

Les carburants alternatifs écologiques

Table des matières

1	Pourquoi des carburants alternatifs ?	2
1.1	Les types de carburants.....	2
1.2	La Combustion.....	2
1.3	Les processus pour obtenir des carburants alternatifs.....	4
2	L'hydrogène, pour stocker l'énergie	5
2.1	Production de l'hydrogène	5
2.2	L'utilisation de l'hydrogène pour la mobilité	6
3	Le BioGNV comme carburant.....	11
3.1	Rappel du cycle de fabrication et d'utilisation.....	11
3.2	La méthanisation.....	11
3.3	Utilisation du méthane	12
3.4	Le coût complet de production du bio-méthane.....	14
3.5	Transport et stockage	14
3.6	Avantages et inconvénients de la méthanisation.....	15
3.7	Avantages et inconvénients du bioGNV pour la mobilité	15
4	Les agro-carburants liquides	15
4.1	Liste des agrocarburants liquides.....	15
4.2	Potentiel de production des agro-carburants	15
5	Le méthanol	16
5.1	L'utilité du méthanol comme carburant.....	16
5.2	L'utilité du méthanol dans les piles à combustible	16
5.3	La production du méthanol.....	17
5.4	Les inconvénients du méthanol.....	18
6	L'éthanol	19
6.1	L'éthanol comme carburant	19
6.2	Production de l'éthanol.....	20
6.3	Les procédés de fabrication de 2 nd e génération.....	21
6.4	Les procédés de fabrication de 3 ^{ème} e génération	21
6.5	Avantages et inconvénients de l'éthanol.....	21
7	L'isobutène pour fabriquer de l'essence.....	22
7.1	L'isobutène.....	22
7.2	Intérêt de l'isobutène.....	22
7.3	Synthèse de l'isobutène	23
8	Les oléagineux pour produire du biodiesel.....	23
8.1	Utilisation d'oléagineux.....	23
8.2	Obtention des oléagineux.....	23
8.3	Potentiel de production du biodiesel.....	23
9	Conclusion	24
10	Annexe.....	24

1 Pourquoi des carburants alternatifs ?

1.1 Les types de carburants

Il existe 3 sources de carburants alternatifs :

- ⇒ ceux qui sont fabriqués à partir de l'énergie **électrique temporairement excédentaire** ;
- ⇒ ceux qui sont issus du traitement des **déchets** ;
- ⇒ ceux qui sont issus d'activité **agricole ou forestière**.

La fabrication de l'hydrogène absorbe beaucoup d'énergie. Le taux de charge des centrales nucléaires est de 70 à 75%, alors que leur taux de disponibilité est supérieur à 90%. Il serait utile de stocker sous forme chimique les 15% d'énergie inutilisée pendant les périodes creuses de consommation. Les éoliennes fournissent de l'électricité alors qu'on pourrait s'en passer (puisque l'équivalent d'énergie maîtrisable doit être disponible). L'utilisation de ces surplus pour produire de l'hydrogène est une solution pour stocker de l'énergie transportable. L'hydrogène ainsi généré peut être utilisé directement comme carburant de mobilité ou aussi indirectement pour fabriquer d'autres carburants et pour absorber (par hydrogénation) le CO₂ émis par des processus industriels, au lieu de l'envoyer dans l'atmosphère immédiatement.

L'intérêt de transformer en combustible les déchets est économiquement évident. De plus, cela éviterait certaines émissions de méthane dans l'atmosphère (par le lisier par exemple).

L'intérêt de fabriquer par l'agriculture des combustibles (bois, éthanol...) peut paraître attractif bien que le coût de l'énergie obtenue grâce au soleil par l'agriculture reste supérieur à celui de l'extraction du charbon ou des produits pétroliers qu'il suffit d'extraire par un forage. On peut alors considérer que la majorité du CO₂ émis au moment de la libération d'énergie par le carburant (combustion ou réaction chimique) est majoritairement compensé par l'absorption de CO₂ par les plantes. Il faut cependant que cette absorption soit peu décalée dans le temps, par rapport à l'émission, ce qui n'est pas le cas pour le bois (un hêtre met 80 ans pour absorber la tonne de carbone émise par sa combustion) et que la culture ne détruise pas la forêt.

Origine	Alcanes : C _n H _{2n+2}	Alcools C _n H _{2n+1} (OH)
Stockage d'électricité excédentaire	Fabrication d'hydrogène puis d'alcanes et de CO ₂	
Valorisation des déchets (alimentation, déjections animales, cultures)	Méthanisation qui fournit du méthane...	Fermentation donnant du méthanol, de l'éthanol...
	Éthane, propane, butane	
Agro-carburants		

Nous comparerons à l'essence au diesel et au GPL plus particulièrement :

- ⇒ l'hydrogène,
- ⇒ le bioGNV (Méthane),
- ⇒ les Agro-carburants : le méthanol, l'éthanol, l'isobutène, le biodiesel (Agro-gazole).

1.2 La Combustion

La combustion est la solution la plus courante pour récupérer l'énergie chimique des carburants. Elle génère de la chaleur dont une partie est récupérée pour produire de l'énergie mécanique. Selon le principe de Carnot, le rendement est malheureusement faible en général puisque environ guère plus de 30% de l'énergie est utilisable (exceptionnellement un peu plus).

1.2.1. La combustion des alcanes

Les alcanes sont le méthane (CH₄), l'éthane (C₂H₆), le propane (C₃H₈), le butane (C₄H₁₀).

La combustion est une réaction simple d'oxydation qui émet du gaz carbonique et de l'eau.



L'essence est un mélange d'heptane, d'octanes et d'autres composants (alcènes et arènes). Le kérosène et le diesel également, mais avec des composants dits plus lourds, car contenant plus de molécules de carbone (de 8 à 21).

Il est important de noter que plus n est faible, plus la quantité de CO₂ émise est faible par rapport à la quantité d'eau (dans les ratios 1/2, 2/3, 3/4...). C'est l'intérêt du méthane par exemple. Néanmoins, l'intérêt des alcanes plus lourds est leur plus grande facilité de stockage sous forme liquide.

1. 2. 2. La combustion des alcools

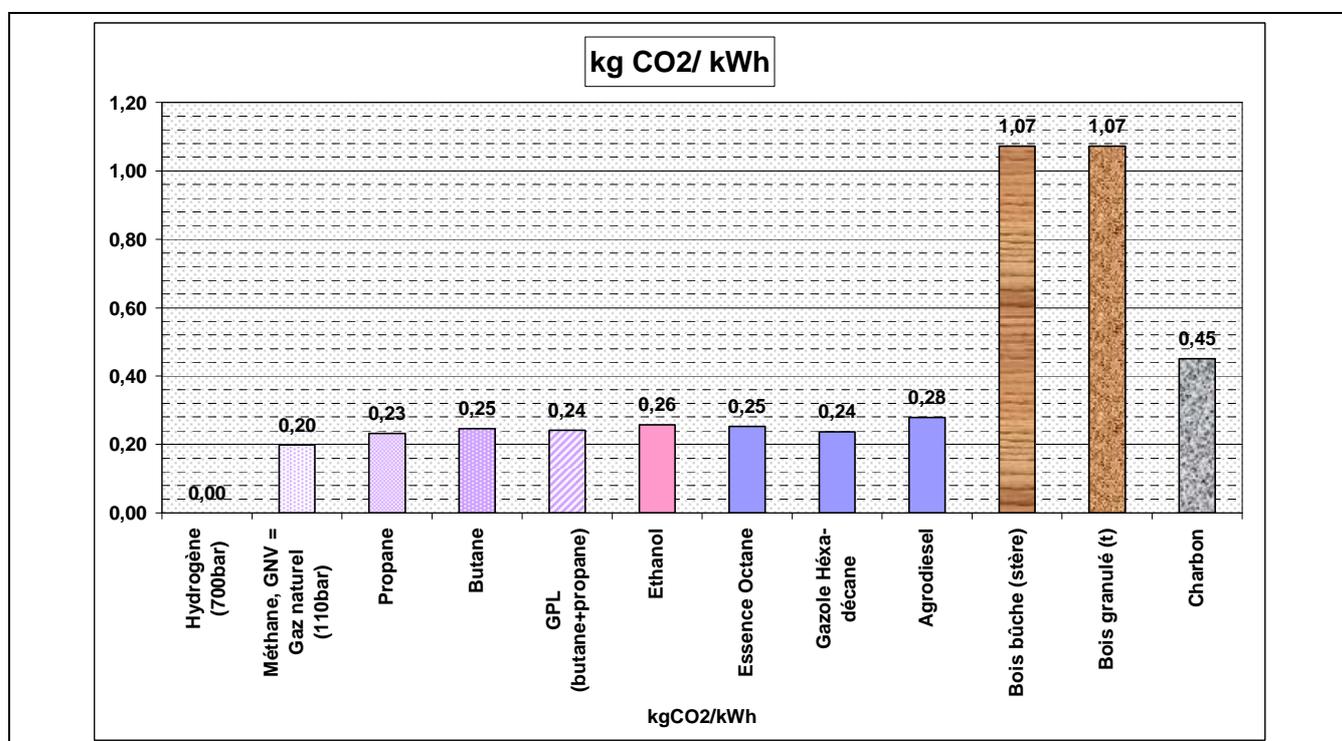
La combustion des alcools (méthanol, éthanol...) est utilisable pour remplacer celle de nos carburants classiques.



Plus n croît, plus le ratio CO₂ / eau émise croît comme 2n/2n+1 : 2/3, 4/5...

On utilisera donc plutôt le méthanol et l'éthanol, qui peut facilement remplacer l'essence, sur des véhicules spécialement adaptés pour, comme certains flex-fioul récents.

Le diagramme suivant indique les quantités de CO₂ théoriquement émises par les différents carburants.



On voit que la quantité de CO₂ émise par kg lors de la combustion est assez semblable. Les exceptions sont le charbon et surtout le bois (non replanté ou qui la rendra d'ici à 100 ans, donc trop tard pour éviter le dérèglement climatique).

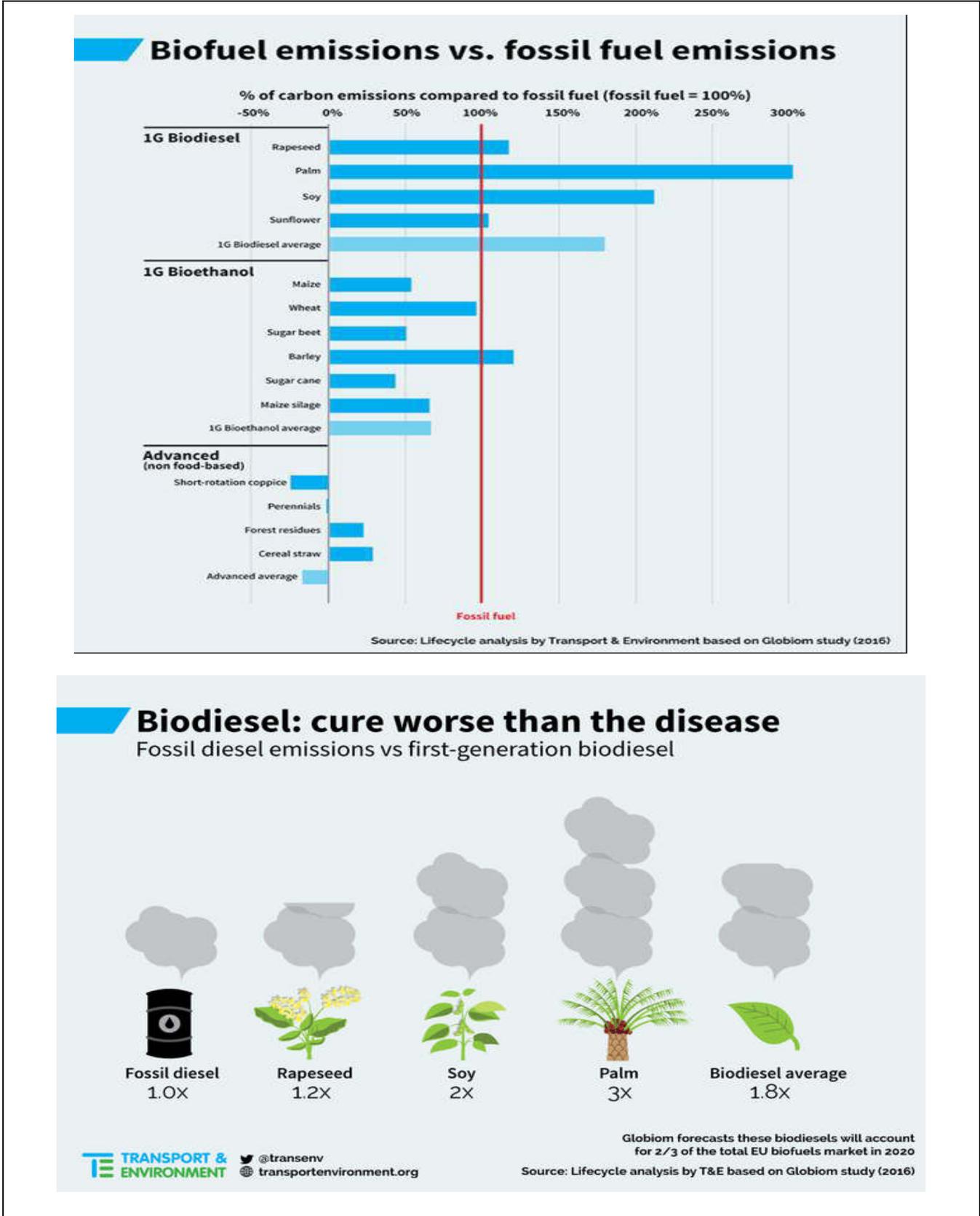
Les caractéristiques d'émission des divers carburants sont données dans le tableau fourni en annexe.

