

14. L'énergie biochimique

14.3 – Gazéification

Nicolas Lacroix, ing., M.Ing., PA LEED O+M

Ecosystem

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Groupe t3e, Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- La pyrolyse : préambule à la gazéification
- Description et origine
- Procédés et technologies
- Valorisation du syngas
- Projets et perspectives
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- La pyrolyse : préambule à la gazéification
- Description et origine
- Procédés et technologies
- Valorisation du syngas
- Projets et perspectives
- Conclusion

Introduction et objectifs

- La pyrolyse du bois est utilisée depuis l'antiquité. La gazéification (ou pyrogazéification) est apparue plus tard. C'est une source d'énergie plus « propre » que les énergies fossiles, qui a toute sa place dans les divers scénarios de transition énergétique à travers le monde;
- Elle permet de valoriser des déchets de biomasse;
- Même si des GES sont obligatoirement émis à un moment dans le procédé, le grand intérêt est de ne pas rajouter du carbone fossile dans l'atmosphère.

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Faire comprendre d'où viennent la pyrolyse et la gazéification;
 - Donner les différents procédés actuellement mis en œuvre;
 - Présenter la majorité des applications possibles;
 - Faire réfléchir sur les enjeux et les potentiels de la gazéification;
 - Être capable d'argumenter sur son utilisation et effectuer une comparaison sur différents aspects avec d'autres sources d'énergie.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***La pyrolyse : préambule à la gazéification***
- Description et origine
- Procédés et technologies
- Valorisation du syngas
- Projets et perspectives
- Conclusion

La pyrolyse : préambule à la gazéification

- **Description**

- Par définition, c'est la décomposition chimique de la matière (organique ou non, mais habituellement organique, surtout dans le contexte du présent module) sous l'effet de la chaleur et en l'absence totale d'oxygène;
- Ne produit pas de flamme;
- Également appelée thermolyse, volatilisation, distillation ou encore carbonisation lorsque celle-ci donne lieu à la production de charbon de bois.

La pyrolyse : préambule à la gazéification

- **Description**

- Entre 300°C et 700°C, la biomasse se transforme alors, d'une part, en une partie solide appelée le charbon et, d'autre part, en une partie gazeuse (gaz de pyrolyse).
 - La fraction volatile est constituée de gaz incondensables (CO , H_2 , CO_2 , CH_4 ,...) et de gaz condensables (eau, goudrons légers et lourds).
 - La fraction solide est essentiellement constituée de carbone fixe et d'éventuels minéraux et métaux selon le combustible.
- En général, ce procédé permet d'obtenir un solide carboné, une huile ou un gaz, ou plusieurs de ces composés, et ce en proportion variable selon le niveau de température atteinte. C'est une des étapes de la gazéification mais également un procédé de transformation à part entière.

La pyrolyse : préambule à la gazéification

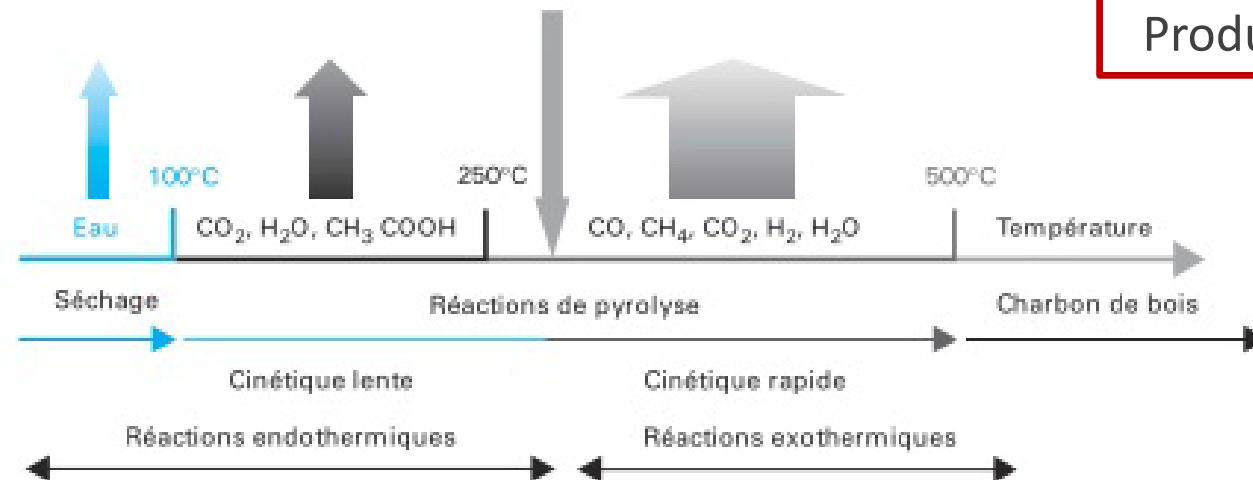
- Étapes de la pyrolyse traditionnelle du bois

