

La production d'hydrogène avec dérivés du carbone à haute valeur ajoutée (H₂+C)

Maxime Ott, Consultant hydrogène, EnerKa, 2021
Université de Tours -- École de technologie supérieure

Préambule – les modes de production H₂+C

Il existe de nombreux procédés permettant de produire de l'hydrogène. Ceux qui nous intéressent ici sont les procédés dits de décomposition du méthane, qui permettent de produire à la fois du dihydrogène et d'autres produits à base de carbone qui peuvent être valorisés.

- ✚ **La décomposition thermo catalytique** : une des premières technologies de craquage thermique du méthane est le procédé de Wulff. Ce procédé utilise de la vapeur à haute température pour fissurer le gaz naturel en acétylène, produisant principalement du dihydrogène, de l'acétylène, de l'éthylène, des oxydes de carbone dans le flux gazeux, et du carbone solide déposé sur le support.
D'autres procédés, principalement basés sur la pyrolyse du méthane, ont ensuite été étudiés et ont atteint différents stades de développement. On peut notamment citer le procédé de pyrolyse du méthane dans un bain de métal fondu, qui utilise une colonne à bulles remplie d'un métal sous forme liquide. Le méthane y est introduit par un pulvérisateur et se décompose lors de la remontée des bulles. Du noir de carbone se forme alors au sommet de la colonne et le dihydrogène est évacué par le haut.
- ✚ **La décomposition directe du méthane pour la co-production de dihydrogène et de noir de carbone, qui peut se faire par craquage grâce à une torche à plasma thermique.** On obtient alors du carbone, généralement sous forme de noir de carbone, et du dihydrogène. Différentes technologies existent : plasma à courant continu (procédé de Kvaerner), plasma à courant alternatif triphasé (technologie développée aux Mines ParisTech et utilisée par Monolith Materials et Plenesys). Il existe également des procédés qui utilisent des torches à plasma non thermique (plasma froid), comme des torches à plasma à micro-ondes.
- ✚ **La décomposition chimique du méthane** : ce procédé est basé sur la réaction d'hydrocarbures, tels que le méthane, avec du chlorure de nickel anhydre pour former du nickel métallique, du carbone et du chlorure d'hydrogène à une température d'environ 800°C. L'abaissement de la température entraîne une réaction inverse entre le nickel métallique et le chlorure de d'hydrogène pour régénérer le chlorure de nickel et libérer du dihydrogène. Le carbone est séparé du chlorure de nickel par sublimation. La réaction est tolérante aux impuretés présentes dans le gaz naturel, comme le soufre, l'eau et d'autres hydrocarbures.
- ✚ Enfin, **l'énergie solaire concentrée** est également étudiée pour cet usage. En effet, il s'agit d'une source renouvelable de chaleur à haute température, et l'irradiation solaire directe des réactifs permet un transfert de chaleur très efficace.

Sources :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27hydrog%C3%A8ne
<https://fuelcellsworks.com/news/hydrogen-from-natural-gas-without-co2-emissions/>
<http://www.fulcheri.fr/>

PNNL – ANL: "R&D Opportunities for Development of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products", November 2017



PLENESYS utilise un procédé de transformation du gaz naturel en noir de carbone et dihydrogène grâce à une torche à plasma (CB&H Process).

Deux entités sont à l'origine de ce procédé :

- ✚ L'entreprise norvégienne Kvaerner, qui a développé le procédé dans les années 1980, c'est pour cela que l'on retrouve souvent ce procédé dans la littérature sous le nom "*Kvaerner carbon black and hydrogen process*". Entre 1991 et 2003, l'entreprise a construit une usine pilote en Suisse et une usine au Canada.
- ✚ Une équipe de recherche de Laurent Fulcheri aux Mines ParisTech à Sophia Antipolis depuis 1989. Ils ont construit un démonstrateur dans les années 1990 dans le cadre des recherches (en partenariat avec le CNRS à Odeillo, EDF-GDF, l'ADEME, et Lonza).

Aujourd'hui, on retrouve deux entreprises issues directement de ces précurseurs :

- ✚ PLENESYS, qui est une startup issue des recherches menées aux Mines ParisTech et cofondée par Laurent Fulcheri.
- ✚ Monolith Materials, partenaire d'Aker (société mère de Kvaerner) et Laurent Fulcheri (Mines ParisTech). Cette entreprise a construit une usine pilote dans la Silicon Valley (Californie) et ils construisent actuellement une usine dans le Nebraska.