Néanmoins, une étude (Globorn study) montre qu'en pratique, l'intérêt des biocarburants peut être inexistant contrairement à ce que certains écologistes prétendent, car leur production, au détriment de l'exploitation forestière peut conduire à moins d'absorption de CO₂.

Selon une étude de la Commission Européenne reprise par l'ONG Transport & Environnement, le biodiesel émet plus de gaz à effet de serre que le diesel.

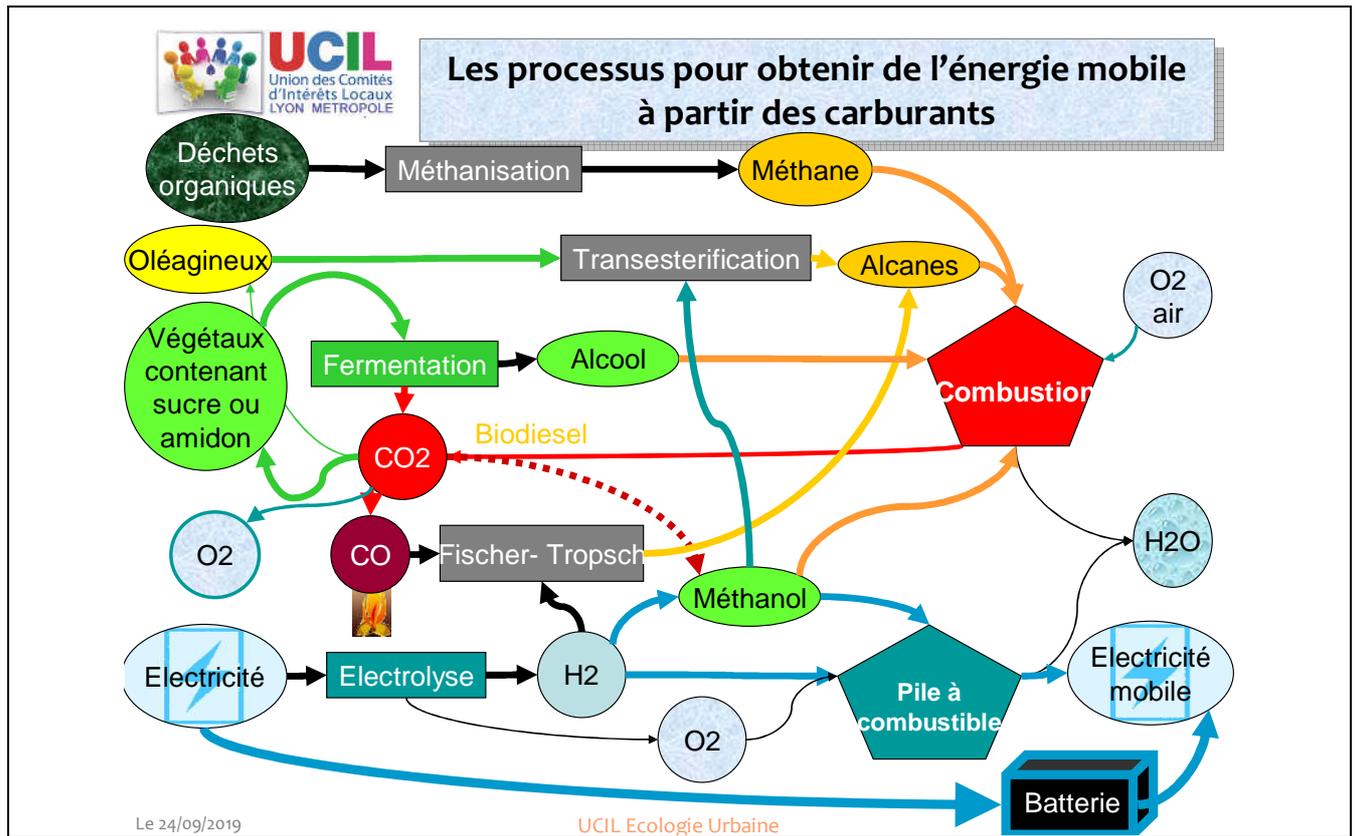
Pourquoi donc un tel résultat ? La réponse réside dans la prise en compte :

- ⇒ du **changement d'affectation des sols, de terres naturelles qui stockaient du carbone (prairies, forêts...)** à des terres cultivées ;
- ⇒ des émissions des tracteurs, transport et engrais..., selon l'étude de l'ONG Transport & environnement.



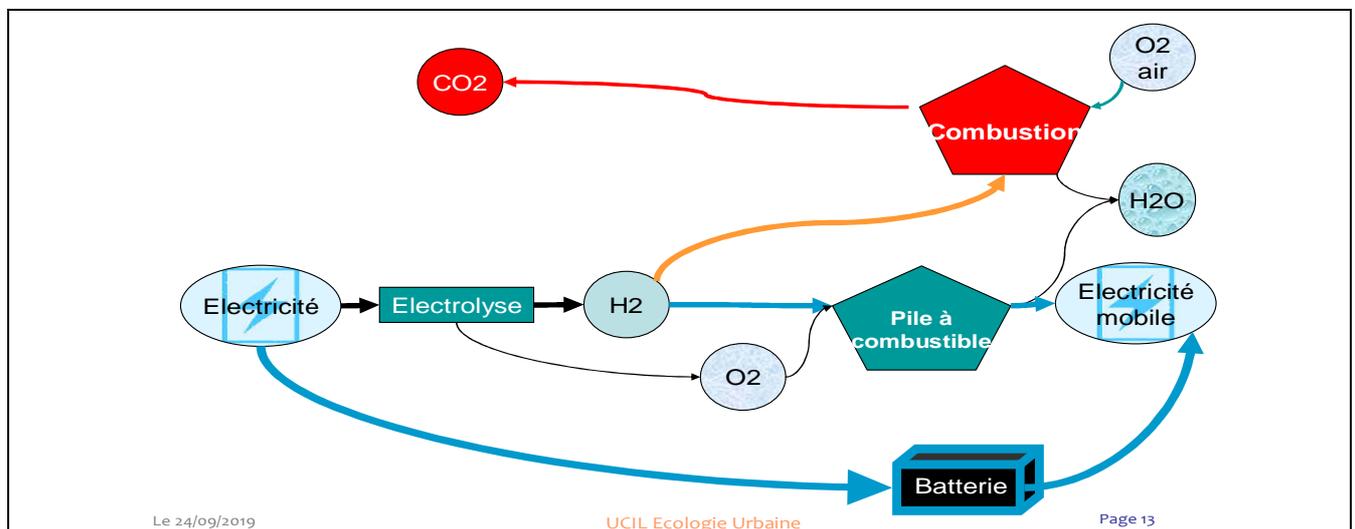
1.3 Les processus pour obtenir des carburants alternatifs

L'ensemble des processus est résumé par le schéma ci-dessous, qui s'explique plus facilement lorsqu'il est présenté progressivement de façon animée et que nous présentons ci-après par morceaux.



2 L'hydrogène, pour stocker l'énergie

2.1 Production de l'hydrogène



L'hydrogène est le carburant nucléaire du soleil. Mais il n'existe pas à l'état naturel sur terre. Il est cependant présent comme composant dans l'eau, donc quasi inépuisable.

2.1.1. La source d'énergie nécessaire

Cependant, il demande beaucoup d'énergie pour être produit.

Comme nous l'avons dit 15% de notre potentiel de production d'électricité nucléaire est disponible.

Par ailleurs, les éoliennes fournissent de l'électricité, aléatoirement selon le vent, même si on n'en pas besoin. On pourrait même s'en passer totalement en France puisque les énergies maîtrisables (hydraulique et nucléaire) doivent quasi obligatoirement suffire à notre consommation. Il conviendrait donc de stocker cette énergie éolienne pour l'utiliser dans les véhicules. Il sera même bientôt absolument nécessaire de pouvoir le faire, car notre production d'énergie aléatoire va bientôt dépasser la consommation d'électricité minimale.

Enfin, certains pays comme la Norvège ont de l'énergie hydraulique excédentaire.

L'hydrogène est donc un procédé de stockage d'électricité produite en excédent.

2. 1. 2. Le processus de fabrication

Le processus le plus simple est l'électrolyse.



Elle se produit en présence d'un électrolyte : comme cations :

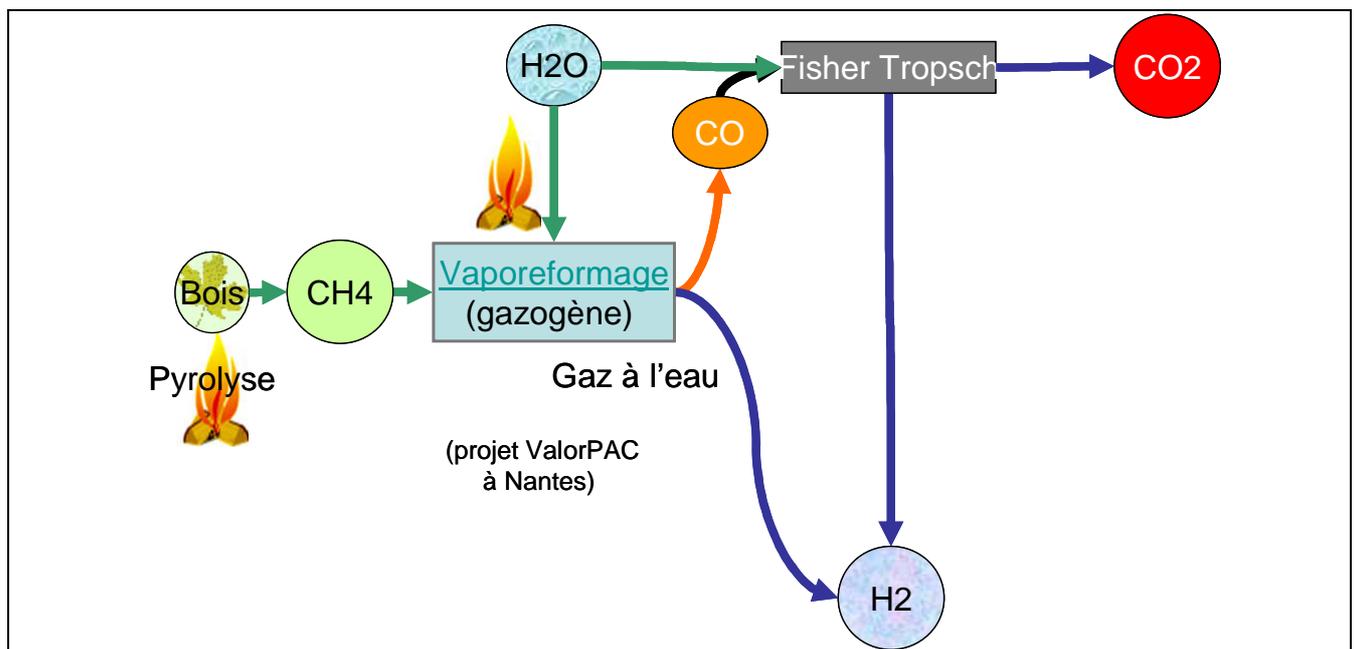
Li^+ , Rb^+ , K^+ , Cs^+ , Ba^{++} , Sr^{++} , Ca^{++} , Na^+ et Mg^{++} , Comme anion généralement : SO_4^{--}

D'autres processus sont possibles pour obtenir de l'hydrogène :

- ⇒ Par vapo-reformage ou reformage du bio-méthane (procédé SMR),
- ⇒ Par la gazéification du charbon ou de la biomasse,
- ⇒ Par biologie (études en cours).

Il est ainsi possible de fabriquer de l'hydrogène à partir des matières organiques comme le bois.

Le processus est proche du système de gazogène qui pendant la guerre de 40 permettait de faire circuler des tractions avant, sans essence. Mais pour que le procédé soit écologique, encore faudrait-il savoir absorber le CO_2 qui est ainsi généré. Nous reviendrons sur ce sujet, dans l'analyse des processus de fabrication d'autres carburants que l'hydrogène.



Cependant, le rendement de l'électrolyse est faible : entre 50-70 % à froid ou entre 80-92 % à chaud et à haute pression (30bars). Le processus de fabrication permet donc de stocker cette énergie et de la restituer dans un véhicule (~5 kWh/m³ d'H₂).

2. 2 L'utilisation de l'hydrogène pour la mobilité

La restitution de l'énergie peut se faire de 2 façons :

- ⇒ par combustion, dans un moteur thermique à hydrogène,
- ⇒ par une opération inverse de l'électrolyse, par catalyse, ce qui restitue de l'eau.

2. 2. 1. Le moteur à hydrogène

Dans son brevet de 1799, **Lebon** avait prédit que son « gaz hydrogène » (du gaz de bois, qui contenait au moins 50 % de dihydrogène, serait « une force applicable à toutes espèces de machine ».

À partir de 1804, **François Isaac de Rivaz** construit les premiers moteurs à gaz de houille, brevetés le 30 janvier 1807, selon le fonctionnement du **Pistolet de Volta**.

