anode, respectivement la cathode avec le collecteur d'électrons anodiques, respectivement avec le collecteur d'électrons cathodiques.

La figure 4 illustre un mode de réalisation de la pile à combustible comportant plusieurs modules élémentaires  $5_1$ ,  $5_2$  partageant une même membrane électrolytique 20. Par rapport à une pile constituée de deux modules disposés chacun sur des membranes électrolytiques différentes, chacun desdits deux modules étant tel qu'illustré sur la figure 3, l'agencement illustré sur la figure 4 permet d'augmenter la tension délivrée par la pile pour une même puissance générée. La pile à combustible de la figure 4 comporte des modules élémentaires tels qu'illustrés sur la figure 3, qui peuvent bien évidemment être combinés et/ou remplacés par un ou plusieurs modules élémentaires par exemple tels qu'illustrés sur les figures 1 et 2. Par ailleurs, dans une variante non représentée, les modules élémentaires peuvent partager un même support transporteur de combustible et/ou un même support transporteur isolant. Ils peuvent partager ou non un même réservoir.

La figure 5 illustre une pile à combustible comportant un module élémentaire tel qu'illustré sur la figure 2, comportant en outre une couche poreuse de diffusion de gaz 170 superposée à et en contact de la face du support transporteur d'oxydant opposée à la face en regard de la chambre anodique. Par ailleurs, la couche de diffusion de gaz est disposée entre le support transporteur d'oxydant et une grille 175 poreuse avec laquelle elle est en contact.

La pile à combustible de la figure 5 comporte en outre un premier tube 180 creux dont une paroi est formée au moins partiellement par la grille 175, qui définit un canal d'alimentation cathodique 185 pour transporter un flux d'alimentation cathodique comportant l'oxydant. Le tube creux comporte une ouverture d'entrée 190 pour le flux d'alimentation cathodique, comme indiqué par la flèche  $O_E$ , disposée en regard d'un

ventilateur 200 apte à générer ledit flux d'alimentation cathodique. Le tube creux comporte par ailleurs une ouverture de sortie 205, par laquelle le flux d'alimentation cathodique peut s'échapper, comme indiqué par la flèche  $O_S$  après avoir traversé la grille poreuse 175 et la couche de diffusion de gaz et avoir alimenté, comme indiqué par la flèche O la chambre cathodique 65 du module élémentaire, et s'être chargé des produits de la réaction d'oxydation. En particulier dans le cas où l'oxydant est le dioxygène et le combustible est le dihydrogène, la réaction de d'oxydation produit de la vapeur d'eau qui est évacuée de la chambre anodique vers l'ouverture de sortie par le flux d'alimentation cathodique, en l'occurrence un flux d'air.

10 La pile à combustible présente en outre un deuxième tube 210 creux disposé de sorte que le module élémentaire 5 est pris en sandwich entre les premier 185 et deuxième 210 tubes creux. Le deuxième tube creux présente une paroi commune avec le réservoir. Il définit un canal de refroidissement 212 présentant une ouverture d'entrée 215 conformée pour l'entrée d'un flux de refroidissement R comportant un fluide caloporteur tel que de l'air, disposée en regard d'un ventilateur 220 configuré pour générer et distribuer ledit flux de refroidissement à ladite ouverture d'entrée.

Lorsqu'il s'écoule dans le canal de refroidissement comme indiqué selon la flèche R, le module élémentaire échange de la chaleur générée par la réaction d'oxydation exothermique par convection au niveau de la paroi 225 commune au module et au deuxième tube creux. Le flux de refroidissement ainsi réchauffé s'écoule jusqu'à une ouverture de sortie 230 disposée à l'opposé de l'ouverture d'entrée, par laquelle il est évacué de la pile à combustible.

20 Comme cela peut être observé sur la figure 5, afin d'éviter toute interaction entre le flux d'alimentation cathodique O et le flux de refroidissement R, les canaux d'alimentation cathodique et de refroidissement s'étendent dans des plans  $P_1$  et  $P_2$  distincts et parallèles au plan longitudinal.

30 Par ailleurs, dans l'exemple de la figure 5, le ventilateur pour générer le flux de refroidissement et le ventilateur pour générer le flux d'alimentation cathodique comportant l'oxydant sont disposés en regard d'une même face latérale 235, parallèle à la direction d'empilement  $D_E$ , de la pile à combustible. En variante, le ventilateur pour générer le flux de refroidissement peut être disposé sur la face latérale opposée à celle en regard de laquelle le ventilateur pour générer le flux d'alimentation cathodique est disposé.

Dans une variante non représentée, et notamment lorsque la pile est destinée à générer un courant électrique dans une plage de température de fonctionnement limitée, la pile peut être exempte de moyens, tels que par exemple décrits sur la figure 5, pour refroidir la pile par l'intermédiaire d'un flux de refroidissement.

5 La pile à combustible 250 de la figure 6 comporte une pluralité de quatre modules élémentaires 5a-d empilés les uns sur les autres selon une direction d'empilement  $D_E$ .

10 Chaque module élémentaire de la pluralité est identique à celui illustré sur la figure 5, à ceci près que les ouvertures et sorties des canaux de refroidissement sont formées sur des faces perpendiculaires à celles sur lesquelles sont formées les ouvertures et sorties des canaux d'alimentation cathodique. La direction d'empilement  $D_E$  est perpendiculaire au plan longitudinal P de chaque module élémentaire.

15 La pile à combustible est conformée de sorte que chaque paire de deux modules élémentaires consécutifs de l'empilement est telle que lesdits deux modules élémentaires, par exemple 5a et 5b, sont disposés tête-bêche l'un par rapport à l'autre selon la direction d'empilement.

Les modules de l'empilement sont connectés électriquement au moyen d'un circuit électrique, non représenté, reliant un collecteur d'électrons anodiques d'un module élémentaire à un collecteur d'électrons cathodiques d'un module élémentaire adjacent.

20 Dans la pile de la figure 6, deux modules élémentaires consécutifs présentant des blocs cathodiques disposés en regard sont séparés par un canal d'alimentation cathodique 255<sub>1,2</sub> s'étendant selon un plan transverse à la direction d'empilement. Ainsi, au moyen d'un seul canal d'alimentation cathodique, les chambres cathodiques 65a-d des deux modules élémentaires sont alimentées par un unique flux d'alimentation cathodique en entrée O.