Volatilisation de la matière

≈320°C température d'inflammation du bois : le dégagement de gaz est suffisant pour assurer son inflammation dans l'air

D'abord un stade de déshydratation de la matière organique ou non

Production d'un charbon



X. DEGLISE et A. DONNOT, « Bois énergie », Tech. Ing. Nouv. Technol. Energ. Renouvelables Stock, vol. base documentaire : TIB594DUO., no ref.article : be8535,2015.

Note: le séchage peut ne pas être requis si la matière n'est pas organique

La pyrolyse : préambule à la gazéification

- Histoire de la pyrolyse

- Du grec *pur, puros* (πυρ πυρος) « feu » et du suffixe *-lyse* (λύσις) « dissolution » - > pyrolyse signifie *séparation* par le feu;
- De la même manière on a l'hydrolyse et l'électrolyse, respectivement pour la séparation par l'eau et l'électricité;
- Ce sont des outils de la chimie analytique, depuis Antoine Lavoisier (et la caractérisation des premiers éléments);
- Un procédé utilisé depuis l'antiquité. Dans les temps modernes, son histoire se mêle avec celle de la gazéification.

Davantage de détails dans le fichier PDF sur le site du cours : Annexe 1

La pyrolyse : préambule à la gazéification

Procédés et applications: le charbon

Une pyrolyse longue (en heure ou en jour même) sert à obtenir du charbon de bois à partir du bois, du coke ou charbon de terre à partir de la houille, du charbon de tourbe à partir de la tourbe...

Historiquement, le charbon de bois s'obtenait en empilant du bois en un tas recouvert d'une couche d'argile, qui était enflammé. Une partie du bois servant à produire la chaleur, lors de sa combustion, pour la pyrolyse du reste du tas.

Puis, l'utilisation de fours en métal a permis la récupération des autres produits : huiles et gaz.

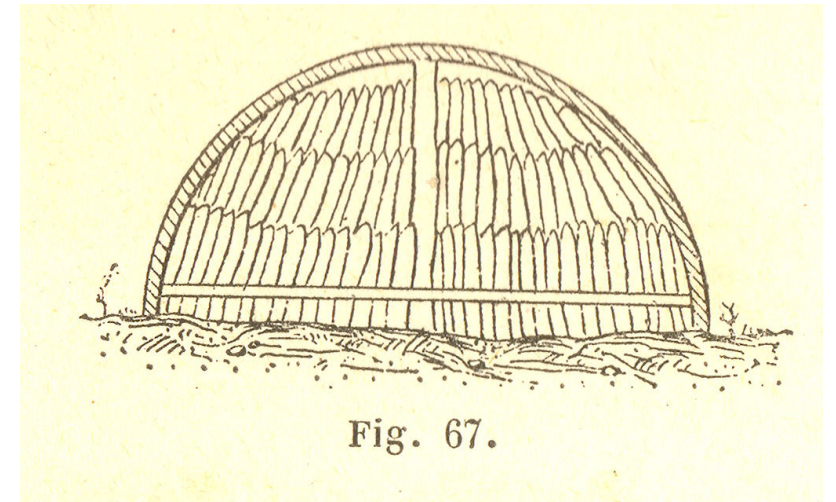


Illustration d'une meule en coupe, article sur le charbon de bois dans le Précis illustré de mécanique de 1894 (source : Wikipédia)