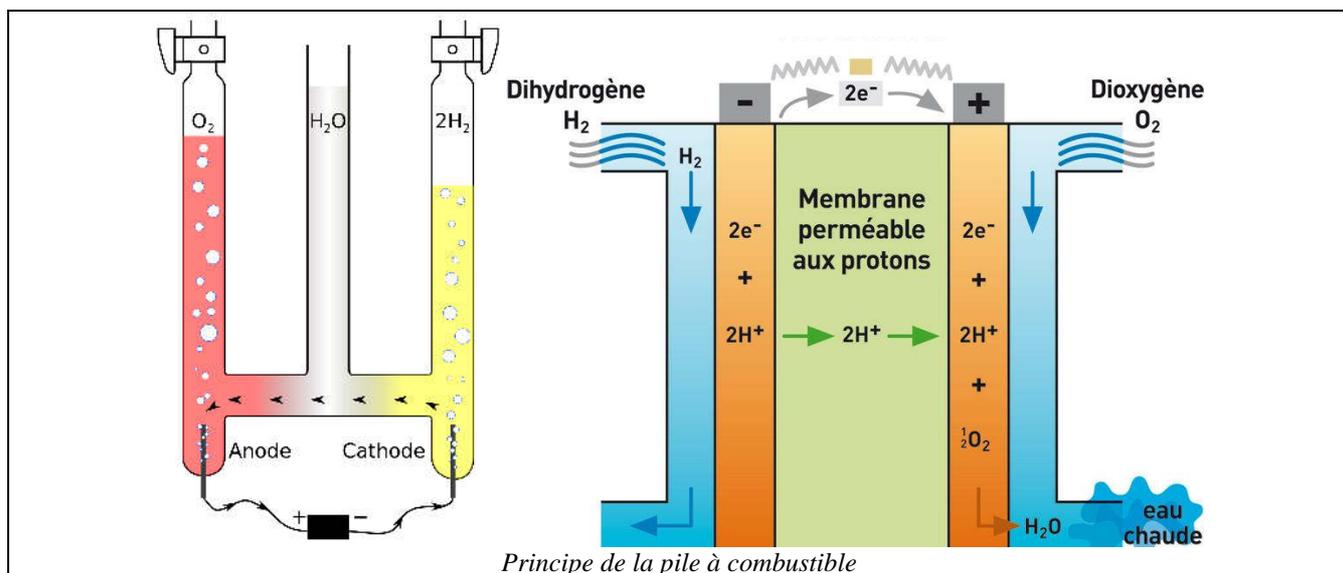
En 1859, **Étienne Lenoir** dépose un « brevet d'un moteur à gaz et à air dilaté », un **moteur à combustion interne** à deux temps qui utilise le **gaz de houille**.

Cependant, dans un moteur à piston, la faible densité du mélange hydrogène-air nécessite des conduits d'admission et des soupapes de grand diamètre et la course sinusoidale du piston crée un pic de pression trop long au point mort haut pour permettre un fonctionnement en détonation. Le moteur rotatif de Mazda conviendrait mieux à l'utilisation de l'hydrogène que le moteur à piston.

Néanmoins, l'usage d'un moteur thermique n'est pas une excellente solution, car seulement moins de 30% environ de l'énergie stockée est transformée en énergie mécanique.

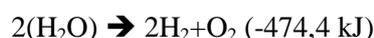
2. 2. 2. La pile à combustible

La pile à combustible produit de l'électricité et non pas un mouvement mécanique.



Notons que l'hydrogène n'est pas le seul composé apte à être utilisé dans une pile à combustible, bien qu'on les associe souvent.

La réaction avec de l'hydrogène produit seulement de l'eau.



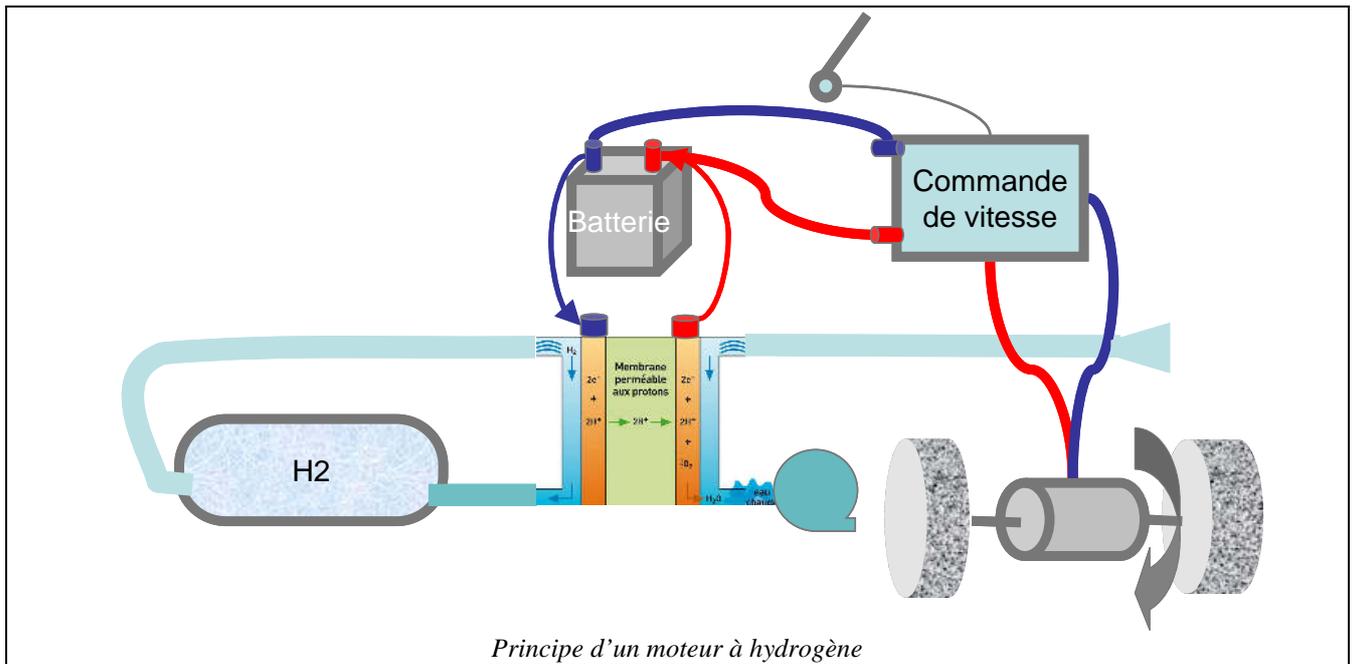
Le méthanol peut aussi être utilisé (*Direct-Méthanol Fuel Cell*) selon une expérience menée à la Nasa.

Une pile expérimentale au Méthane a également été expérimentée à Harvard. Elle fonctionne à 120°.

La pile à combustible nécessite un catalyseur pour provoquer la réaction. Aujourd'hui le catalyseur est du platine, éventuellement fabriqué avec une nanotechnologie, pour en diminuer la quantité.

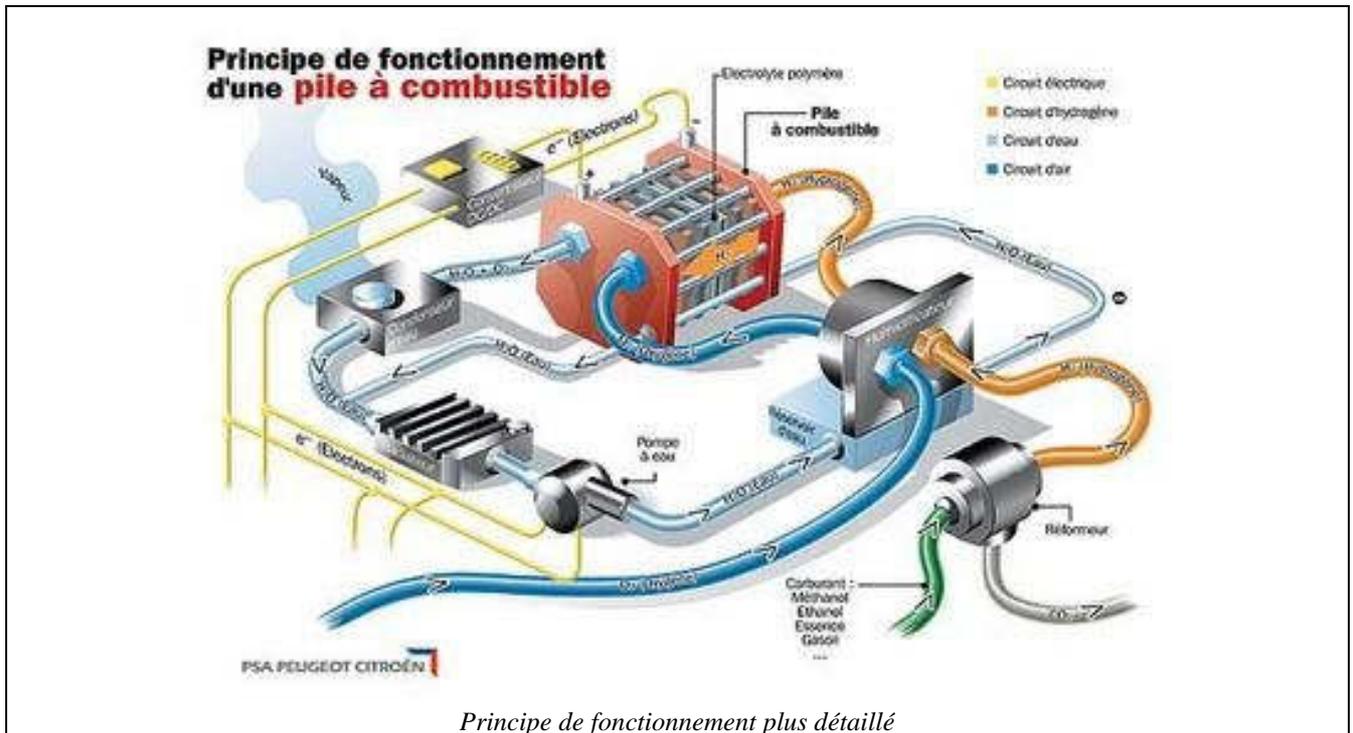
2. 2. 3. Le moteur à hydrogène

Ce qui est couramment appelé « moteur à hydrogène » est en réalité un ensemble pile à combustible associée à un moteur électrique. En effet, la puissance d'une voiture est très variable. La pile à combustible fournit une puissance moyenne constante, qui recharge la batterie tandis que le moteur électrique fournit la puissance variable demandée à la mécanique qui actionne les roues.



2. 2. 4. Le faible rendement de la pile à hydrogène

Une pile à hydrogène peut atteindre 50 à 60 % plus si l'on savait récupérer la chaleur dégagée⁸). Mais les rendements énergétiques cumulés de la synthèse du dihydrogène (50%) et de la compression ou liquéfaction sont encore assez faibles (globalement, de l'ordre de 30%, c'est-à-dire pas mieux que le rendement des moteurs thermiques).





2. 2. 5. Les difficultés du stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est le plus volatile des éléments. Il est donc difficile à stocker dans des réservoirs étanches. Il nécessite également un important volume de stockage. Il faut **11,2 m³ pour stocker 1 kg d'hydrogène à pression normale**. Il est liquide à très basse température (-253°C = 20°K). A température ordinaire, il est liquide sous 800 bars de pression, avec une masse volumique de 71g/l, soit 200 litres pour stocker 15kg, susceptibles de fournir l'équivalent énergétique de 60 litres d'essence. Les conditions de stockage peuvent également présenter des risques de fuite et donc d'explosion, pour un stationnement en sous-sol. Également les réservoirs doivent pouvoir résister non seulement à une pression élevée, mais aussi résister aux chocs en cas d'accident. C'est certainement un problème à vérifier pour l'usage ferroviaire.

2. 2. 6. Le coût élevé de fabrication

Comme l'indique les études mentionnées ci-après, le coût de production de l'hydrogène est élevé, que son origine soit l'électrolyse ou le procédé dit SMR. Le coût de production de l'hydrogène électrolytique est d'environ 4€ / kg. Soit près de **10 fois le coût du pétrole raffiné** ! Certes, aujourd'hui, la TICPE et la TVA charge le coût de l'essence de 180%. A ce jour, il convient de n'utiliser que **de l'énergie excédentaire, donc à un coût marginal faible**.

Pays	Réformage vapeur	Electrolyse
Danemark (Jorgensen et Ropenus, 2008)	2 €	4,6 à 5€
Chine (Yao et al., 2010)	1 \$	1,78 \$
Corée (Gim et Yoon, 2012)	3,56 €	4,23 \$
USA (Bonner, 2013)	0,96 \$	3,8 \$
Allemagne, Espagne, France (Mansilla et al. 2013)	1,5 €	3 à 3,5€

2. 2. 7. L'usage de l'hydrogène pour la mobilité

Un taxi à hydrogène fonctionne à Paris, avec une borne de recharge publique. Les constructeurs (comme Toyota, Hyundai, Mercedes...) annoncent des voitures à hydrogène à partir de 60 000€.

Il existe des vélos à hydrogène. Quel intérêt par rapport à une batterie ?

Après l'Allemagne, la Région Auvergne Rhône Alpes va commander 3 trains SNCF de marque Alstom, à hydrogène pour la ligne Lyon-Clermont, dont une grande partie est dépourvue de caténaires. L'intérêt est symbolique, pour diminuer les émissions de CO₂. Pour un train, le surcoût d'une motorisation à hydrogène et son entretien et l'approvisionnement en combustible sont techniquement et économiquement plus justifiable que pour une voiture. Espérons que ce train restera à l'abri d'un accident ferroviaire.

2. 2. 8. Avantages et inconvénients de l'hydrogène

Avantages	Inconvénients
L'intérêt de la pile à combustible est qu'elle n'émet pas de CO ₂ , à la condition que l'hydrogène soit fabriqué sans émission de CO ₂ , c'est-à-dire avec de l'électricité hydraulique, nucléaire, éolienne ou solaire. Cette condition est réalisée en France, en Norvège, en Suède et en Suisse, mais pas dans d'autres pays étrangers où elle est produite en grande partie du charbon.	La technologie des piles à combustibles est récente.
	Un problème majeur est le coût du platine comme catalyseur et sa rareté sur terre. Les progrès sont en cours pour en diminuer la quantité en l'utilisant sous forme de nano-éléments. De plus, ce catalyseur supporte mal les impuretés dans les gaz hydrogène et air. Il doit être remplacé. Des progrès sont espérés dans l'utilisation d'un catalyseur qui ne soit pas aussi rare.
	Un second problème est le coût de la pile . En 2019, les véhicules à pile coûtent environ 20 000€ de plus qu'une voiture thermique.
	La longévité d'une pile à combustible est faible : 1 000 à 3 000 heures. Il faudrait multiplier sa longévité par 10.
	Le rendement de récupération d'énergie via l'électrolyse et la pile est faible (30%).
	Une pile ne fonctionne qu'entre 0° et 50°
L'hydrogène est léger et énergétique.	Le stockage de l'hydrogène en réservoir est moins sûr que celui de l'essence, plus volumineux.
Son coût de stockage sur une longue durée est faible.	Le coût d'obtention de l'hydrogène est 3 fois plus élevé que celui de l'essence à énergie égale, mais va baisser.
	Le réseau de distribution actuel est encore inexistant

2. 2. 9. Conclusion sur l'hydrogène :

L'utilisation intéressante de l'hydrogène comme carburant impliquera des progrès techniques qui rendront probablement des décennies.