25 Par ailleurs, deux modules élémentaires consécutifs dont les blocs anodiques, par exemple 75b et 75c, sont disposés en regard et sont séparés par un canal de refroidissement 260 s'étendant selon un plan transverse à la direction d'empilement. Ainsi, au moyen d'un seul canal de refroidissement, les deux modules élémentaires 5b et 5c sont refroidis par échange convectif avec le flux de refroidissement R s'écoulant dans le canal.

30 De cette façon, la pile à combustible 250 de la figure 6 est configurée de telle sorte que les canaux d'alimentation cathodique et de refroidissement sont disposés à

distance les uns des autres et en alternance selon la direction d'empilement  $D_E$ . De cette façon, les interactions entre flux d'alimentation cathodique O et flux de refroidissement R sont limitées.

En ce qui concerne la génération des flux d'alimentation cathodique et des flux de refroidissement, la pile à combustible de la figure 6 comporte deux ventilateurs  $200_{1-2}$  d'alimentation cathodique configurés pour alimenter chacun un canal d'alimentation cathodique respectif  $255_{1-2}$  avec des flux d'alimentation cathodique associés et trois ventilateurs de refroidissement  $220_{1-3}$  configurés pour alimenter chacun un canal de refroidissement avec des flux de refroidissement associés. Par ailleurs, les ventilateurs d'alimentation cathodique et les ventilateurs de refroidissement sont disposés en regard de faces latérales 270, 275 de la pile perpendiculaires entre elles. De cette façon, les flux d'alimentation cathodique et les flux de refroidissement s'écoulent selon des directions d'écoulement respectivement obliques l'une de l'autre. L'interaction entre lesdits flux est limitée, ce qui optimise le rendement énergétique de la pile.

Par ailleurs, la pile à combustible illustrée sur la figure 6 comporte une sonde d'alimentation cathodique 280 disposée dans un des canaux d'alimentation cathodique pour mesurer la température du flux d'alimentation cathodique au sein dudit canal. La sonde d'alimentation cathodique est électriquement reliée à une unité de commande 285 des ventilateurs d'alimentation anodique de la pile, par des moyens de connexion non représentés, ladite unité de commande étant configurée pour régler en fonction de la mesure de la température par la sonde d'alimentation cathodique, par exemple le débit du flux d'alimentation cathodique en sortie de chacun des ventilateurs d'alimentation cathodique de la pile à combustible.

De cette façon, au moyen d'une unique sonde d'alimentation cathodique, le débit des flux d'alimentation cathodique de la pluralité de canaux d'alimentation cathodique de la pile peut être aisément réglé.

La pile à combustible de la figure 6 comporte en outre une sonde de refroidissement 292 disposée dans un des canaux de refroidissement consécutif au canal d'alimentation cathodique dans lequel est disposée la sonde d'alimentation cathodique, pour mesurer la température du flux de refroidissement au sein dudit canal de refroidissement. La sonde de refroidissement est électriquement reliée à une unité de commande des ventilateurs de refroidissement 298 de la pile à combustible, par des

moyens de connexion non représentés, ladite unité de commande étant configurée pour régler en fonction de la mesure de la température par la sonde de refroidissement, par exemple le débit du flux de refroidissement en sortie de chacun des ventilateurs de refroidissement de la pile à combustible.

5 De cette façon, au moyen d'une unique sonde de refroidissement, le débit des flux de refroidissement de la pluralité de canaux de refroidissement de la pile peut être aisément réglé.

La pile à combustible comporte encore un capteur 300 disposé au sein d'un module élémentaire pour mesurer par exemple la résistance interne du module élémentaire.  
10 Le capteur est relié aux unités de commande des ventilateurs d'alimentation cathodique et de refroidissement qui sont en outre chacun configurés pour régler les débits des flux d'alimentation cathodique et de refroidissement en fonction de la mesure de résistance interne du module élémentaire.

La figure 7 présente de manière schématique une pile à combustible 250  
15 comportant six modules élémentaires 5a-f empilés selon une direction d'empilement  $D_E$ , chaque module élémentaire étant mince et s'étendant selon un plan longitudinal P normal à la direction d'empilement.

Les modules élémentaires de la pile à combustible sont disposés tête-bêche deux à deux comme dans l'exemple de la figure 6.

20 La pile à combustible de la figure 7 présente une forme générale de pavé droit présentant quatre faces latérales 280a-d sur lesquelles débouchent les entrées et sortie des différents canaux d'alimentation cathodique et de refroidissement. Dans l'exemple de la figure 7, chaque canal d'alimentation cathodique, respectivement de refroidissement, présente une ouverture d'entrée 290a-c, respectivement 295a-d débouchant sur une face  
25 latérale en regard d'un ventilateur d'alimentation cathodique 300, respectivement de refroidissement 305, et présente des ouvertures de sortie 310a-c, respectivement 315a-d débouchant sur chacune des trois autres faces latérales de la pile.

Dans l'exemple de la figure 7, un ou des ventilateurs d'alimentation cathodique 300 sont disposés en regard d'une face latérale 280b perpendiculaire à une autre face  
30 latérale 280a en regard de laquelle sont disposés un ou des ventilateurs de refroidissement 305. Ainsi, les flux d'alimentation cathodique O d'une part et les flux de refroidissement R

d'autre part s'écoulent dans les canaux respectifs selon des directions sensiblement perpendiculaires.

Ainsi, bien que chaque canal d'alimentation cathodique et chaque canal de refroidissement présentent des ouvertures sur les quatre faces latérales 280a-d de la pile, les interactions aux conséquences néfastes pour le fonctionnement de la pile à combustible, entre flux d'alimentation cathodique et flux de refroidissement sont limitées.

La pile à combustible de la figure 8 est un mode de réalisation amélioré et préféré de la pile à combustible de la figure 7, dans laquelle, pour chaque canal d'alimentation cathodique, respectivement canal de refroidissement, les ouvertures formées sur les faces perpendiculaires à celles sur laquelle est formée l'ouverture d'entrée dudit canal sont fermées au moyen de parois latérales. Ainsi, l'écoulement du flux d'alimentation cathodique, respectivement du flux de refroidissement, s'effectue en direction de l'ouverture de sortie 310, respectivement 315 débouchant sur la face latérale de la pile opposée à la face latérale sur laquelle débouche l'ouverture d'entrée 290, respectivement 295. De cette façon, les flux d'alimentation cathodique et flux de refroidissement s'écoulent selon des directions perpendiculaires et à différentes hauteurs selon la direction d'empilement et n'interagissent pas. Un tel agencement favorise le fonctionnement de la pile à combustible dans une plage de températures de fonctionnement étendue.