La pyrolyse : préambule à la gazéification

- Procédés et applications: Usages du charbon de bois
 - Le charbon de bois est utilisé depuis la préhistoire pour dessiner.
 - Mais son utilité première réside dans ses caractéristiques de combustible. Le charbon de bois dégage bien plus d'énergie que le bois et ce, plus localement. Son utilisation était primordiale dans les forges des industries métallurgiques. Il fut ensuite remplacé par du coke.
 - L'un des trois composants de la poudre à canon avec le soufre et le salpêtre.
 - Comme amendement qui permet d'accroître la fertilité des sols et les rendements agricoles, semble-t-il en attirant et favorisant les microbes et champignons utiles, en conservant l'humidité et en conservant mieux les éléments nutritifs du sol.
 - Comme élément de filtration (masques à gaz, filtres à air ou à eau...)

La pyrolyse : préambule à la gazéification

- **Procédés et applications: goudrons et huiles**

- Le goudron de pin: employé pour le calfatage (assurant, entre autres, l'étanchéité) des navires en bois, un élément essentiel donc. Une industrie énorme à l'époque!
- La pyrolyse du bois de feuillus donne de l'acide pyroligneux. Il peut alors en être récupéré de l'acide acétique (*vinaigre de bois*), du méthanol et de l'acétone. Autrefois ces trois composés étaient obtenus exclusivement par pyrolyse du bois, d'où le nom d'« alcool de bois », donné couramment au méthanol.
- Le goudron de bouleau est un adhésif historique.
- La pyrolyse de la biomasse produit une huile pyrolytique qui peut éventuellement servir de carburant.



Édouard Manet, Le Bateau goudronné (1873)

La pyrolyse : préambule à la gazéification

- **Procédés et applications: une pyrolyse dans l'eau**

La dépolymérisation thermique est une pyrolyse s'effectuant dans l'eau. Elle permet de convertir des biodéchets en carbones solides, gaz, eau, et surtout hydrocarbures, fournissant un pétrole brut de synthèse de bonne qualité. La méthode reproduit, en quelque sorte, la fabrication géologique de pétrole fossile en quelques heures au lieu de millions d'années.

-> Changing World Technologies, Inc. est une entreprise américaine qui commercialise ce type de pétrole.



<http://www.changingworldtech.com/product-info.html>

Est-ce pour autant une solution viable?

Il existe d'autres procédés pour produire du pétrole brut de synthèse, comme le pré-raffinage de sables bitumineux. D'ailleurs, ce type de pétrole est appelé « syncrude » dans l'industrie, qui est une marque déposée. Syncrude étant une compagnie pétrolière canadienne.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- La pyrolyse : préambule à la gazéification
- ***Description et origine***
- Procédés et technologies
- Valorisation du syngas
- Projets et perspectives
- Conclusion

Question

- Lors de quel siècle le procédé de gazéification est mis en œuvre de manière industrielle ?

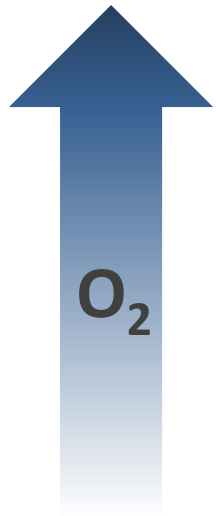
A. 17^{ème} siècle
B. 18^{ème} siècle
C. 19^{ème} siècle
D. 20^{ème} siècle
E. 21^{ème} siècle



ENR2020

Description et origine

- Distinction des procédés thermochimiques



- Combustion : oxydation exothermique de la matière organique.
- Gazéification : décomposition thermochimique et autothermique à l'aide d'un agent de gazéification (Air, O_2 , $H_2O_{(g)}$)
- Pyrolyse : décomposition thermochimique par réaction endothermique.

Attention !

Gazéification \neq Digestion anaérobie ou biométhanisation

En fait, lorsque l'on brûle un combustible la combustion entretient la pyrolyse tant qu'il y a matière à brûler, les deux procédés ont donc lieu en même temps.