PLENESYS utilise la technologie de plasma à courant alternatif triphasé, technologie développée aux Mines ParisTech. Monolith Materials utilise la technologie de plasma à courant continu développé par Kvaerner mais travaille aussi avec Laurent Fulcheri.

Sources :

www.monolithmaterials.com

<https://plenesys.com/fr/>

[The industrial application of plasma technology for the production of fumed Silica](#)

[Monolith Plans Shake-up of Carbon Black World](#)

[CRAQUAGE DU NOIR DE CARBONE À LA DEMANDE : Moins polluant et plus souple, ce nouveau procédé de fabrication de noir de carbone par craquage thermique du méthane par plasma d'arc peut fournir des produits aux propriétés plus variées et mieux ciblées](#)

Mise à jour (26/05/2021) :

Plenesys a l'air d'avoir vraiment bien avancé depuis l'année dernière. Ils ont une approche assez unique avec leurs unités de production décentralisée HyPlasma (ils vendent également leurs torches brevetées).

Leur site est plutôt bien fait et cette page (<https://plenesys.com/fr/hyplasma>) explique assez bien leur produit.

C'est Kvaerner, société norvégienne d'ingénierie et de services de construction créée 1853, qui a développé, en partenariat avec le laboratoire de chimie et matériaux SINTEF à Oslo, le procédé de transformation du gaz naturel en noir de carbone et dihydrogène par craquage grâce à une torche à plasma dans les années 1980. C'est pour cela que l'on retrouve ce procédé dans la littérature sous le nom "*Kvaerner carbon black and hydrogen process*". En 1995 l'entreprise a construit une usine pilote à Hofors en Suède, puis une usine à Karbomont au Canada en 1997. Mais cette usine n'a jamais atteint le stade d'exploitation commerciale et a été arrêtée puis détruite en 2003 à cause de problèmes techniques et d'une incapacité de produire noir de carbone de qualité commercialisable.






Aujourd'hui, Kvaerner est spécialisée dans l'exécution de projets et le conseil. La société fournit des services d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction, ainsi que des plateformes offshore, des usines à terre, des unités de production flottantes et des solutions d'énergie renouvelable. Kvaerner n'est plus un acteur direct pour l'exploitation de ce procédé mais est partenaire de Monolith Materials qui travaille avec l'équipe originale des projets de recherche et développement de Kvaerner et du laboratoire SINTEF.

Chiffre d'affaires : 630M € (2018).

Nombre d'employés : 1001-5000 (source : LinkedIn).

Siège social : Snarøyveien 20, NO-1360 Fornebu, PO Box 74, NO-1325 Lysaker, Norvège.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

-  Technologie : Kvaerner carbon black and hydrogen process (courant continu et électrodes cylindriques creuses en graphite).
-  Maturité commerciale : projet arrêté à TRL 7-8.
-  Projets en cours : aucun (c'est Monolith Materials qui prend la suite des travaux de Kvaerner depuis 2012).
-  Valorisation du carbone : noir de carbone.
-  Valorisation de l'hydrogène : hydrogène de haute qualité.

Monolith Materials est une entreprise américaine fondée en 2012. Elle est spécialisée dans la production de noir de carbone grâce à des torches à plasma. L'entreprise travaille avec l'équipe originale des projets d'Aker (Kværner) et est partenaire des Mines ParisTech. Aux Etats-Unis, Monolith Materials possède une usine de démonstration en Californie et construit une usine commerciale dans le Nebraska qui devrait être opérationnelle à l'été 2020. L'ambition de cette entreprise est de « relocaliser » aux Etats-Unis la production de noir de carbone, aujourd'hui principalement produit en Chine.

Chiffre d'affaires : 25M USD (Q2 2020).

Nombre d'employés : 51-200 (source : LinkedIn).

Siège social : Lincoln Office, 134 S 13th St. Suite 700, Lincoln, Nebraska 68508, USA.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

- Technologie : craquage de gaz naturel grâce à une torche à plasma (technologie non précisée mais basée sur le procédé Kværner et les recherches de Mines ParisTech).
- Maturité commerciale : TRL 7-8.
- Projets en cours :
Construction d'une usine dans le Nebraska (Olive Creek Plant (OC1), 27077 SW 42nd Street, Hallam).