Par exemple, pour obtenir la pile illustrée sur la figure 8, les ouvertures latérales de chaque canal d'alimentation cathodique formées sur une, voire sur les deux faces latérales de la pile de la figure 5, perpendiculaires à la face latérale sur laquelle est formée l'ouverture d'entrée du flux d'alimentation cathodique, peuvent être fermées de manière à empêcher la sortie dudit flux, par exemple au moyen de masques référencés 320a-c entre les lignes en pointillés, par exemple en polymère, notamment formés de mousse. Par ailleurs, les ouvertures latérales de chaque canal de refroidissement formées sur une, voire sur les deux faces latérales de la pile de la figure 7, perpendiculaires à la face latérale sur laquelle est formée l'ouverture d'entrée du flux de refroidissement, peuvent être fermées de manière à empêcher la sortie dudit flux, par exemple au moyen de masques référencés 325a-c entre les lignes en pointillés, par exemple en polymère, notamment formés de mousse.

De cette façon, les flux d'alimentation cathodique et de refroidissement s'écoulent selon des directions perpendiculaires et ne se perturbent pas.

Dans l'exemple de la figure 8, deux modules élémentaires consécutifs sont disposés tête bêche. Dans une variante non représentée, deux modules élémentaires consécutifs peuvent être disposés de sorte que le bloc anodique du premier module élémentaire soit en regard du bloc cathodique du deuxième module élémentaire. De préférence alors, afin de séparer le flux d'alimentation cathodique pour alimenter ladite cathode, du flux de refroidissement, une plaque séparatrice pleine s'étendant selon une direction longitudinale est disposée entre les deux modules élémentaires consécutifs.

Par ailleurs, l'empilement de la figure 8 peut être obtenu en disposant deux entretoises entre deux modules élémentaires consécutifs. Les entretoises sont par exemple des barreaux pleins. Elles sont espacées l'une de l'autre de sorte à former les parois latérales d'un canal d'alimentation cathodique ou d'un canal de refroidissement.

La pile à combustible de la figure 9 diffère de la pile à combustible de la figure 8 en ce que chaque module présente une longueur  $L$  au moins deux fois plus grande que la largeur  $l$ . Afin d'assurer un refroidissement optimal des modules élémentaires, plusieurs ventilateurs sont disposés selon la direction longitudinale  $X$  en regard de la face latérale 280 sur laquelle débouchent les ouvertures 295a-d des canaux de refroidissement. Les disques 330<sub>1-6</sub> indiquent schématiquement la portion de la face latérale sur laquelle est dirigé le flux de refroidissement.

Enfin, aucun des modules élémentaires décrit sur les figures 1 à 4 ni aucune des piles à combustibles illustrées sur les figures 5 à 9 ne comporte de moyens de compression de la pluralité de modules élémentaires, tel que des plaques de serrage reliées par des tirants de compression.

25

#### Exemple

Une pile à combustible dont une photographie est présentée sur la figure 10 est formée par un empilement de douze modules élémentaires, présentant chacun une forme de pavé droit mince d'une longueur de 117 mm, d'une largeur de 74 mm et d'une épaisseur de 2 mm. Cette pile à combustible est configurée pour oxyder du dihydrogène comme combustible par le dioxygène de l'air.

30

Chaque module élémentaire pèse 8 g et est apte à générer une puissance électrique de 8 W. Deux modules élémentaires consécutifs sont disposés tête bêche selon la direction d'empilement et sont distancés de 1,2 mm, au moyen d'un espaceur formé de barreaux de mousse dont les faces opposées en contact chacune d'un desdits deux modules consécutifs, sont recouvertes d'adhésif. L'empilement présente une forme de pavé droit, d'une longueur de 117 mm, d'une largeur de 74 mm et d'une épaisseur de 45 mm.

La pile à combustible présente un volume de 0,4 litre et une masse inférieure à 150 g. Elle est apte à générer une puissance électrique de 100W, et présente une densité massique de puissance de  $0,67 \text{ W.g}^{-1}$ . Elle est par ailleurs adaptée à générer de l'énergie électrique dans une gamme de température comprise entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $50^{\circ}\text{C}$ .

La pile à combustible présente une résistance interne de  $175 \text{ m}\Omega.\text{cm}^2$ , similaire à celle d'une pile de l'art antérieur comportant des plaques terminales de serrage et présentant une plus faible densité massique de puissance pour une même puissance générée. Cette valeur de résistance interne indique que la collecte d'électrons et la connexion électrique des modules élémentaires est de bonne qualité.

Par ailleurs, les mesures de tenue en pression indiquent que la pile à combustible peut soutenir une pression maximale en dihydrogène de 3 bar dans la chambre anodique de chaque module élémentaire. En outre, en ce qui concerne l'étanchéité de la chambre anodique, les mesures d'étanchéité par infiltration d'hélium indiquent que le taux de fuite est faible, inférieur à  $0,1 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

A titre comparatif, les performances de la présente pile à combustible peuvent être comparées à une pile à combustible formée d'un empilement de modules comprimé par des plaques terminales, commercialisée par la société Horizon FC. Cette pile fonctionne dans une gamme de température plus faible comprise entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $40^{\circ}\text{C}$  et est apte à générer une puissance de 200W. Elle présente cependant une masse de 470g, et donc une faible densité massique de puissance égale à  $0,42 \text{ W.g}^{-1}$  comparativement à la pile à combustible de l'invention.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation et exemples décrits ci-dessus.

Par exemple, notamment dans la variante où canal le d'alimentation cathodique et/ou le canal de refroidissement présentent des formes coudées, par exemple un serpentin ou une pluralité de tubes parallèles, la pile peut comporter un compresseur, un canal de

distribution étant relié au compresseur, le compresseur étant configuré pour distribuer un flux d'alimentation cathodique et/ou un flux de refroidissement en entrée du canal d'alimentation cathodique et/ou du canal de refroidissement respectivement.

5 Par ailleurs, de préférence, le flux de refroidissement peut comporter un fluide caloporteur autre que l'air, par exemple un liquide, par exemple de l'eau ou une huile.

10 Par ailleurs, le combustible n'est pas limité au dihydrogène. Il peut aussi être un alcane, par exemple choisi parmi le méthane, le propane, le butane et leurs mélanges, ou un alcool sous forme vapeur, par exemple choisi parmi l'éthanol, le méthanol et leurs mélanges. L'oxydant n'est pas limité au dioxygène. Il peut aussi être un gaz comportant du dioxygène, par exemple de l'air, ou un mélange constitué de dioxygène et de diazote.