Description et origine

- **Historique**

- Découverte au 18^{ème} siècle et mis en œuvre au 19^{ème} dans des usines pour la production de gaz manufacturé (appelé plus tard gaz de ville) à partir de houille.
- Les gaz manufacturés seront progressivement remplacés dans leurs applications d'éclairage, par l'électricité à partir de 1880, et dans leurs applications de chauffage, par le gaz naturel, à partir de la crise de 1929, et plus largement à partir de la fin de la WWII (PCI double pour le gaz naturel et absence de toxicité).
- Développement de procédés et carburants pour voitures (moteurs dits « à gaz pauvres » ou moteurs à explosion classiques) pour pallier la pénurie du pétrole durant la WWII (embargo en Europe)



Gas Bag on Roof Holds Bus Fuel



Voiture équipé d'un gazogène à Berlin en 1946

Description et origine

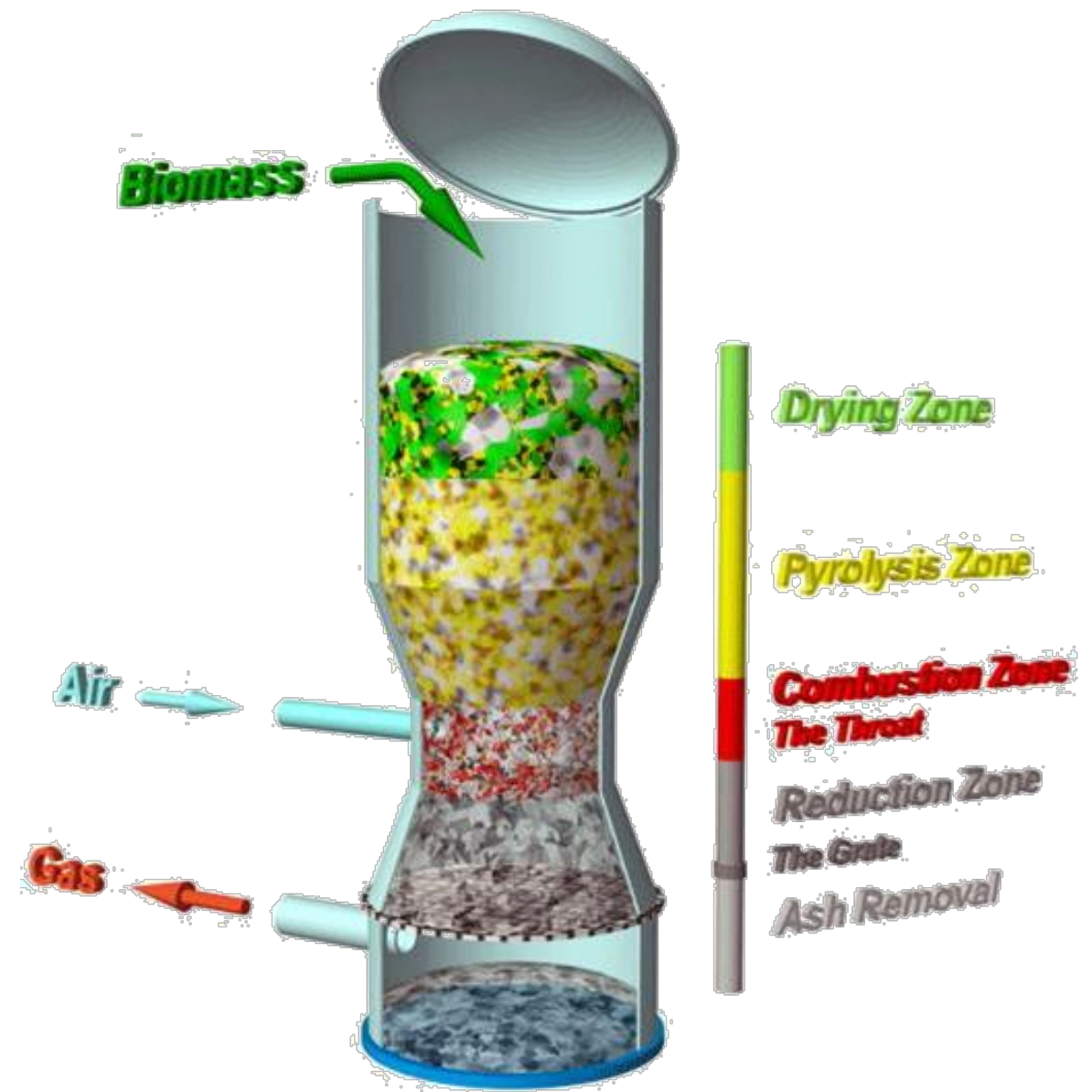
- **Historique**

- Le procédé Fischer-Tropsch, du nom de ceux deux inventeurs, permettait alors de produire de l'essence synthétique à partir de la liquéfaction d'un gaz produit à partir du charbon;
- Puis, avec la découverte des champs pétrolifères d'Arabie Saoudite : abandon de la voie synthétique face à la rentabilité économique des prospections;
- En France, la dernière usine à gaz, celle de Belfort, en Franche-Comté ferme en 1971;
- Début 21^{ème}: la gazéification de la biomasse et de composés non organiques à regagné de l'intérêt avec la prise de conscience des problèmes énergétiques et des changements climatiques.

Description et origine

- Étapes du procédé

1. Entrée de la matière
2. Séchage
3. Pyrolyse
4. Oxydation partielle
5. Réduction ou gazéification
6. Récupération des gaz et des cendres
7. Utilisation des gaz