Son usage pour stocker l'énergie est en concurrence avec la progression des batteries.

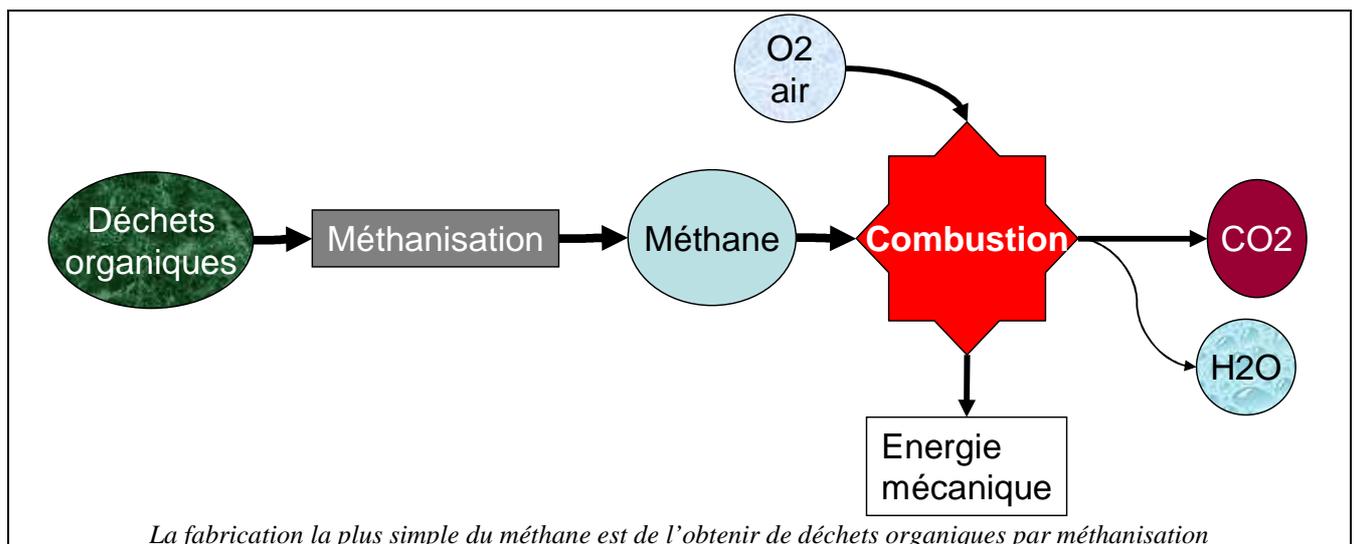
Le stockage d'énergie est à comparer au stockage d'énergie avec une batterie, dont le rendement est excellent (>90%), mais dont le coût de stockage croît avec la quantité d'énergie à stocker et à leur poids, handicap pour une utilisation dans un véhicule. L'hydrogène a un coût de stockage faible et un faible poids.



Le futur train à hydrogène Lyon Clermont-Ferrand

3 Le BioGNV comme carburant

3.1 Rappel du cycle de fabrication et d'utilisation



3.2 La méthanisation

La méthanisation est la dégradation de la matière organique par des micro-organismes en milieu anaérobique contrôlé.

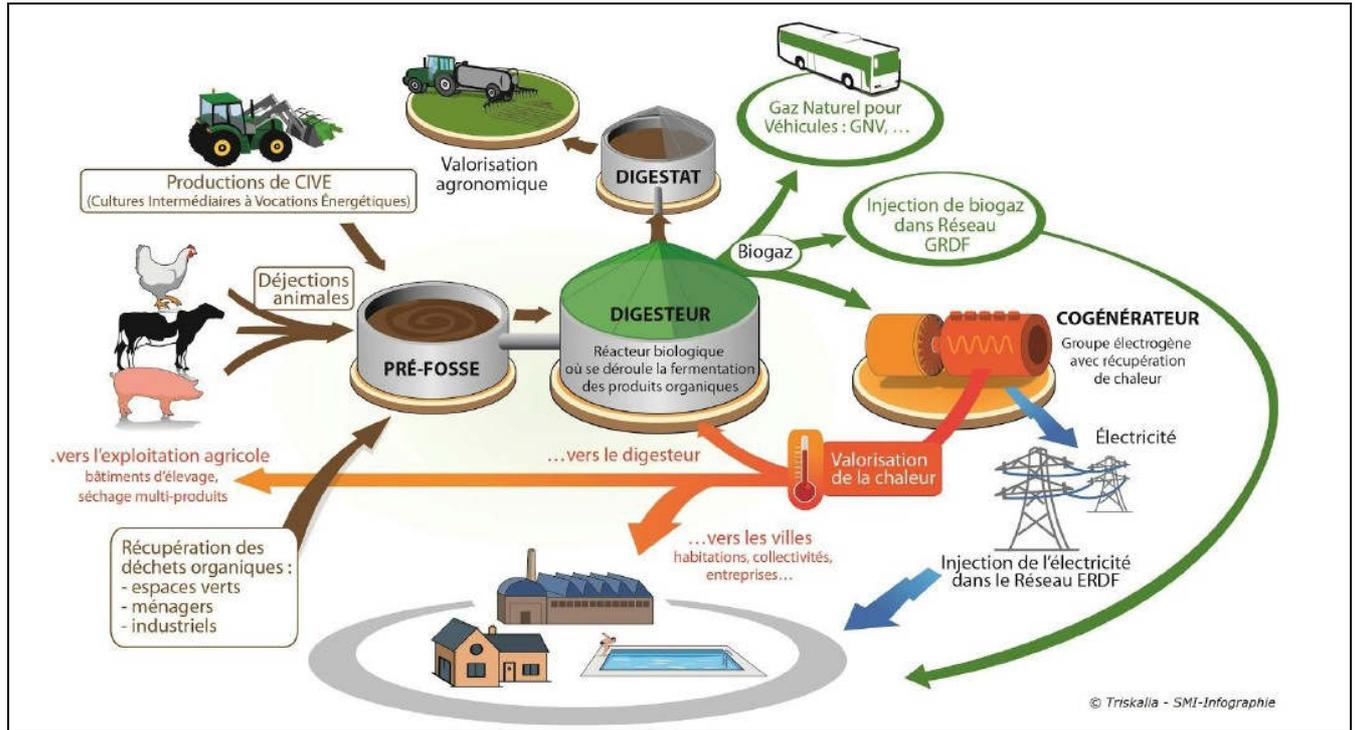
Elle délivre à la sortie du digesteur :

- ⇒ un mélange gazeux saturé en eau, qui nécessite une purification, car il est composé de :
 - environ 50 % à 70 % de méthane (CH₄),
 - 20 % à 50 % de gaz carbonique (CO₂) et
 - quelques gaz traces (NH₃, N₂, H₂S) ;

⇒ le digestat humide, riche en matière organique, partiellement stabilisé, souvent retourné au sol après une maturation éventuelle par compostage.

Quatre sources peuvent utiliser cette technique :

- ⇒ l'agriculture (lisier, bouses, déchets verts, paille),
- ⇒ l'industrie (agro-alimentaires...),
- ⇒ le traitement des déchets ménagers,
- ⇒ Les stations d'épuration (STEP), à partir de leurs boues (Reventin, la Feysine, Pierre Bénite...).

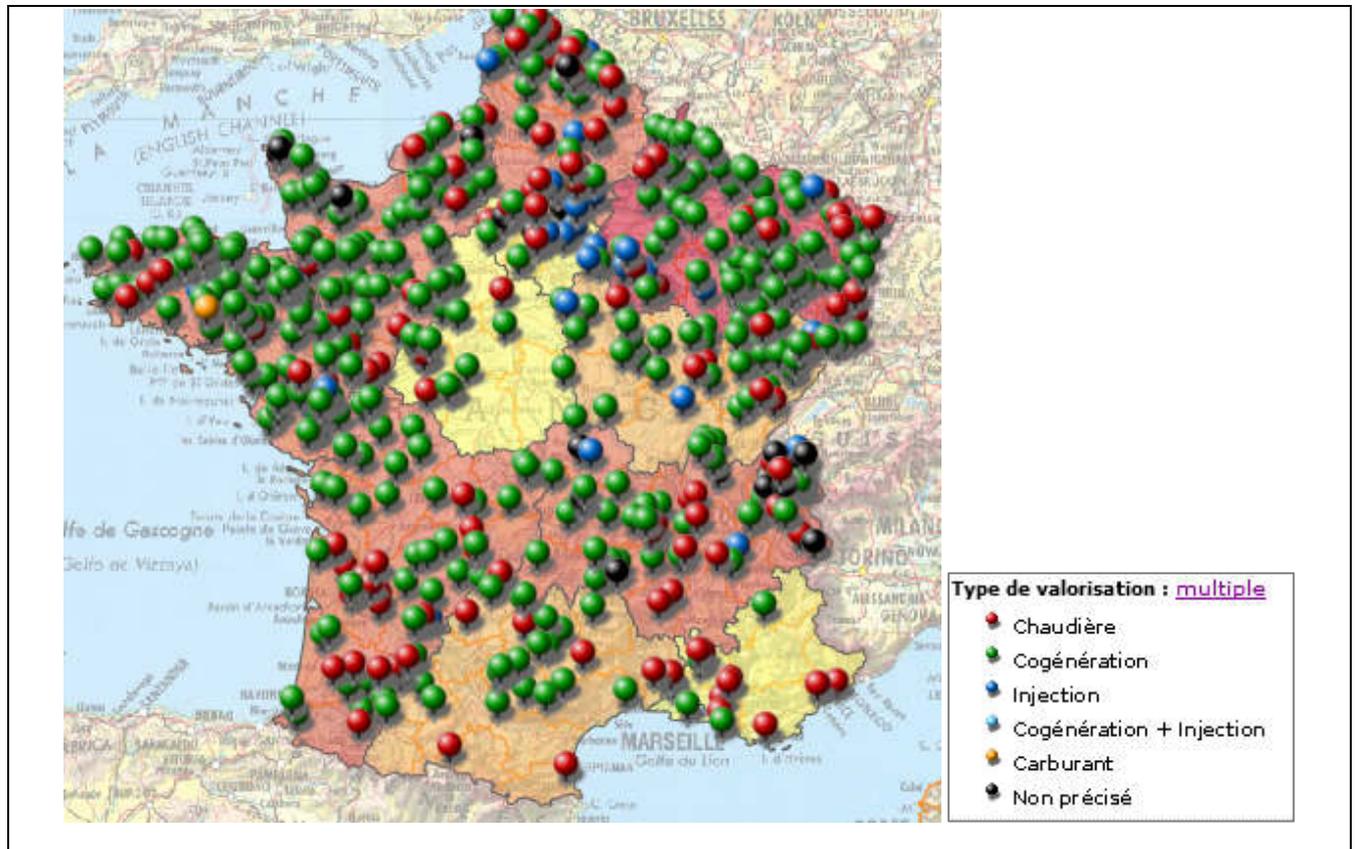


3.3 Utilisation du méthane

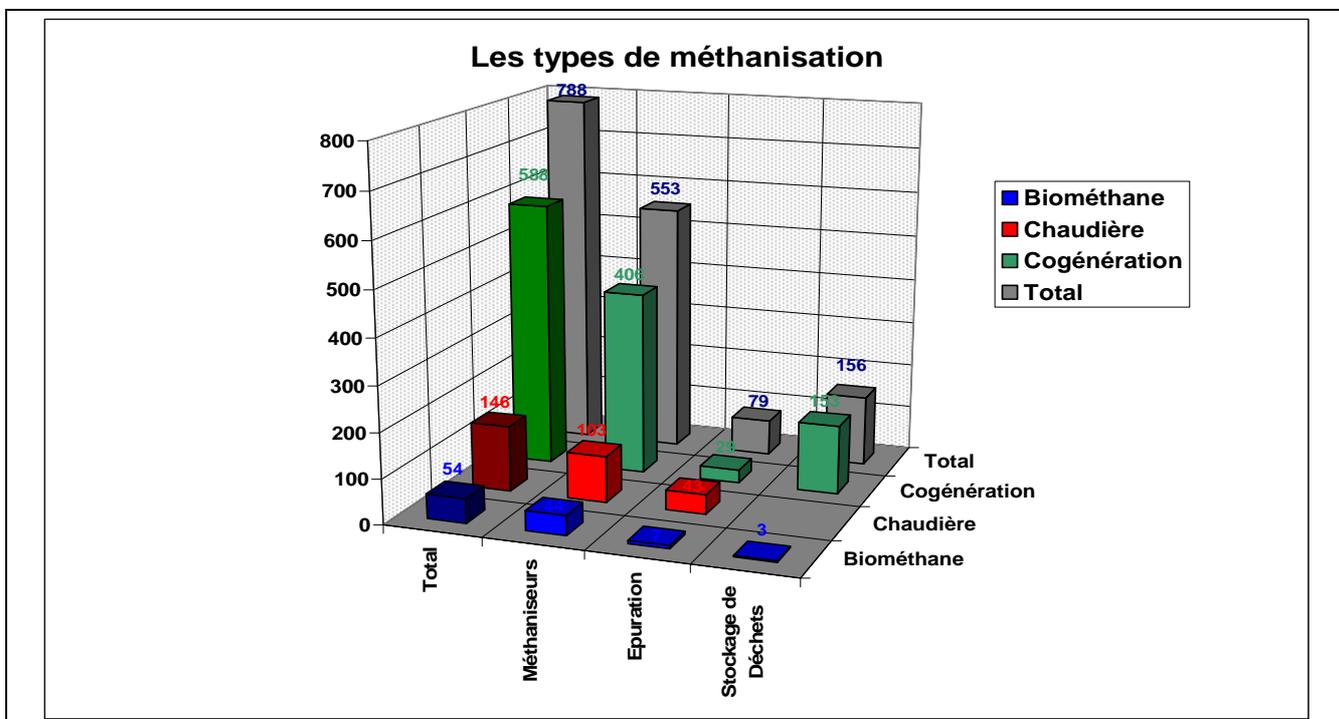
Le méthane est utilisable comme carburant, pour produire de l'électricité et de la chaleur, par :

- ⇒ cogénération associée à la méthanisation ou
- ⇒ injection dans le réseau de gaz naturel après épuration (Bio-méthane).