- Valorisation du carbone : noir de carbone.
- Valorisation de l'hydrogène : partenariat avec le Nebraska Public Power District (NPPD), le plus grand service public d'électricité du Nebraska. Le NPPD prévoit de remplacer une chaudière alimentée au charbon de son usine de Sheldon Station à Hallam par une chaudière alimentée à l'hydrogène, hydrogène qui sera produit par l'usine de Monolith Materials.

Mise à jour (26/05/2021) :

Monolith Materials ont aussi l'air d'avoir bien avancé, la construction du démonstrateur est terminée. Leur site web a également bien évolué, on y retrouve une excellente vidéo explicative de la technologie avec une musique épique.

GasPlas était une entreprise norvégienne en activité entre 2008 et 2016. Elle a développé une technologie de plasma à micro-ondes non équilibré pour le craquage du méthane et du dioxyde de carbone en carbones à haute valeur et en hydrogène. Cette société aurait été la première à permettre l'utilisation de la technologie de plasma à micro-ondes à une échelle industrialisable. Pour son développement, GasPlas avait établi des partenariats avec l'Université de Cambridge, Bayerngas, Statoil, et le laboratoire de chimie et matériaux SINTEF à Oslo. Elle a livré son premier réacteur à ce dernier en mars 2012. Ce réacteur développé et breveté par GasPlas était évolutif et pouvait constituer la base d'un système de production d'hydrogène à partir de méthane fossile ou de biométhane.

GasPlas a ensuite travaillé en partenariat étroit avec Cambridge Nanosystems Ltd, entreprise dérivée de l'Université de Cambridge constituée en 2012 et dont l'objectif à l'époque était de remplacer le cuivre par le carbone dans toutes les applications électriques, cela grâce au développement d'une méthode pour produire des nanotubes de carbone à paroi unique. Cambridge Nanosystems Ltd a ensuite développé un procédé pour produire du graphène de très haute qualité et à plus grande échelle que ce qui était possible auparavant, en transformant des déchets de biogaz tels que le méthane, grâce notamment à des réacteurs à plasma basés sur la technologie développée par GasPlas. En 2014, Cambridge Nanosystems Ltd débute un partenariat avec FVG, une entreprise agricole et agroalimentaire mondiale basée en Malaisie et disposant d'un approvisionnement abondant en méthane qui est un sous-produit de sa production d'huile de palme à grande échelle. Ensemble, les deux entreprises visent à réaliser une synergie utilisant la technologie de plasma à micro-ondes pour transformer ce méthane en graphène. Aujourd'hui, l'usine de production basée à Cambridge au Royaume-Uni a une capacité de production de 5 tonnes de graphène par an.

Produit commercialisé par GasPlas jusqu'en 2016 : Le "GasPlas Reactor", un réacteur à plasma qui transforme le méthane en carbone noir et en hydrogène ([brevets](#)). Ce réacteur est encore utilisé par Cambridge Nanosystems Ltd.

Cambridge Nanosystems Ltd, entreprise spécialisée dans la production de graphène de très haute qualité et à grande échelle en transformant des déchets de biogaz tels que le méthane, grâce à des réacteurs à plasma à micro-ondes. Cette entreprise constitue un concurrent important pour deux raisons principales : sa technologie très avancée (TRL 8) de production de graphène, qui est un matériau à très haute valeur ajoutée, et son partenaire et actionnaire principal FVG, une entreprise agricole et agroalimentaire mondiale basée en Malaisie, qui dispose de moyens financiers importants.

FVG Cambridge Nanosystems :

- Chiffre d'affaires : /
- Nombre d'employés : 11-50 (source : LinkedIn).
- Siège social : 17 Mercers Row, Cambridge, Cambridgeshire CB5 8HY United Kingdom.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

- 🚧 Technologie : production de graphène de très haute qualité et à grande échelle en transformant des déchets de biogaz tels que le méthane grâce à des réacteurs à plasma basés sur la technologie développée par GasPlas (technologie de réacteurs à plasma à micro-ondes non équilibré).
- 🚧 Maturité commerciale : TRL 7-8.
- 🚧 Projets en cours : non précisés.
- 🚧 Valorisation du carbone : graphène de très haute qualité.
- 🚧 Valorisation de l'hydrogène : l'entreprise se concentre sur le graphène, elle ne précise pas si elle valorise l'hydrogène produit.