Tiré de la présentation de Nicolas Lacroix, 2019

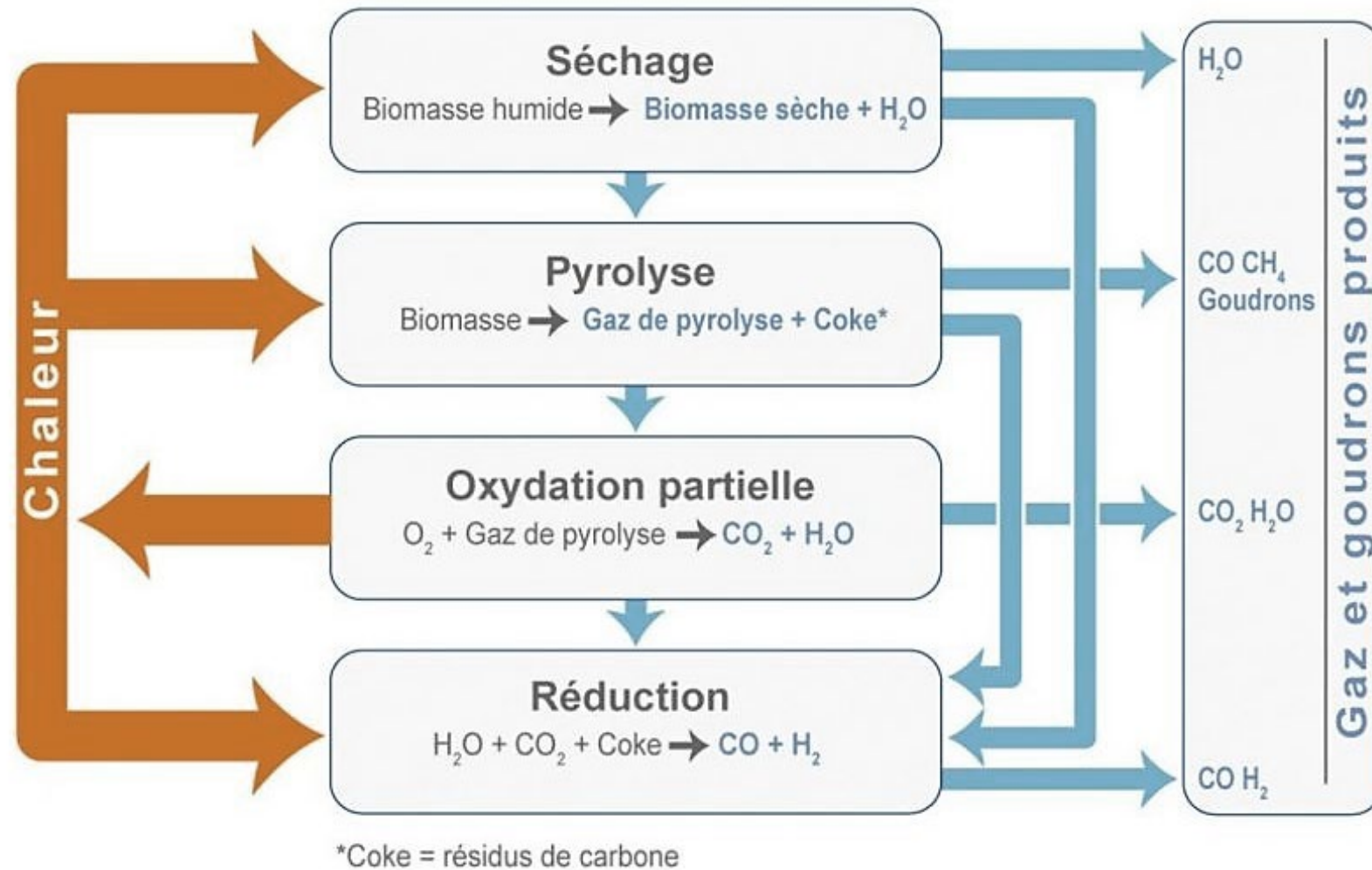
Description et origine

- **Séchage de la matière pour produire de la vapeur d'eau**
 - Température entre 100 et 160°C.
 - L'eau s'évapore. Consommation d'énergie.
 - Si le produit sec est non homogène, il faut un tri préalable à l'étape suivante.
- **Pyrolyse des intrants pour obtenir du coke et des gaz de pyrolyse**
 - Température entre 120 et 600°C + sans oxygène (anaérobie).
 - Réaction autothermique : ne produit ni ne consomme d'énergie.
 - La matière sèche se décompose et les atomes de carbone s'associent entre eux pour former : du carbone réducteur presque pur (coke ou résidus de carbone), un mélange de gaz composés majoritairement d'oxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbure (CH₄) = gaz de pyrolyse, des goudrons et matières volatiles issues de vapeurs de composés organiques.

Description et origine

- **Oxydation partielle des gaz de pyrolyse = combustion partielle**
 - Température entre 1 200 et 1 500°C + oxygène en grande quantité;
 - Oxydation des matières volatiles issues de la pyrolyse;
 - Produit la chaleur nécessaire au deux étapes précédentes (maintient de la température seulement pour la pyrolyse).