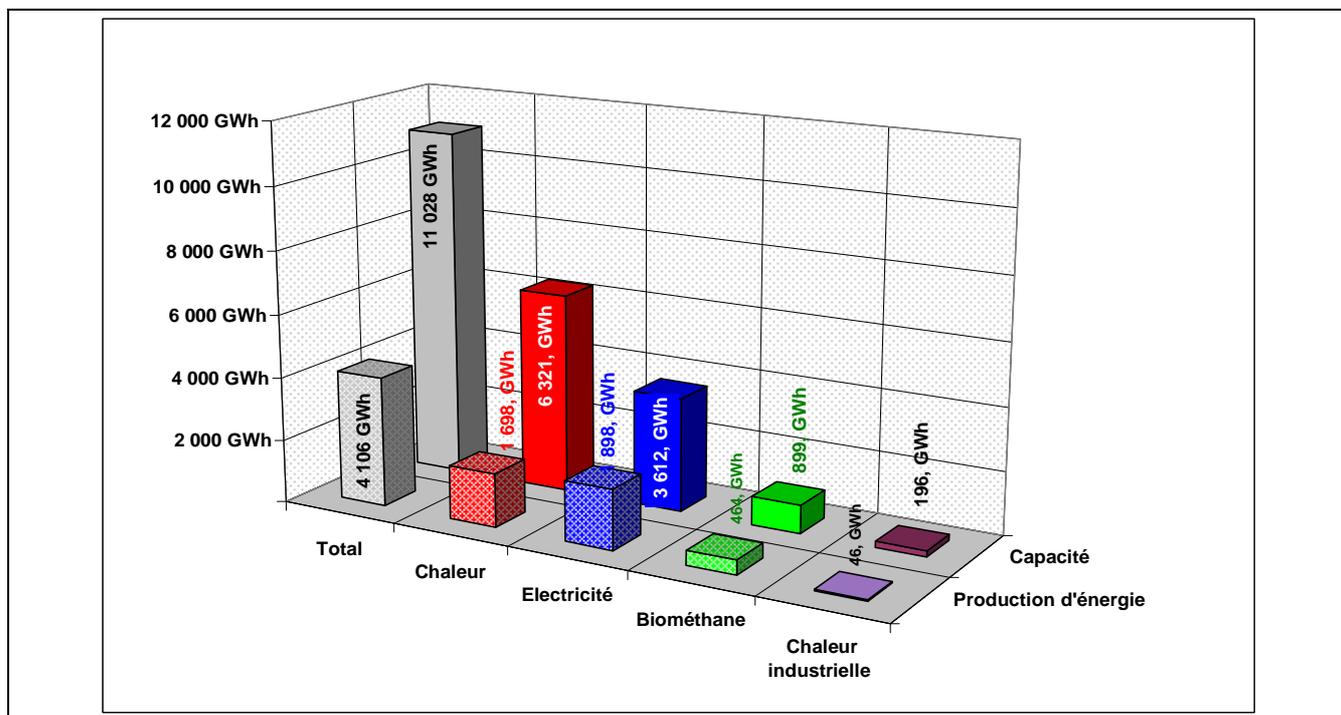
En France un nombre important de petites installations est réparti sur l'ensemble du territoire agricole.



	Total	Chaleur	Electricité	Biométhane	Chaleur industrielle
Production d'énergie	4 106 GWh	1 698, GWh	1 898, GWh	464, GWh	46, GWh
Capacité	11 028 GWh	6 321, GWh	3 612, GWh	899, GWh	196, GWh
Puissance	1,26 GW	0,72 GW	0,41 GW	0,1 GW	0,02 GW
Facteur de charge	37,23%	26,86%	52,55%	51,61%	23,47%



On constate que la puissance électrique disponible en électricité reste très limitée : 0,43 GW soit 0,3% de la puissance installée française. Les installations sont utilisées à moins de 50% de leur puissance nominale.



En 2019, on a 84 unités raccordées au réseau (Sia Partners) qui produisent seulement 0,3% de la consommation de gaz naturel française (489TWh), essentiellement en Ile de France, Grand Est, Hauts de France, Bretagne.

Les installations se développent. On a 660 dossiers en cours d'instruction pour 14 à 19 TWh/an.

En Europe, la France est :

⇒ 4ème en nombre d'installations et

⇒ 6ème en production, loin derrière l'Allemagne et la Grande Bretagne.

L'objectif 2030 est ambitieux : 7% de la consommation de gaz naturel (projet PPE).

A noter cependant que les installations ne sont utilisées qu'à 40% de leur production nominale et à doivent veiller à la continuité de la production qui est dépendante de la continuité d'approvisionnement et donc de l'absence d'incidents agricoles non maîtrisés (grippe porcine, aviaire...).

3.4 Le coût complet de production du bio-méthane

Le coût du bio-méthane est de l'ordre de 2 fois plus cher que le gaz naturel (Enea Energy Committed) ou des carburants pétroliers.

Hors subvention ou taxes, le coût de l'énergie au biogaz est de 9,4c€ à 12,2c€/kWh (hors subvention), soit entre le double et le triple du coût moyen de l'énergie hydraulique par exemple. On peut espérer une diminution à 06,5c€ à 8,5€ /kWh à horizon 2025 à 2030.

Le surcoût est financé par la CSPE (Contribution Sociale sur la Production d'Énergie). Ce surcoût reste acceptable temporairement pour lancer son utilisation. Il coûte au moins 3 à 5 fois moins que le financement du photovoltaïque.

Pour son usage par les poids lourds, le bioGNV n'est compétitif que si sa fiscalité est plus favorable que celle du diesel.

Le biogaz bénéficie bien d'une fiscalité favorable, mais instable.

En 2016, la Loi de finance rectificative exonère les véhicules GNV pendant 2 ans de la TVS (Taxe sur les véhicules de société).

Depuis 2016, une moindre hausse du taux de TICPE appliqué au GNV/bioGNV, entraînant des économies à la pompe de l'ordre de 2% du prix du carburant.

Depuis 2017 le biogaz est exonéré de la TICGNV pour le bio-méthane injecté. Il y a eu élargissement du sur-amortissement des poids lourds de 3,5 tonnes et plus, permettant ainsi d'accélérer l'acquisition des véhicules roulant au GNV, en assurant une couverture jusqu'à 50% du surcoût du véhicule comparé au véhicule diesel équivalent. Cet avantage a été prolongé en 2018, jusqu'au 31/12/2019.

Le régime fiscal des véhicules circulant au gazole été élargi aux véhicules professionnels routiers de transport de marchandises circulant au gaz naturel.

3.5 Transport et stockage

Le méthane est transporté par navires (méthaniers) à une température de -163° C et à une pression voisine de la pression atmosphérique, dans des réservoirs construits sur le principe de la "bouteille thermos". A plus faible quantité il se transporte habituellement à l'état liquide (GNL) dans des cylindres d'acier sous 200 bars de pression (par exemple : Méthane 2.5 B50 de 50 l soit 13 m3).

3.6 Avantages et inconvénients de la méthanisation

Avantages de la méthanisation	Contraintes de la méthanisation
<p>La valorisation de la matière organique</p> <p>La diminution de la pollution agricole.</p> <p>La diminution d'autres filières de traitement des déchets organiques.</p> <p>L'obtention agricole de carburant remplaçant des carburants fossiles pour diminuer les émissions de GES.</p> <p>L'obtention d'engrais naturels remplaçant les engrais chimiques.</p> <p>Le traitement possible des déchets organiques gras ou très humides, non « compostables » en l'état.</p> <p>La limitation des odeurs du fait de la clôture hermétique du digesteur et du bâtiment de traitement d'air.</p>	<p>La disponibilité de déchets sur la durée.</p> <p>L'investissement dans l'installation.</p> <p>La pérennité des débouchés de la valorisation agronomique du digestat.</p> <p>Attention aux fuites de méthane.</p> <p>La complétude du traitement <i>si mise en marché aux normes NF U 44-051/095</i> :</p> <p>⇒ des excédents hydriques du process <i>pour les grosses installations,</i></p> <p>⇒ finalisation de la maturation du digestat, <i>déshumidification, etc.</i></p> <p>⇒ de valorisation énergétique du biogaz :</p> <p>- <i>par cogénération,</i></p> <p>- <i>par injection dans le réseau de gaz naturel ;</i></p> <p>⇒ de compostage des déchets ligneux</p>

3.7 Avantages et inconvénients du bioGNV pour la mobilité

Avantage du BioGNV	Inconvénients du BIO-GNV
Fabriqué par l'agriculture.	La disponibilité des déchets fermentable restera limitée.
Assez facile à produire.	Implique des moteurs adaptés
Écologiquement proche de la neutralité carbone.	Réseau de distribution actuel insuffisant
Économiquement acceptable temporairement	Difficile à stocker liquide, sous pression
Acceptable économiquement tant qu'il est peu taxé, comme actuellement	Demande de grands réservoirs

4 Les agro-carburants liquides

4.1 Liste des agrocarburants liquides

C'est l'ensemble des produits issus majoritairement de l'agriculture qui peuvent être mélangés ou qui peuvent se substituer à l'essence ou au diesel.

Nous étudierons :

- ⇒ le méthanol,
- ⇒ l'éthanol,
- ⇒ l'isobutène,
- ⇒ le biodiesel (Agro-gazole).

4.2 Potentiel de production des agro-carburants

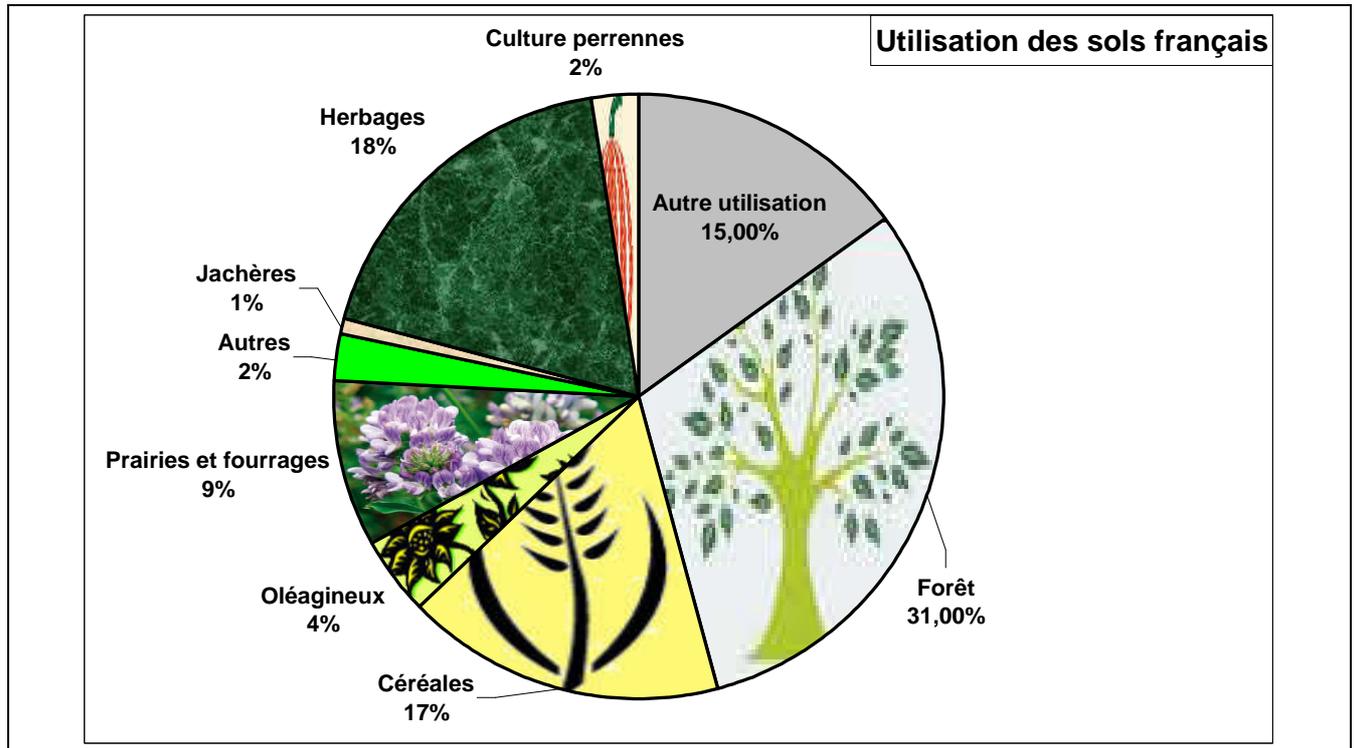
Certains peuvent être obtenus en éliminant du CO₂ par hydrogénation.

Il s'agit aussi d'un procédé de stockage d'énergie, qui implique que l'on ait disposé préalablement d'un excédent d'énergie électrique pour fabriquer de l'hydrogène.