Enfin, par « comportant un », « contenant un » et « incluant un », on entend de manière équivalente respectivement « comportant au moins un », « contenant au moins un » et « incluant un ».

## REVENDICATIONS

1. Module élémentaire (5) d'une pile à combustible (250), le module élémentaire comportant :

- 5 - une unité d'oxydation (10) configurée pour générer des électrons au moyen de l'oxydation d'un combustible, de préférence du dihydrogène, par un oxydant, de préférence du dioxygène, l'unité d'oxydation comportant une anode (15) et une cathode (25) prenant en sandwich une membrane électrolytique (20),
- 10 - un bloc anodique (75) comportant un support transporteur de combustible (35) adapté au transport d'un flux d'alimentation anodique (C) contenant le combustible vers une chambre anodique (105), et un collecteur d'électrons anodiques (70) fixé sur le support transporteur de combustible,
- 15 - un bloc cathodique (45) comportant un support transporteur d'oxydant (30) adapté au transport d'un flux d'alimentation cathodique (O) contenant l'oxydant vers une chambre cathodique (65), et un collecteur d'électrons cathodiques (40) fixé sur le support transporteur d'oxydant,

le module élémentaire étant conformé de sorte à définir la chambre anodique, respectivement la chambre cathodique, entre l'unité d'oxydation et le support transporteur de combustible, respectivement le support transporteur d'oxydant,

- 20 le collecteur d'électrons anodiques, respectivement le collecteur d'électrons cathodiques, et l'unité d'oxydation étant à la fois fixés par collage et connectés électriquement l'un à l'autre au moyen d'un pont conducteur anodique (80), respectivement d'un pont conducteur cathodique (50), contenant un adhésif électriquement conducteur.

25 2. Module élémentaire selon la revendication 1, dans lequel l'unité d'oxydation comporte une couche collectrice anodique (120), disposée sur la face (130) de l'anode opposée à la face en regard de la membrane électrolytique, et/ou une couche collectrice cathodique (125), disposée sur la face (135) de la cathode opposée à la face en regard de la membrane électrolytique.

30 3. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel

- le pont conducteur anodique est fixé par collage sur l'anode et/ou sur la couche collectrice anodique et/ou sur la membrane électrolytique, et/ou

- le pont conducteur cathodique est fixé par collage sur la cathode et/ou sur la couche collectrice cathodique et/ou sur la membrane électrolytique.

4. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique recouvrent partiellement, voire intégralement, respectivement le collecteur d'électrons anodiques et/ou le collecteur d'électrons cathodiques.

5. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le collecteur d'électrons anodiques et/ou le collecteur d'électrons cathodiques se présentent au moins partiellement sous la forme ou de bandes espacées les unes des autres, de préférence formant un motif régulier voire périodique, par exemple un quadrillage, et/ou le pont conducteur anodique et/ou le pont conducteur cathodique se présentent sous la forme de plots ou de bandes, de préférence formant un motif régulier, voire périodique, par exemple un quadrillage.

6. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, le module élémentaire s'étendant selon un plan longitudinal, dans lequel le rapport  $R$  de l'aire  $S_A$  de la projection du collecteur d'électrons anodiques, sur l'aire  $S$  de la projection du support transporteur de combustible, est compris entre et 0,01 et 0,50, et/ou

le rapport  $R'$  de l'aire  $S'_A$  de la projection du collecteur d'électrons cathodiques, sur l'aire  $S'$  de la projection du support transporteur de combustible, est compris entre 0,01 et 0,50, lesdites projections étant effectuées sur le plan longitudinal, et selon une direction transversale audit plan longitudinal

7. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le pont conducteur anodique est pris en sandwich entre le bloc d'oxydation et le collecteur d'électrons anodiques et/ou le pont conducteur cathodique est pris en sandwich entre le bloc d'oxydation et le collecteur d'électrons cathodiques.

8. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant un pont d'isolation anodique pris en sandwich entre l'unité d'oxydation et le collecteur anodique et, de préférence, en contact direct avec l'unité d'oxydation et le collecteur anodique, et/ou

un pont d'isolation cathodique pris en sandwich entre l'unité d'oxydation et le collecteur d'électrons cathodiques et, de préférence, en contact direct avec l'unité d'oxydation et le collecteur d'électrons cathodiques,

le pont d'isolation anodique, respectivement le pont d'isolation cathodique étant formé  
5 d'au moins un matériau électriquement isolant.

9. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'adhésif électriquement conducteur présente une conductivité électrique anisotrope.

10. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'adhésif électriquement conducteur est formé d'une résine polymère dans laquelle sont dispersées des particules de carbone, par exemple sous forme de graphène, ou des particules métalliques.