Le groupe australien HAZER a été fondé en 2010 pour commercialiser une technologie développée à l'Université d'Australie Occidentale, le « HAZER Process ». Ce procédé utilise du gaz naturel et du minerai de fer non transformé pour produire un hydrogène « propre » à faible coût et à faibles émissions, et du graphite synthétique.

En 2016, HAZER a développé un partenariat de recherche avec l'Université de Sydney et a établi ses opérations de développement au sein de l'École de génie chimique et biomoléculaire de l'Université. L'entreprise possède actuellement une usine pilote située à Kwinana dans l'ouest de l'Australie, et a commencé les travaux de construction d'une usine de démonstration commerciale à Perth, toujours en Australie.

Chiffre d'affaires : 2M AUD (2019), société cotée en bourse.

Nombre d'employés : 11-50 (source : LinkedIn)

Siège social : Hazer Group LTD, Level 9/99 St Georges Terrace, Perth WA 6000, Australia.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

- ✚ Technologie : procédé de production d'hydrogène et de carbone graphitique à partir d'un gaz hydrocarboné consistant à mettre en contact, à une température entre 600°C et 1000°C, le catalyseur avec le gaz hydrocarboné pour convertir catalytiquement au moins une partie du gaz hydrocarboné en hydrogène et en carbone graphitique, le catalyseur étant un oxyde de fer de faible qualité.
- ✚ Maturité commerciale : TRL 6-7.
- ✚ Projet en cours :
Construction d'une usine de démonstration commerciale dans l'Ouest de l'Australie (Woodman Point, Coogee, Perth). Le projet a pour but de recueillir le gaz produit par le traitement des eaux usées et le transformer en hydrogène et en graphite grâce à du minerai de fer non transformé.

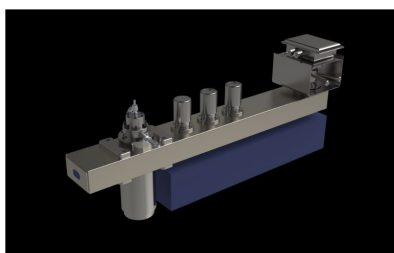


Source : <https://www.miningmonthly.com/innovation/news/1382972/arena-chips-in-for-hazer>

- ✚ Valorisation du carbone : graphite synthétique haute qualité pour batteries lithium-ion.
- ✚ Valorisation de l'hydrogène : hydrogène industriel (50% d'émissions de CO₂ en moins par rapport au SMR).

Fondée en 2011, Recarbon, Inc. est une entreprise américaine qui développe une technologie polyvalente pour produire des gaz de synthèse (hydrogène et monoxyde de carbone) à partir de gaz à effet de serre (méthane et dioxyde de carbone).

ReCarbon, Inc. utilise une technologie de plasma à micro-ondes brevetée pour dissocier le dioxyde de carbone et le méthane en hydrogène et en monoxyde de carbone. Pour cela, l'entreprise a développé une solution modulaire et évolutive, appelée unité de conversion plasma-carbone (PCCU), dont le composant principal est une lame d'émission (Emission Blade) qui utilise la technologie de plasma à micro-ondes.



ReCarbon Emission Blade: the core basic component of Plasma Carbon Conversion Unit.



ReCarbon's Plasma Carbon Conversion Units are modular designs to maximize scalability, configurability, and serviceability.

ReCarbon, Inc. met l'accent sur la réduction et la réutilisation des émissions de carbone. Les modules sont conçus pour être configurables en fonction des besoins des clients et la technologie actuelle utilise un magnétron de 3kW par lame d'émission.

Chiffre d'affaire : 3M USD (2019), Investissement de 7M USD par Doosan en décembre 2019.

Nombre d'employés : 11-50 (source : LinkedIn).

Siège social : 3350 Scott Blvd., Building 16, Santa Clara, CA 95054 USA.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

🚧 Technologie : technologie de plasma à micro-ondes.

🚧 Maturité commerciale : TRL 6-7.

🚧 Projets en cours :

- Une usine pilote à la décharge de Daegu en Corée du Sud, capable de produire de l'hydrogène de haute qualité à partir de gaz d'enfouissement. Cette usine comporte une unité de conversion plasma de carbone (PCCU) de 72 lames d'émission de 1 kW, qui utilise du dioxyde de carbone et du méthane provenant du gaz d'enfouissement produit par les déchets solides organiques. L'hydrogène est séparé grâce à un système d'adsorption à oscillation de pression capable de produire un hydrogène d'une pureté de 99.99%.