A partir de résidus agricoles, voire de cultures, divers procédés sont utilisés pour fabriquer des agro-carburants, substitués aux carburants fossiles. Les produits générés sont déjà utilisés comme compléments mélangés aux carburants fossiles (essence ou gazole).

Naturellement, dans le cas de cultures, il faut s'interroger sur l'utilisation la plus vertueuse : culture ou forêt, pour servir de puits de carbone.

Le diagramme suivant indique les taux d'utilisation des sols en France.



Le taux de surface forestière est assez élevé en France. Elle compte 12 milliards d'arbres, soit 200 arbres par habitants, ce qui permet d'absorber environ la moitié du CO₂ émis par les Français.

La surface utilisable pour fabriquer les agro-carburants ne pourrait être conquise que sur les jachères (très limitées) et les herbages, ce qui suppose de réduire l'élevage (générateur de viande mais aussi de méthane).

5 Le méthanol

5.1 L'utilité du méthanol comme carburant

Le méthanol pourrait être utilisé comme carburant dans les véhicules, moyennant des moteurs adaptés pour.

Il est utilisé dans les courses aux USA, d'Indy car et de Champ car, suite à un accident survenu à Indianapolis. En effet, le méthanol brûle sans émettre de nuage de fumée (qui supprime la visibilité en cas d'accident) et le feu s'éteint plus facilement avec de l'eau avec laquelle il est miscible. Il est aussi utilisé comme carburant en modélisme.

5.2 L'utilité du méthanol dans les piles à combustible

Essentiellement utilisé dans les piles à combustible (DMFC), basées sur l'oxydation du méthanol sur une couche de catalyseur afin de former du **dioxyde de carbone**.

De l'eau est consommée à l'**anode** et est produite à la **cathode**.

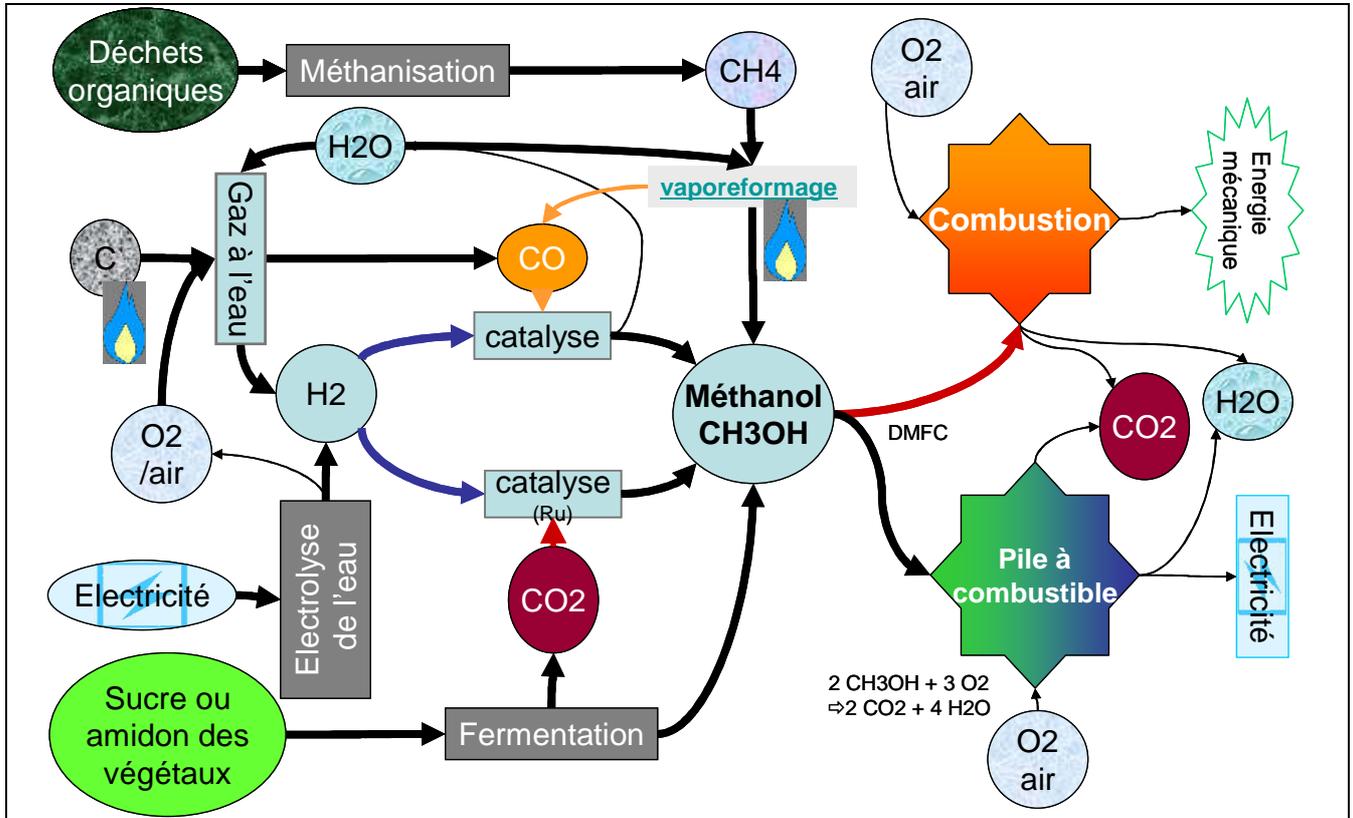


Les **électrons** émis au circuit externe procurent de l'énergie.

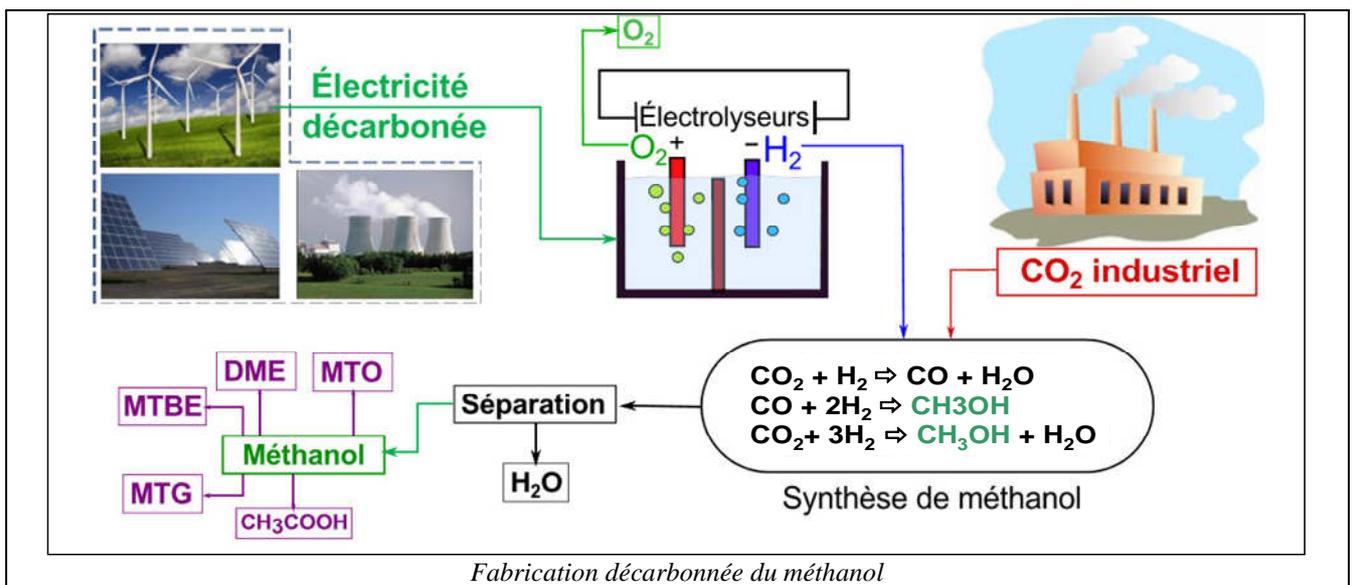
Un des attraits du méthanol liquide est d'être aussi un carburant idéal pour les piles à combustible, plus commode que l'hydrogène, car il permet de les faire fonctionner à température et pression habituelle.

5.3 La production du méthanol

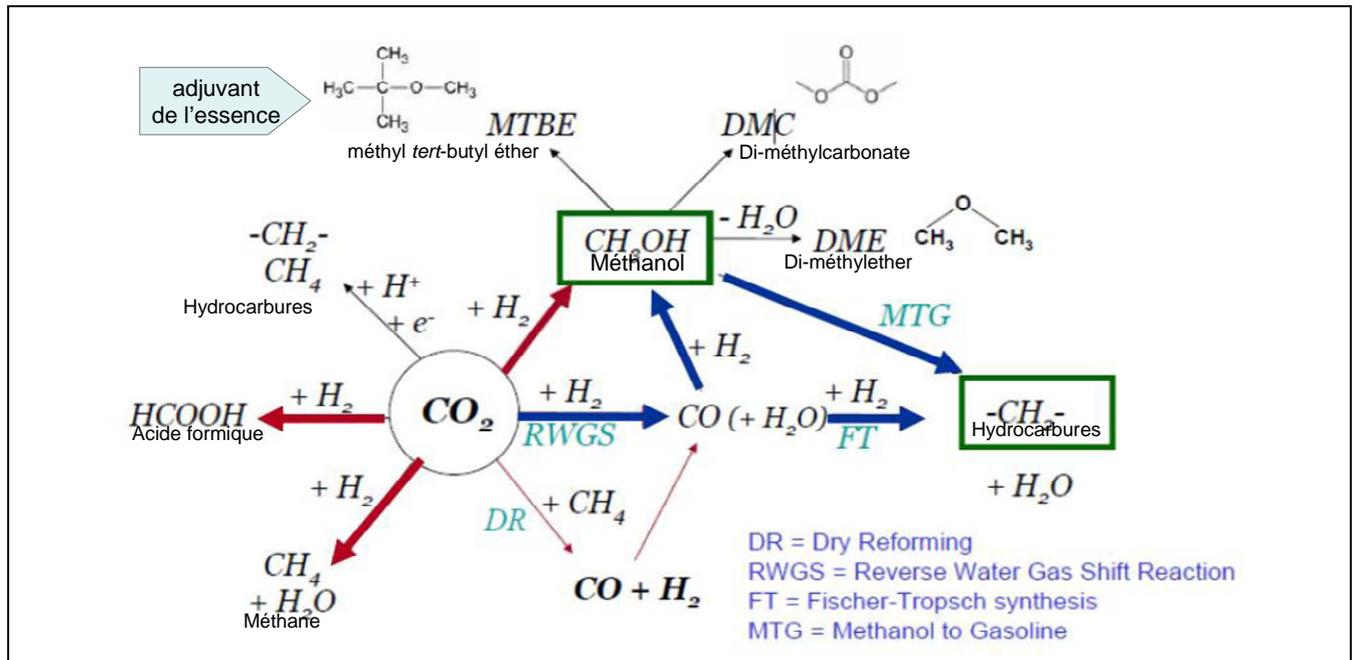
La production du méthanol se fait par des processus industriels relativement complexes, schématisé ci-après. Pour obtenir cet alcool (CH_3OH) le principe est d'incorporer du carbone (C) et de l'oxygène (O) soit à de l'hydrogène (H_2), soit à du méthane (CH_4).



Le processus, pouvant se réaliser à partir du CO_2 industriel, serait utile pour éviter l'émission dans l'atmosphère, à condition toutefois de disposer d'énergie électrique excédentaire et bon marché pour fabriquer de l'hydrogène. Ce pourrait être une solution pour stocker économiquement la production excédentaire des centrales nucléaires en période creuse, des éoliennes ou des panneaux solaires, dont on ne sait souvent pas quoi faire.



Ce procédé écologique de fabrication du méthanol est attractif, notamment par sa capacité à piéger émissions de CO₂ industriel et de stocker de l'énergie facile à utiliser dans une pile à éthanol.



Sera-t-il réservé un avenir au méthanol, grâce à la mise au point de piles à combustible conçues avec un catalyseur plus économique que le platine et aussi de plus grande longévité ?

Par ailleurs, le méthanol permet de fabriquer divers composés organique utiles, dont des hydrocarbures.

Mais en pratique, la fabrication courante du méthanol est loin d'être sobre en émission de CO₂.

Actuellement le méthanol (alcool méthylique) est synthétisé.

Dans le monde, en 2017 :

- ⇒ à 53,4 % à partir du gaz naturel,
- ⇒ à 45,8 % à partir du charbon ou du gaz de cokerie et
- ⇒ à 0,8 % à partir de pétrole.

En Chine, en 2017,

- ⇒ à 89,3 % du charbon ou du gaz de cokerie,
- ⇒ à 10,7 % du gaz naturel.

5. 4 Les inconvénients du méthanol

Avantages du méthanol	3 Inconvénients majeurs
Fabriqué à partir du méthane, permet de capter du CO ₂ .	Il est un oxydant puissant , qui notamment détruit l'alumine protectrice de la surface d'aluminium, ce qui provoque l'oxydation des pièces de moteur en aluminium et des tuyauteries,
Carburant pratique pour les piles à combustibles dans les conditions de température et de pression.	Il est miscible à l'eau , ce qui fait craindre que son usage en tant que carburant finisse par polluer les nappes phréatiques en cas de fuite accidentelle C'est un poison pour le corps humain, qui, outre des effets d'ébriété modérés, attaque le système nerveux et rend aveugle, par destruction du nerf optique, du fait de sa transformation en formaldéhyde. On peut donc craindre la contamination accidentelle des nappes phréatiques

C'est pourquoi, tant qu'il y a du pétrole, hors usages particuliers, l'avenir du méthanol comme combustible thermique pour la mobilité a fort peu de chance de s'imposer.

Il existe en effet d'autres possibilités déjà utilisées, qui ne présentent pas cet inconvénient.