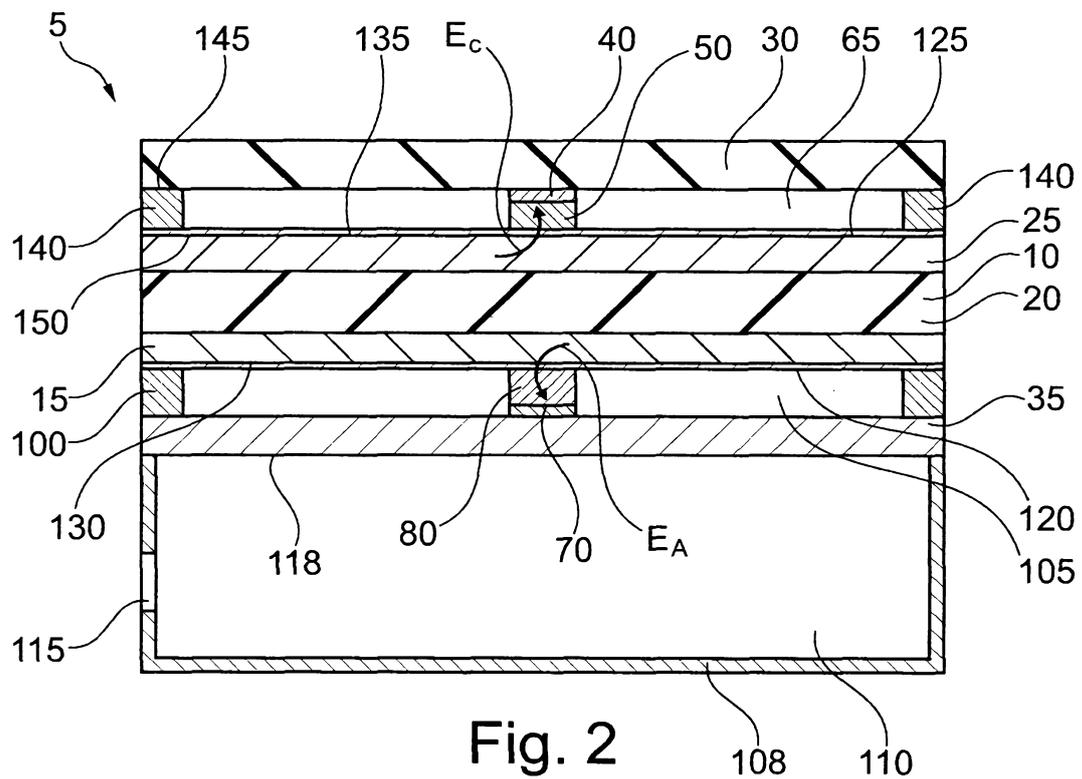
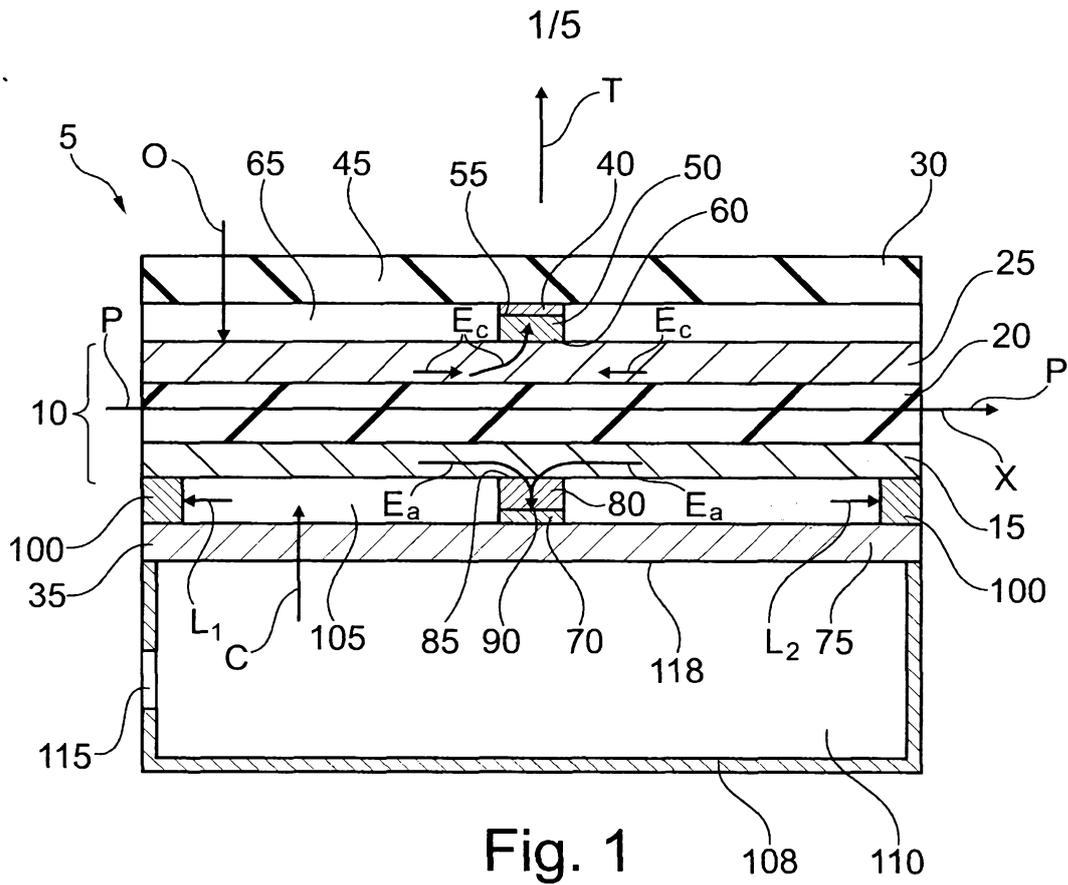
11. Module élémentaire selon la revendication précédente, dans lequel les particules consistent en un métal choisi parmi l'argent, l'or et leurs mélanges, ou sont  
15 formées d'un cœur métallique, de préférence en un métal choisi parmi le cuivre et le nickel et leurs mélanges, recouvert d'un revêtement en carbone ou d'un revêtement métallique, de préférence en un métal choisi parmi l'or, l'argent et leurs mélanges.