- **Réduction ou « gazéification » du carbone pour produire le syngas**
 - Température entre 800 et 1 200°C + sans oxygène;
 - Le coke réduit la vapeur d'eau et le gaz carbonique obtenus lors de l'oxydation en hydrogène (H₂) et oxyde de carbone (CO) pour former le syngas.

Description et origine



Processus de gazéification ©2011, Fondation d'entreprise Alcen pour la connaissance des énergies

Description et origine

- En résumé

-> Intrant : matière organique (tout ce qui brûle)

-> Extrait : gaz de synthèse (syngas)

H₂, CO, CO₂, CH₄, ...

PCI : 5-15 MJ/Nm³ (dépend des proportions des deux gaz)

Il y a des émissions de GES lors de la combustion du syngas (production de CO₂ et H₂O) mais peu d'émissions de NO_x et autres polluants.

Les 4 étapes sont toujours présentes mais leurs configurations spatiale et temporelle peuvent varier selon le mode d'introduction de la biomasse, l'agent gazéifiant et la technologie du réacteur.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- La pyrolyse : préambule à la gazéification
- Description et origine
- ***Procédés et technologies***
- Valorisation du syngas
- Projets et perspectives
- Conclusion

Procédés et technologies

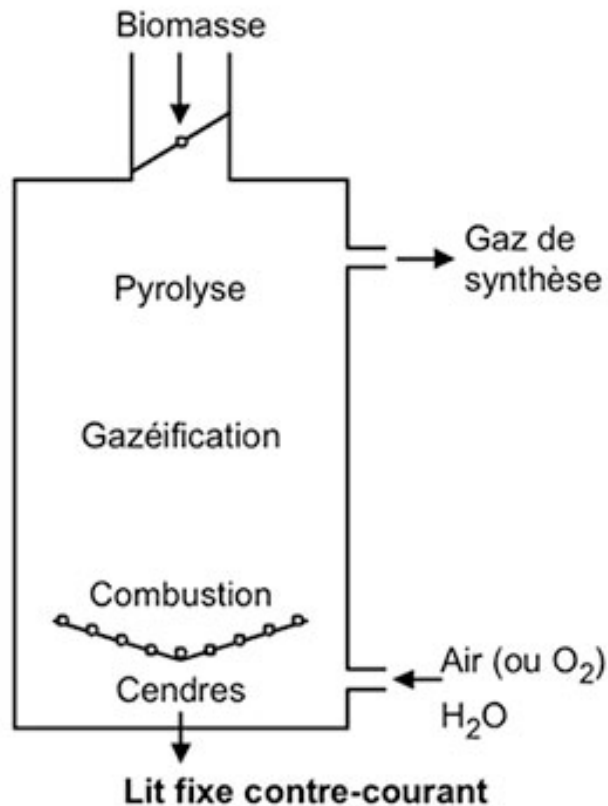
- **Principales technologies (parmi plusieurs)**