6 L'éthanol

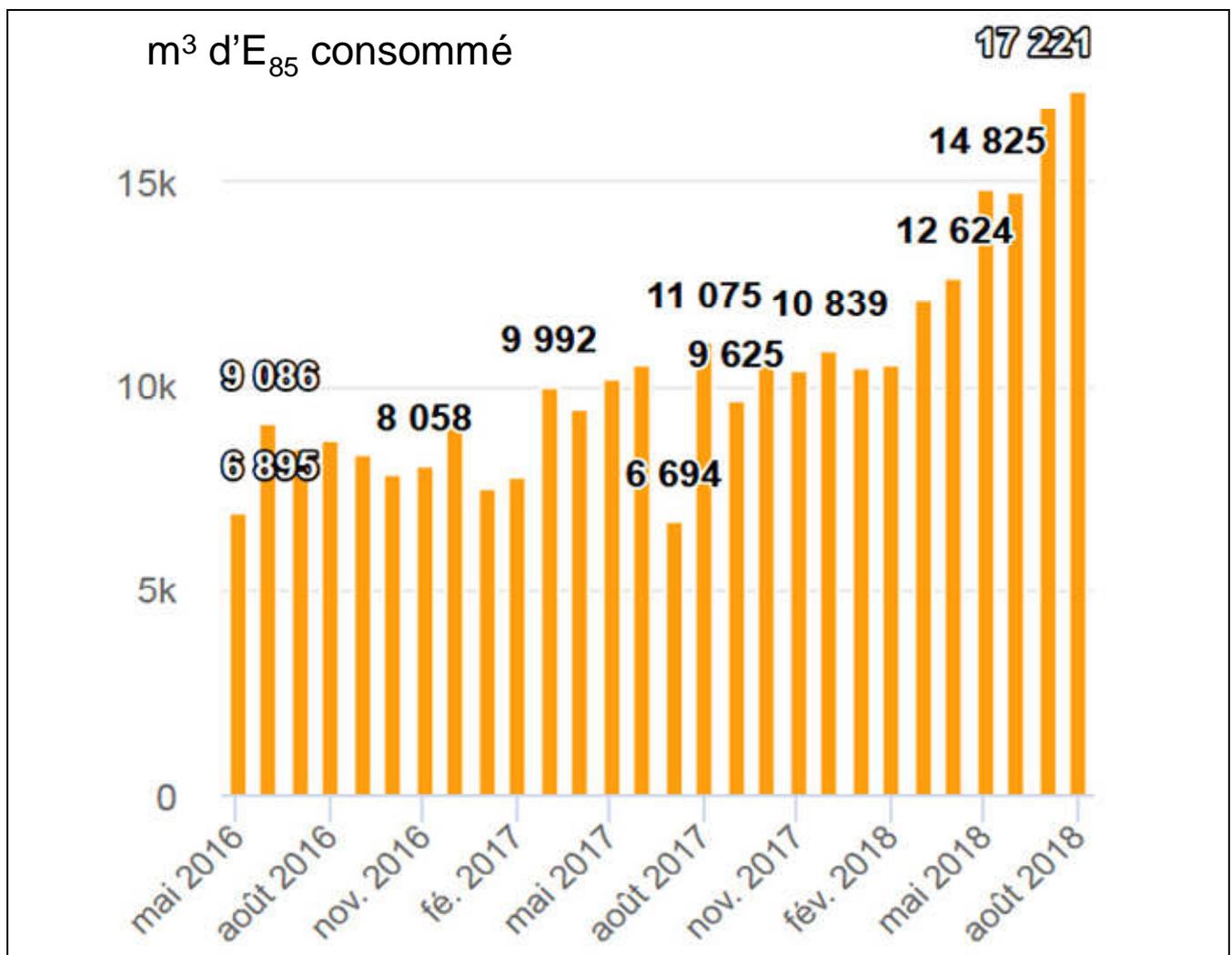
6.1 L'éthanol comme carburant

L'éthanol est un excellent substitut à l'essence. A noter cependant qu'il est plus oxydant que l'essence fossile. En conséquence les moteurs automobiles et notamment les soupapes doivent être prévus pour accepter ce carburant. Les moteurs actuels acceptent 10% d'éthanol (essence E10), moyennant une consommation un peu accrue. Des « kits » sont prévus et agréés pour un certain nombre de modèles pour en accepter d'avantage. . Mais la fourniture doit alors se substituer la garantie conducteur, d'où leur coût (plus de 1000€). Cependant, certains modèles exceptionnels de constructeurs sont multi-fuels (notamment chez Volkswagen). Ces véhicules peuvent accepter des taux importants d'éthanol comme le E₈₅ dosé jusqu'à 85% d'éthanol et qui bénéficie de remises notable de taxes.

Le diagramme suivant indique l'augmentation du volume d'éthanol produit en France. La croissance actuelle est importante.

On pourrait souhaiter que tous les véhicules du commerce acceptent de l'E₈₅.

Le diagramme ci-après montre que l'usage de l'E₈₅ se développe.



Peut-on imaginer que l'usage des agro-carburants se développe encore beaucoup ?

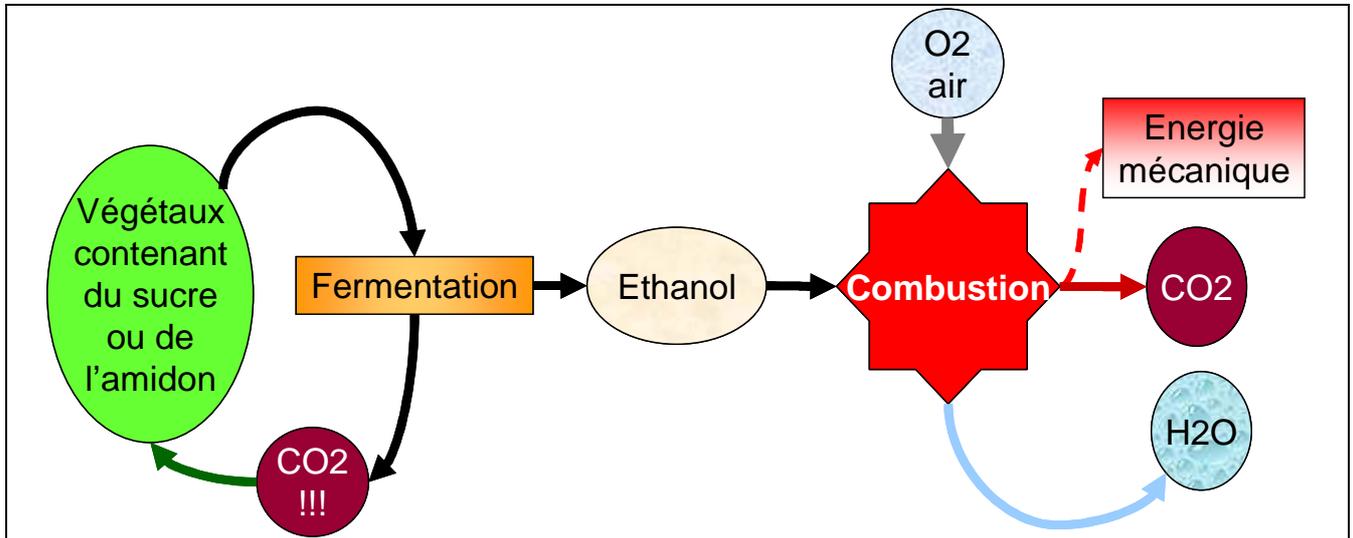
On assisterait alors à 2 phénomènes fâcheux :

- ⇒ la matière première nécessaire à la production de carburants serait loin d'être suffisante,
- ⇒ la taxation favorable de l'E₈₅ sera vraisemblablement supprimée bien avant sa généralisation.

Bien que très intéressante, l'utilisation des déchets agricoles pour produire l'éthanol mixé aux carburants restera probablement marginale, car leur disponibilité sera insuffisante pour en généraliser l'usage bien au delà des taux actuels.

6. 2 Production de l'éthanol

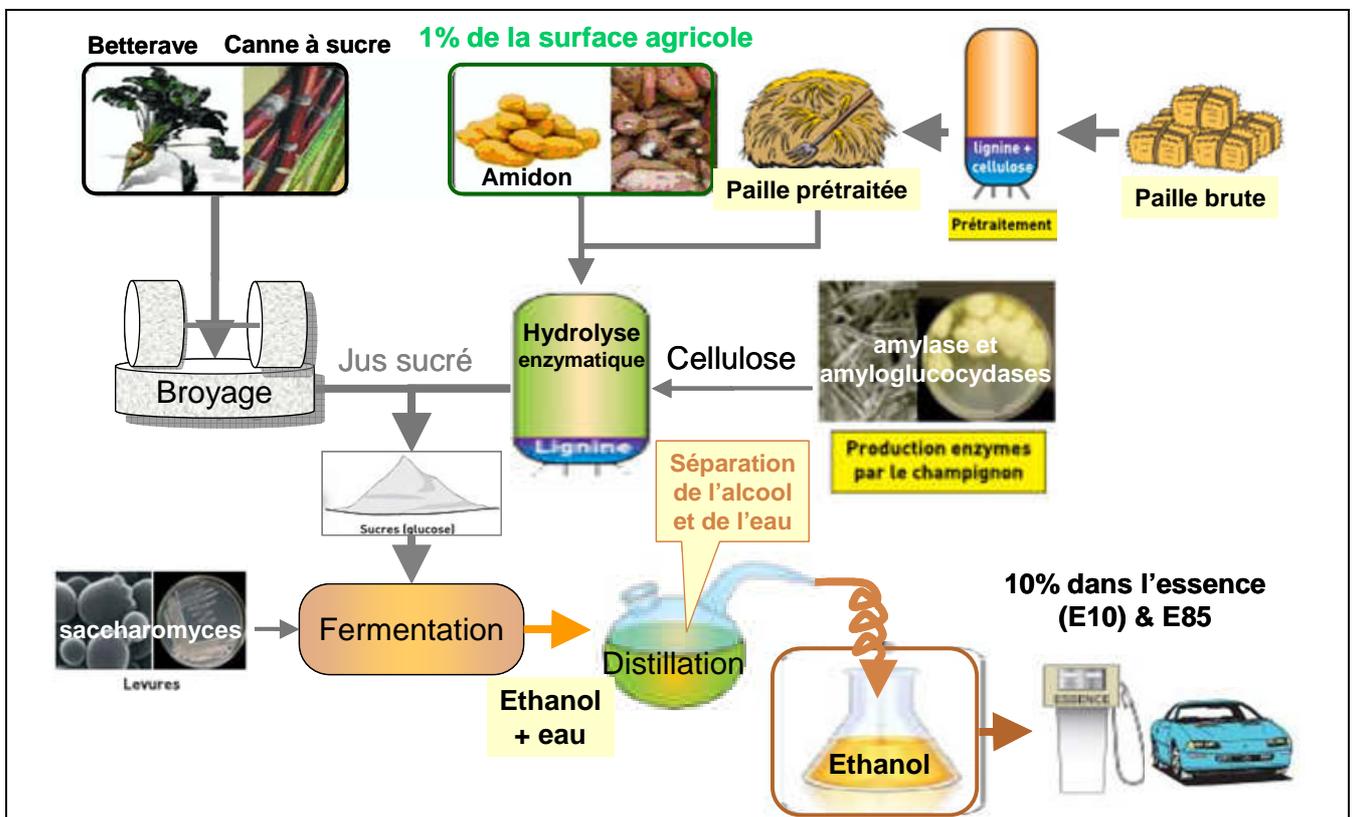
La fabrication de l'éthanol peut se faire par des voies naturelles simples et ancestrales, par fermentation. C'est notamment ce qui permet de fabriquer du vin à partir du raisin.



On note cependant que la fermentation naturelle produit du CO_2 . Pour viser un processus écologique, il faudrait prévoir le réutiliser.

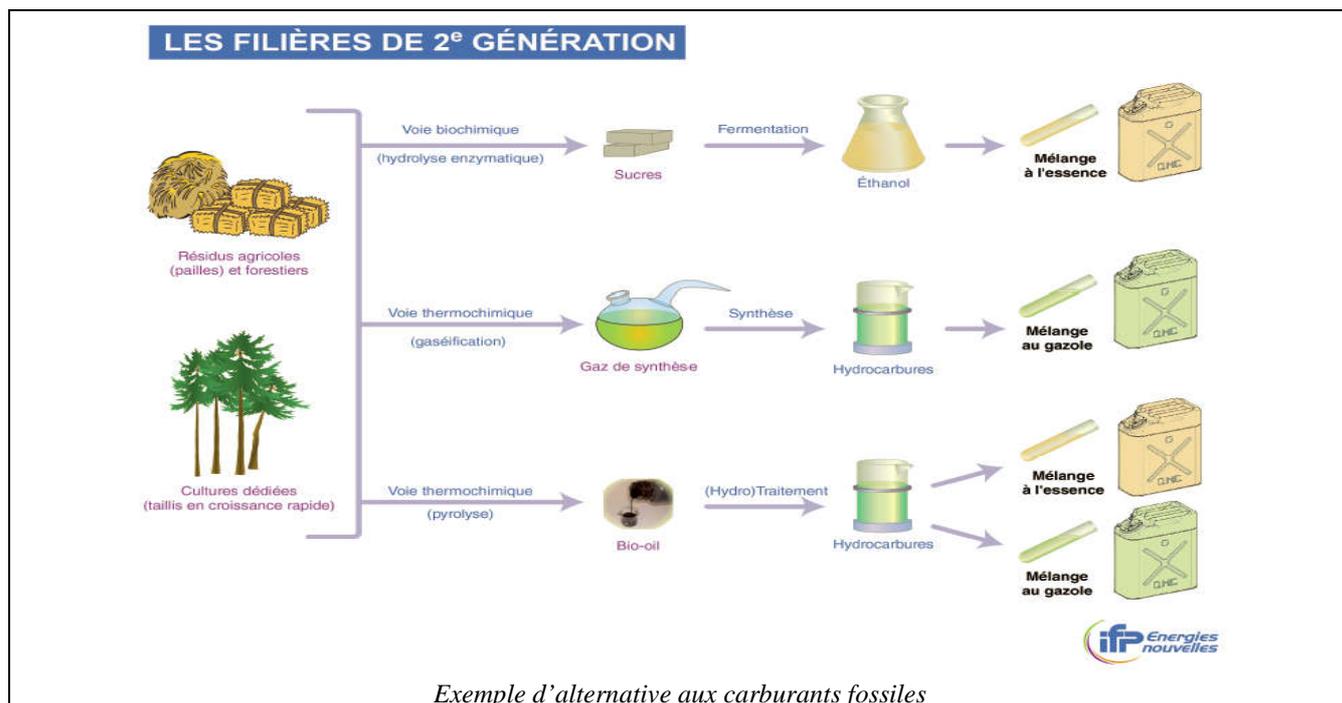
Par ailleurs la combustion de l'éthanol génère également du CO_2 .