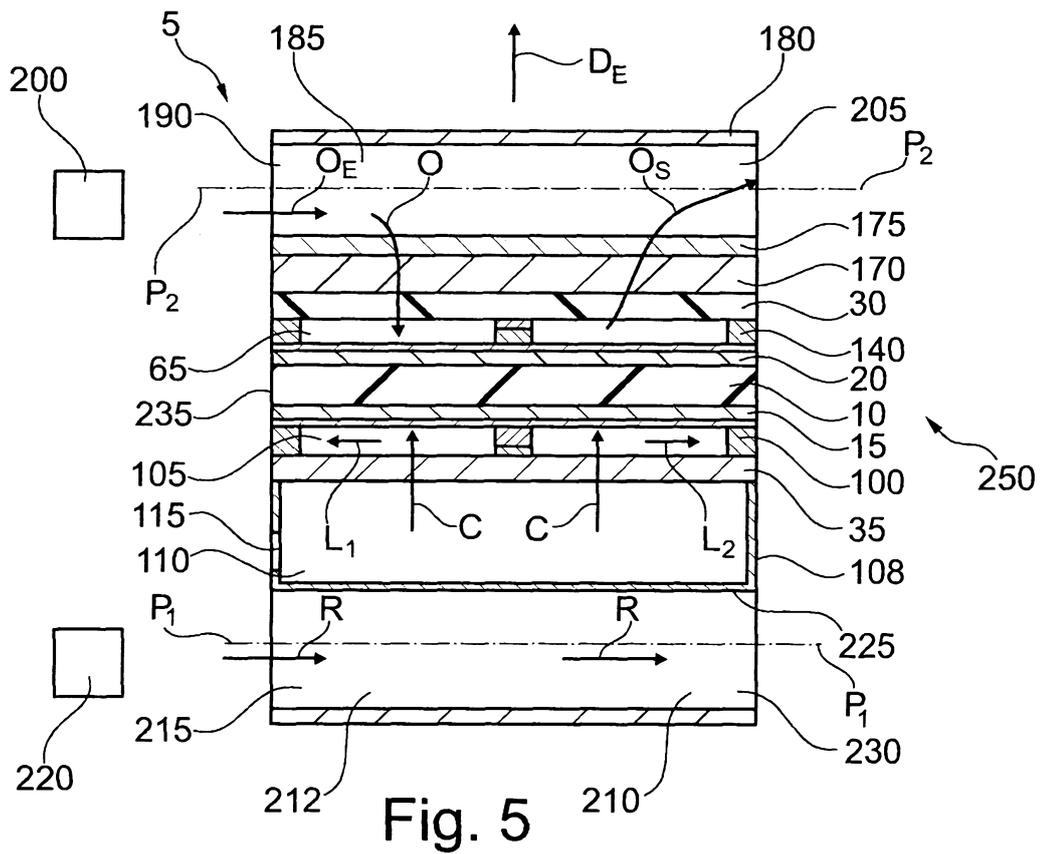
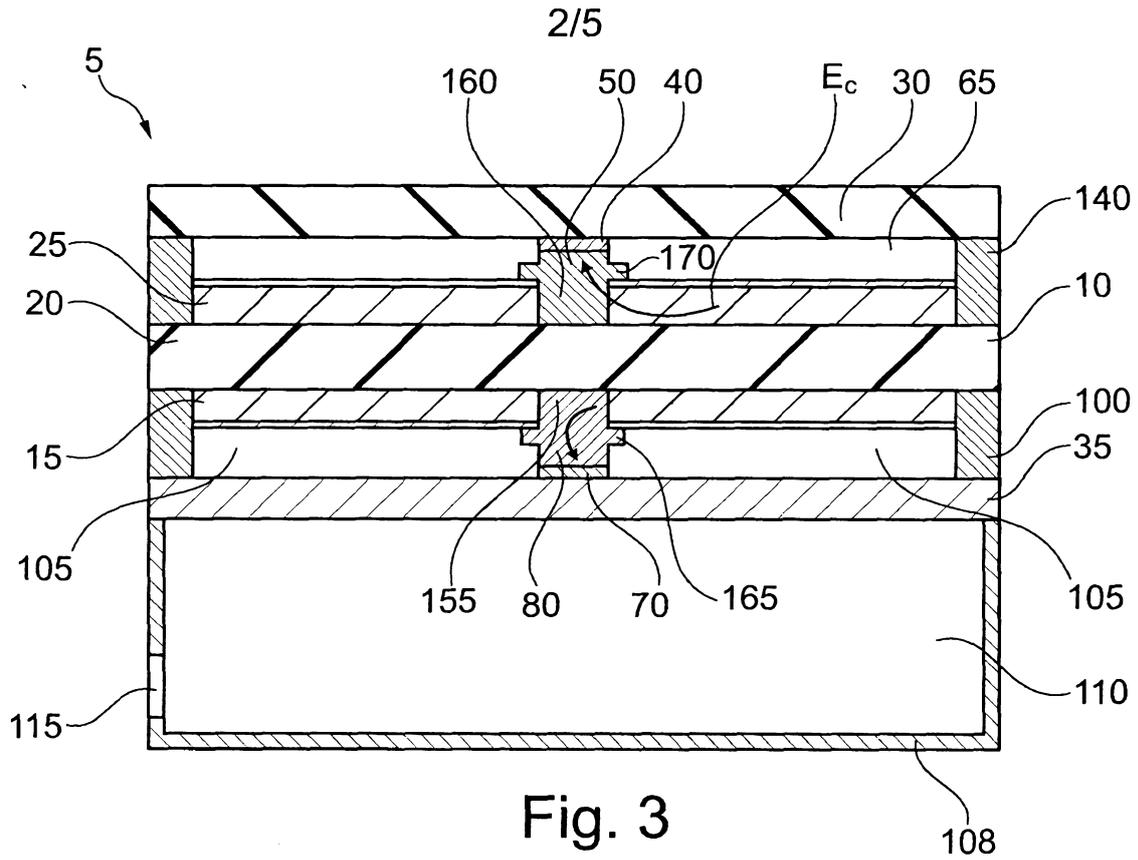
12. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel  
20 l'unité d'oxydation et le support transporteur de combustible sont à la fois fixés par collage l'un à l'autre et isolés électriquement l'un de l'autre au moyen d'un pont d'étanchéité anodique (100) contenant un adhésif électriquement isolant et étanche au combustible, le pont d'étanchéité anodique étant conformé de sorte que le flux d'alimentation anodique (C) transporté vers la chambre anodique s'écoule essentiellement directement du support  
25 transporteur de combustible vers l'anode.

13. Module élémentaire selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant une pluralité d'unités d'électrolyses partageant la même membrane électrolytique et étant de préférence disposées selon un agencement planaire.

14. Pile à combustible (250) comportant un module élémentaire selon l'une  
30 quelconque des revendications précédentes ou une pluralité de modules élémentaires empilés les uns sur les autres selon une direction d'empilement ( $D_E$ ), chaque module élémentaire étant selon l'une quelconque des revendications précédentes.

15. Pile à combustible selon la revendication précédente, étant exempte de moyens de compression de la pluralité de modules élémentaires.