- Une usine commerciale en développement avec H2renewables dans le Tennessee aux États-Unis.
- Développement rapide de projets au Canada et en Australie.

🚧 Valorisation du carbone : monoxyde de carbone synthétique.

🚧 Valorisation de l'hydrogène : hydrogène de haute qualité.



<https://hiroc.com/>

HiiROC est une entreprise anglaise fondée en 2019. Elle développe une solution permettant de produire de l'hydrogène vert et du noir de carbone à partir de méthane grâce à une technologie de torche à plasma. Cette solution se veut modulaire (une unité faisant la taille de deux réfrigérateurs), évolutive et installable directement sur les sites où l'on a besoin d'hydrogène, ce qui permet de supprimer les coûts liés au transport et de réduire ceux liés au stockage.






HiiROC a récemment conclu un partenariat avec la société AFC Energy qui produit notamment des stations hydrogène pour des usages de mobilité. Ce partenariat permettra à la fois à AFC Energy d'utiliser la technologie développée par HiiROC dans ses unités de production de dihydrogène, et à HiiROC d'avoir une implantation rapide sur le marché.

Chiffre d'affaires : aucune commercialisation pour l'instant.

Nombre d'employés : 2-10 (source : LinkedIn).

Siège social : Aura Innovation Centre, Bridgehead Business Park, Meadow Road, Hessle, HU13 OGD England.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

-  Technologie : technologie de plasma, type non précisée.
-  Maturité commerciale : TRL 4-5.
-  Projets en cours : un partenariat entre HiiROC et AFC Energy a été conclu. Ce contrat permettra à AFC Energy d'utiliser la technologie développée par HiiROC dans ses unités de production d'hydrogène.
-  Valorisation du carbone : noir de carbone.
-  Valorisation de l'hydrogène : hydrogène de haute qualité.



BASF est un groupe chimique allemand et le plus grand groupe chimique au monde. L'industrie de la chimie emploie de grandes quantités d'hydrogène en tant que réactif. BASF s'en sert notamment pour la fabrication de nombreux produits, comme l'ammoniac, le cyclohexane, l'aniline, des oléfines, ... Sur son site de Ludwigshafen en Allemagne par exemple, BASF en produit 300 000 tonnes par an. Aussi, le groupe a décidé de travailler au remplacement du reformage par des technologies plus propres. C'est pourquoi, avec ses partenaires, il développe une technologie de production d'hydrogène à partir de gaz naturel, consistant à diviser directement le gaz naturel en hydrogène et en carbone. Le procédé BASF est sensiblement différent du procédé Fulcheri utilisé par Plenesys et Monolith Materials. Il est basé sur la pyrolyse et produit du gaz de synthèse et du carbone solide. L'énergie du craquage est également fournie par l'électricité, à une température inférieure, par induction, mais les pertes thermiques sont sensiblement moindres du fait d'une meilleure intégration. Le carbone s'agglomère en billes d'une certaine taille. BASF estimant que le marché du noir de carbone que vise Monolith Materials et Plenesys sera rapidement saturé, l'entreprise vise plutôt le marché des anodes de carbone des fours d'aluminium, plus conséquent. D'autres valorisations de ce carbone sont aussi à l'étude, comme la sidérurgie (production d'acier ou d'aluminium), ou la production de coke.

Depuis 2013, BASF mène des recherches pour le développement d'un nouveau concept de réacteur qui pourrait faire l'objet d'un pilote à l'horizon 2025. Les chercheurs de BASF sont parvenus, grâce à des systèmes de catalyseurs nouvelle génération à haute performance commercialisés en coopération avec Linde, à produire des oléfines à partir d'un mélange de CO₂ et de méthane en passant par la production d'un syngaz (H₂+CO).

Pour produire l'hydrogène sur site grâce à ce procédé, c'est le groupe français Air Liquide, qui fournit BASF en gaz industriels depuis plus de 50 ans, qui fournira les unités de production. Air Liquide achètera donc une partie du méthane issu des processus de production de BASF et le valorisera comme matière première dans ses usines de production d'hydrogène sur le site d'Anvers. Ce projet devrait permettre à Air Liquide de réduire de 15 000 tonnes par an les émissions de CO₂ de ses productions d'hydrogène à Anvers et de contribuer au développement d'une économie circulaire. Sur le complexe, Air Liquide détient et opère actuellement un total de cinq unités. Deux usines produisent de l'hydrogène, à hauteur de 100 000 Nm³ par heure, et du monoxyde de carbone (10 000 Nm³/heure).