Le processus détaillé de fabrication est schématisé ci-après.



6.3 Les procédés de fabrication de 2nde génération

Le schéma suivant indique les diverses utilisation de ces agro-carburants.



6.4 Les procédés de fabrication de 3^{ème} génération

La fabrication de carburants peut être obtenue à partir de **micro-algues**, donc sur une surface réduite, en impactant moins la Surface Agricole Utile (SAU). Les micro-algues sont aptes à synthétiser huiles, sucres et hydrogène pouvant servir à la 3^{ème} génération de biocarburants. Pour pousser, ces micro-organismes ne requièrent que de la lumière et du CO₂, voire de l'azote ou d'autres additifs peu coûteux.

Le procédé en est au stade de recherche au CEA.

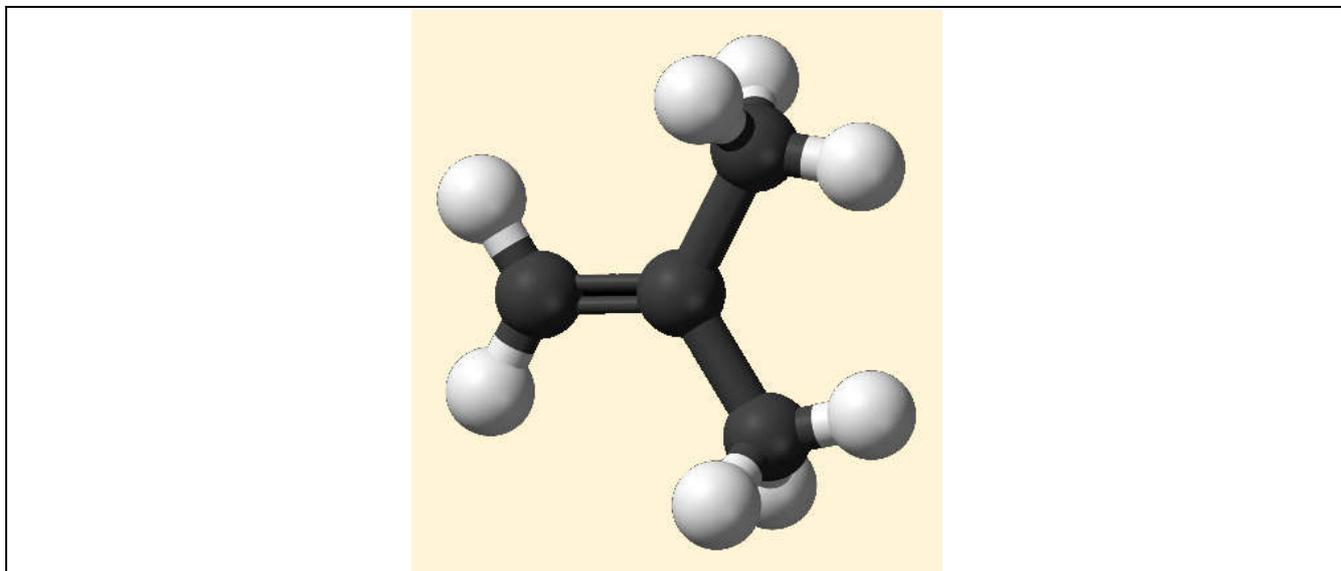
6.5 Avantages et inconvénients de l'éthanol

Avantages	Inconvénients
E10 = 10% dans l'essence	~1.000 stations /11.000 +40/mois
E85 = 85% dans l'essence	Carence possible de matière première
Tarif avantageux = 69 c€ en 2018 Pour les entreprises, exonération de 50 à 100% de la taxe proportionnelle sur les cartes grises (selon la région).	L'incertitude sur la taxation future
Pour les véhicules FlexFuel (émettant moins de 250 gCO ₂ /km) exonération de malus grâce à un abattement de 40% sur les émissions de CO ₂	Décapant et s'imbibe d'eau, nécessite un moteur adapté (soupapes inox).
Pour les entreprises : ⇒ exonération de 50 à 100% (selon la région) de la taxe proportionnelle sur les cartes grises, ⇒ Amortissement exceptionnel sur 12 mois (au lieu de 5 ans), ⇒ Récupération à 80% de TVA sur le E ₈₅ .	Il faut un microprogramme adapté FlexFuel ou biomotor dans un boîtier éthanol homologué sur 30 000 véhicules en 2018 + une garantie moteur +1000 € Le CO ₂ généré à la fermentation

7 L'isobutène pour fabriquer de l'essence

7.1 L'isobutène

L'isobutène, également appelé **isobutylène** (ou **2-méthylpropène** selon sa dénomination UICPA), est le composé chimique de formule $H_2C=C(CH_3)_2$. Il s'agit d'un alcène ramifié à 4 atomes de carbone qui se présente sous forme d'un gaz incolore inflammable aux conditions normales de température et de pression.



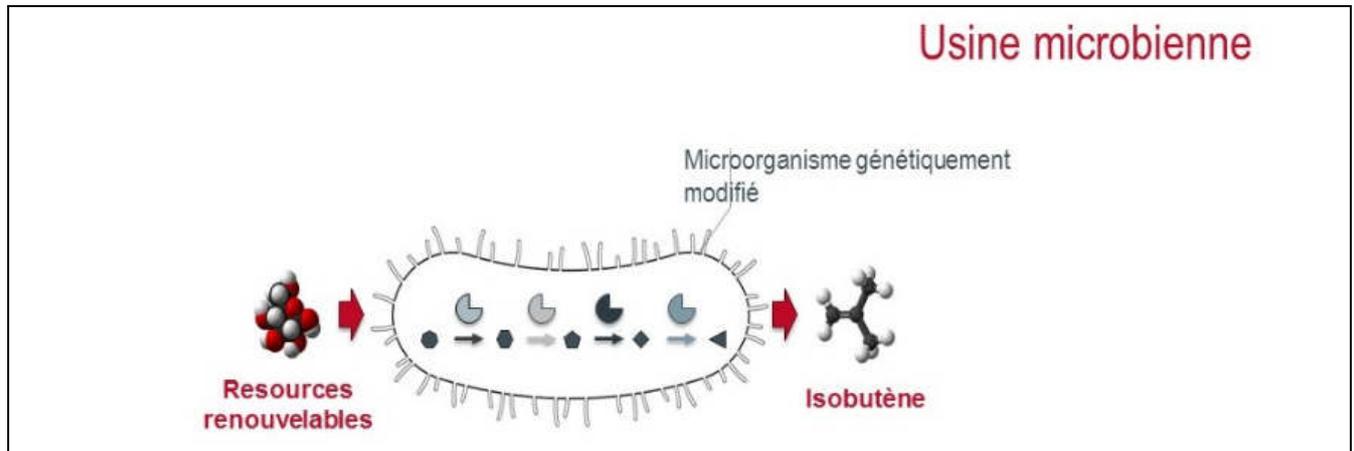
7.2 Intérêt de l'isobutène

L'intérêt de l'isobutène est de pouvoir servir de matière première pour générer d'autres composés chimiques, dont de l'essence, qui pourrait représenter son débouché potentiel principal (de 1000 G€).



7.3 Synthèse de l'isobutène

L'isobutène peut être obtenu par voie enzymatique à partir de sucres provenant d'hydrolysat de paille de blé. Cette fabrication en est au stade de développement en Allemagne (par Global Energie).



Selon Wikipédia, en France, Global Bioenergies, entreprise implantée dans le Génopole d'Évry (Essonne), a annoncé le 6 octobre 2010 avoir fabriqué des OGM capables de synthétiser de l'iso-butène à partir de glucose. Il s'agirait, selon les responsables de cette société, de bactéries équipées d'un matériel enzymatique artificiel développé par génie génétique et cultivées dans un pilote industriel depuis mai 2015, l'entreprise annonce une production d'une tonne de bio-isobutène pour 3,84 tonnes de sucres.

La société dispose en 2016 d'un pilote de production d'isobutène biosourcé situé à Bazancourt-Pomacle, annonce maîtriser depuis 2015 la bio-fermentation de xylose (sucre issu du bois) même en présence d'impuretés, et elle a conclu en septembre 2016 un partenariat de développement d'une filière de carburant d'origine forestière en Suède.

Début 2016, l'entreprise a annoncé vouloir, avec le néozélandais *LanzaTech*, produire de l'isobutène comme carburant liquide à partir de matières premières non agricoles et déchets organiques

8 Les oléagineux pour produire du biodiesel

8.1 Utilisation d'oléagineux

Il est possible de fabriquer du carburant semblable au diesel à partir d'oléagineux :

- ⇒ Esters méthyliques d'acides gras (FAME),
- ⇒ Oléo 100 à partir d'huile de colza (FAME) homologué B100, commercialisé au prix du Gazole (groupe Avril),
- ⇒ Huiles végétales hydrogénées (HVO) qui génèrent des hydrocarbures.

8.2 Obtention des oléagineux

Les esters méthyliques d'acides gras (FAME) sont obtenus par transestérification des huiles.

Pour fabriquer l'Oléo100, 1hectare de colza génère 1000 l. d'huile + 2 t. de tourteau + 100 kg de glycérine.

8.3 Potentiel de production du biodiesel

La France consomme actuellement environ =33 Mt/an de gazole

Huiles végétales usagées = 150 000t/an

Graisses animales valorisées en biodiesel = 144 000t/an (SIFCO 2017)

Le biodiesel ne peut donc être qu'une solution d'appoint au vu de la disponibilité de la ressource (huiles usagées, graisses animales, huiles issues de l'agriculture).

9 Conclusion

Divers carburants renouvelables et sobres en émission de CO₂ sont ou pourraient être des alternatives aux carburants fossiles.

Une source est de l'électricité potentiellement excédentaire ou produite moyennant peu d'émission de CO₂. Dans ce cas, les carburants (hydrogène, méthane et méthanol) sont une solution de stockage d'énergie à plus long terme que les batteries, pour la mettre à disposition de la mobilité, grâce à ses commodités de stockage, comme la légèreté. Comparée au stockage par batterie, le stockage d'énergie sous forme de carburant souffre d'une perte de rendement et d'un coût élevé des piles à combustible. Des progrès de piles à combustibles sont vraisemblables, mais probable d'ici quelque décennies.

Une autre source de carburants obtenus par méthanisation ou fermentation, est l'agriculture, soit par valorisation des déchets, soit par exploitation de terres non boisées. Mais cette solution intéressante sera limitée par la superficie des terres qu'il sera possible de consacrer à cette production.

La production de certains carburants est intéressante comme l'un des rares solutions pour absorber du CO₂ industriel, grâce au potentiel chimique de l'hydrogène.

10 Annexe

Nom	Formule	Masse moléculaire	CO ₂ rejeté / mole	Rejet / Masse	Masse moléculaire kg/l à 15° c	kg de CO ₂ / l	MJ /kg	tep / t ou /m ³	kWh /kg	kWh/l	kg CO ₂ / kWh
Hydrogène (700bar)	H ₂	2	0,00	0,000	0,042	0,00	119,60	2,860	33,3 kWh/kg	1,40	0,00
Méthane, GNV = Gaz naturel (110bar)	CH ₄	16	44,00	2,750	0,670	1,84	50,000	0,857	11,1 kWh/kg	9,31	0,20
Propane	C ₃ H ₈	44	132,00	3,000	0,510	1,53	46,400	2,040	12,8 kWh/kg	6,58	0,23
Butane	C ₄ H ₁₀	56	176,00	3,143	0,580	1,82	45,800	2,630	12,7 kWh/kg	7,38	0,25
GPL (butane+propane)	50/50	50	154,00	3,080	0,550	1,69	45,81	1,095	12,7 kWh/kg	7,00	0,24
Ethanol	CH ₃ CH ₂ OH	46	88,00	1,913	0,789	1,51	26,69	0,638	7,4 kWh/kg	5,85	0,26
Essence Octane	C ₈ H ₁₈	114	352,00	3,088	0,750	2,32	43,84	1,048	12,2 kWh/kg	9,14	0,25
Gazole Hexa-décane	C ₁₆ H ₃₄	226	704,00	3,115	0,850	2,65	47,30	1,000	11,6 kWh/kg	11,18	0,24
Agrodiesel	C ₂₀ H ₃₈ O ₂ *	310	880,00	2,839	0,840	2,38	36,65	0,876	10,2 kWh/kg	8,56	0,28
Bois bûche (stère)	C+20%H ₂ O	15	44,00	2,933	0,500	1,47	12,30	0,147	3,4 kWh/kg	1,71	0,86
Bois granulé (t)	C+15%H ₂ O	15	44,00	2,933	0,500	1,47	16,19	0,390	4,5 kWh/kg	1,71	0,86
Charbon	C	12	44,00	3,667	0,619		29,28	0,619	8,1 kWh/kg		0,45

Données issues des formules chimiques et de Wikipédia.