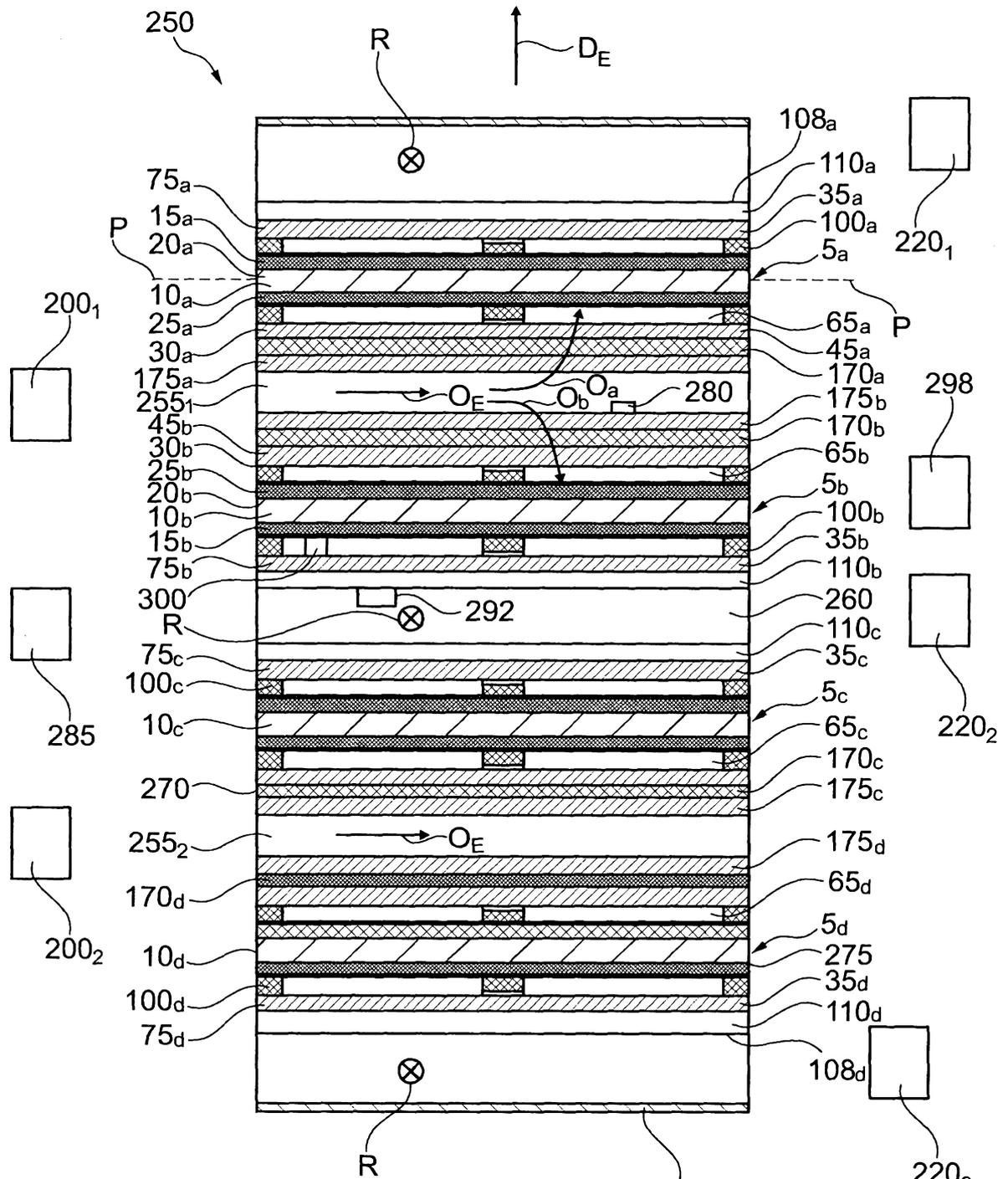
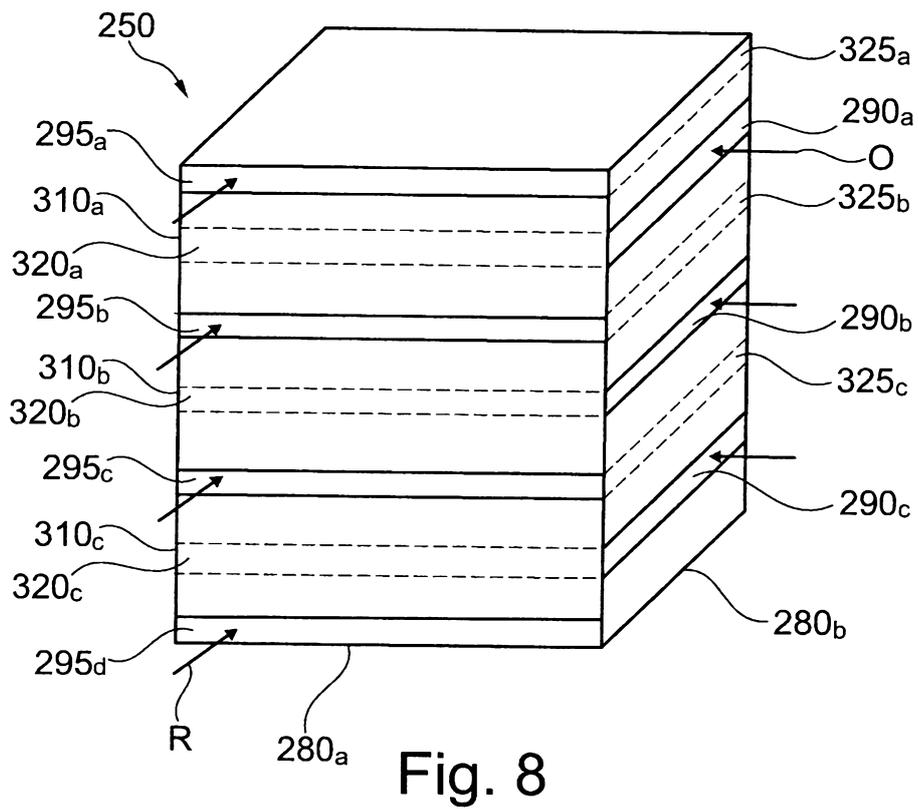
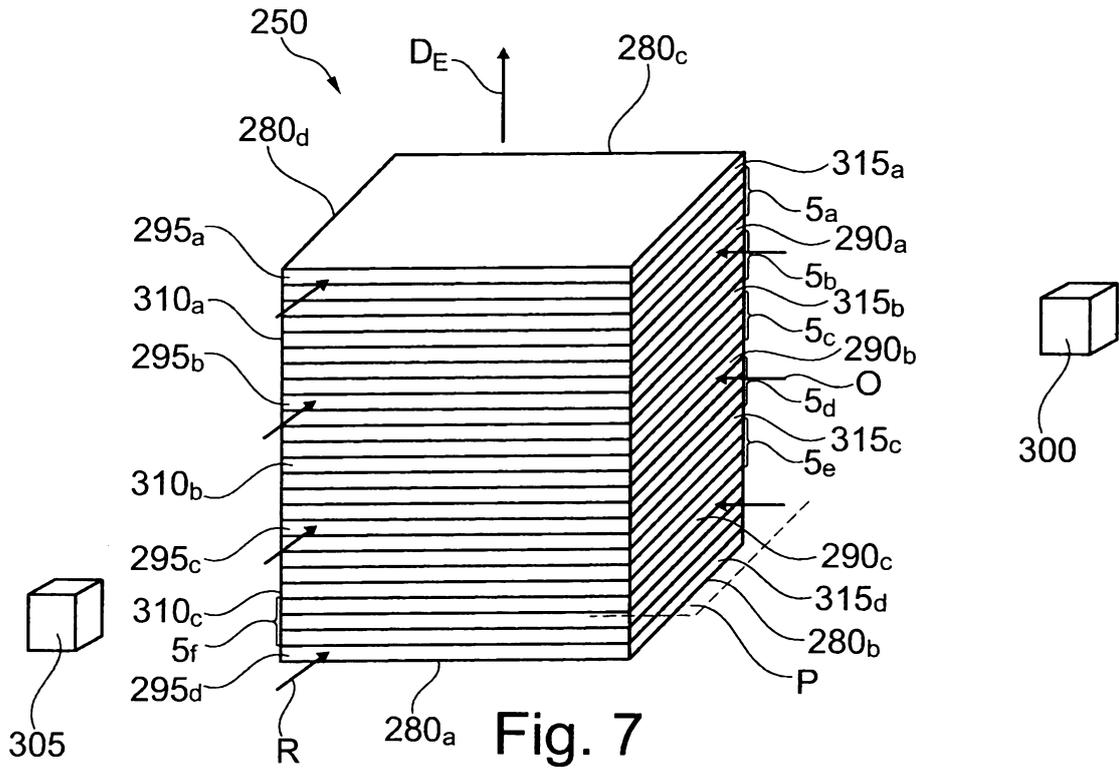