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

- Technologie : craquage de gaz naturel par pyrolyse (décomposition thermo catalytique par pyrolyse du méthane dans un bain de métal fondu).
- Maturité commerciale : TRL 4-5.
- Projets en cours : recherches pour développement d'un pilote à horizon 2025.
- Valorisation du carbone : billes de carbone pour la fabrication d'anodes de carbone des fours d'aluminium, la sidérurgie (production d'acier ou d'aluminium), ou la production de coke.
- Valorisation de l'hydrogène : fabrication de produits chimiques en économie circulaire.

Sources :

<https://www.basf.com/fr/fr.html>

<https://www.linde-gas.fr/fr/index.html>

<https://www.airliquide.com/fr>

<https://www.basf.com/fr/fr/media/Communiqués-de-presse-France/2019/p-19-111.html>






<https://www.usinenouvelle.com/article/air-liquide-renforce-ses-connexions-avec-basf-sur-la-plateforme-d-anvers.N928824>

<https://www.zonebourse.com/BASF-AG-435699/actualite/Linde-va-construire-une-usine-d-hydrogene-pour-BASF-454944/>

La filiale de BASF, Wintershall, spécialisée dans le secteur énergétique, s'est, elle, lancée en 2019 dans un projet de recherche en collaboration avec l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) en Allemagne. Le projet de recherche, initialement prévu pour trois ans, vise à mettre en place les bases de l'utilisation industrielle future de la pyrolyse du méthane. « Dans ce processus, le gaz naturel est thermiquement décomposé en hydrogène et en carbone dans un réacteur à haute température. Au lieu du CO₂, un carbone en poudre (noir de carbone) très pur est produit en tant que sous-produit, qui peut ensuite être transformé en matière première industrielle et dont l'importance ne cesse d'augmenter » (www.wintershalldea.com).

Siège social : Friedrich-Ebert-Straße 160, 34119 Kassel, Germany.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

-  Technologie : craquage de gaz naturel par pyrolyse.
-  Maturité commerciale : TRL 3-4.
-  Projets en cours : recherches.
-  Valorisation du carbone : noir de carbone.
-  Valorisation de l'hydrogène : hydrogène de haute qualité.

Sources :

<http://www.kit.edu/>

<https://wintershalldea.com/en>






<https://wintershalldea.com/en/newsroom/hydrogen-natural-gas-without-co2-emissions-wintershall-dea-and-kit-launch-cooperation-project>

Le Penn State EMS Energy Institute, qui fait partie du College of Earth and Mineral Sciences et de l'Institut de l'énergie et de l'environnement de l'État de Pennsylvanie aux Etats-Unis, et la start-up H Quest Vanguard collaborent depuis 2015 sur la recherche et le développement de nombreux projets utilisant la technologie plasma. Ils travaillent notamment sur un projet de décomposition directe du méthane grâce à une technologie de plasma à micro-ondes. Ce projet se concentre aujourd'hui sur l'optimisation de la conversion assistée par plasma du méthane pour la production d'hydrogène et de graphène. Le but est de développer des relations entre le type de carbone produit, ses caractéristiques, et les paramètres du procédé, cela pour permettre la sélection et l'adaptation de ses propriétés physicochimiques.

L'entreprise a également développé une autre technologie basée sur les micro-ondes, « Wave Liquefaction » permettant de produire de l'huile brute et des matériaux carbonés, notamment du graphite, à partir de gaz naturel (méthane) et de charbon. Un pilote a été construit pour tester cette technologie.

Siège social : Pittsburgh, Pennsylvanie, USA.

Lien avec la technologie de décomposition du méthane :

-  Technologie : technologie de plasma à micro-ondes.
-  Maturité commerciale : TRL 3-4.
-  Projets en cours : recherches.
-  Valorisation du carbone : noir de carbone.
-  Valorisation de l'hydrogène : hydrogène de haute qualité.

Sources :

<https://www.ems.psu.edu/research-faculty/institutes-and-centers/ems-energy-institute>

<http://www.h-quest.com/>

<https://fuelcellsworks.com/news/extracting-hydrogen-from-natural-gas-using-microwave-plasma-technology/>

<https://www.usea.org/sites/default/files/event-/USEA-HQV-CoalBrightFuture.pdf>