Fig. 6



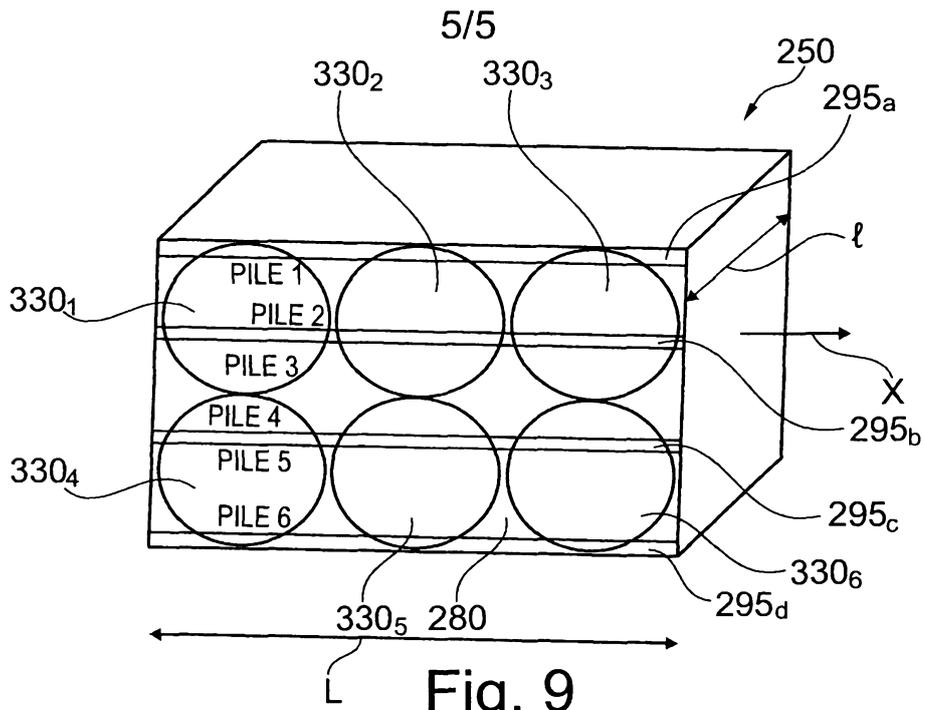


Fig. 9

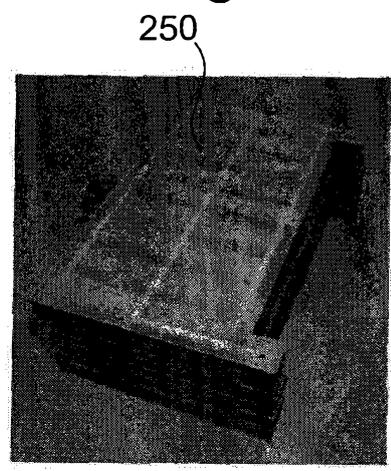


Fig. 10

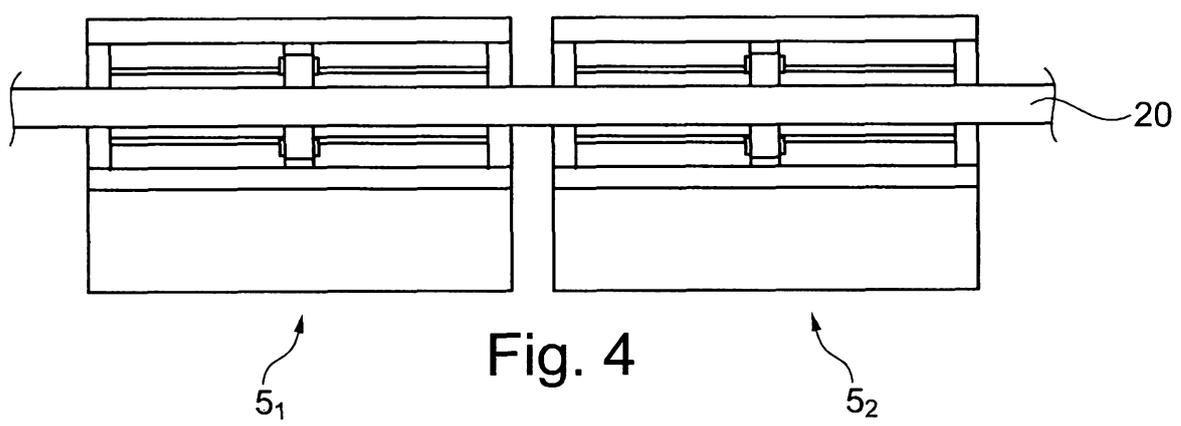


Fig. 4

# RAPPORT DE RECHERCHE

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

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

US 2009/004542 A1 (BUDINSKI MICHAEL K [US]) 1 janvier 2009 (2009-01-01)

US 2006/257703 A1 (QI XIWANG [US] ET AL) 16 novembre 2006 (2006-11-16)

DE 11 2004 002695 T5 (NISSAN MOTOR [JP]) 13 septembre 2007 (2007-09-13)

DE 10 2013 108413 A1 (HAUTMANN GERHARD [DE]) 19 février 2015 (2015-02-19)

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

NEANT

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

NEANT