- les lits fixes co-courant;
- les lits fixes contre-courant;
- les procédés à double feu;
- les procédés étagés;
- les lits fluidisés denses ou lits bouillonnants;
- les lits fluidisés circulants;
- les réacteurs à flux entraîné (ou en courant fluide);
- les procédés allothermiques par plasma thermique.

Davantage de détails sur les technologies dans le fichier PDF disponible sur le site du cours :
Annexe 2
(facultatif)

Le choix de la technologie est dictée par la consommation en combustible requise (kg/h) et donc la gamme de puissance, le combustible utilisé, l'application aval du gaz

Procédés et technologies



- **Lit fixe contre-courant (*updraft*)**

Température élevée d'environ 1 200°C.

Accepte les biomasses avec un taux élevé d'humidité. Par contre, le syngas est fortement chargé en goudrons ($\approx 100 \text{ mg.Nm}^{-3}$) produits lors de la pyrolyse car ceux-ci ne traversant pas la phase chaude avant d'être évacués, il n'y a pas de craquage thermique de ces goudrons.

-> Le PCI du syngas est augmenté à condition d'être valorisé dès la sortie du réacteur sans être refroidi. Débit de biomasse d'environ 4t/h.

Schémas de principes de fonctionnement de réacteurs de gazéification

Seiler, Jean-Marie. 2019. La Gazéification. <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>

Procédés et technologies

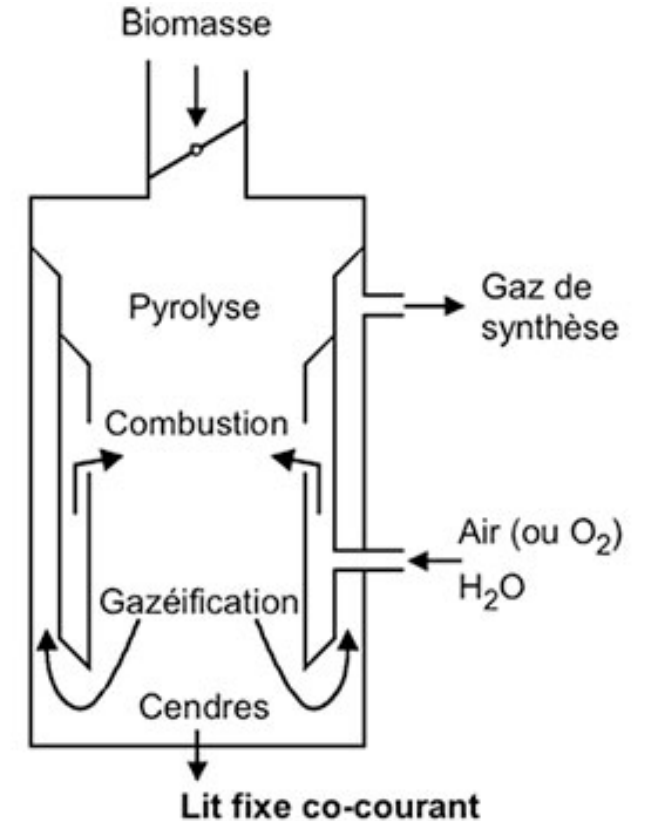
- **Lit fixe co-courant (*downdraft*)**

L'air est ici introduit dans la partie haute du réacteur. Ainsi le gaz traverse la zone d'oxydation à haute température avant d'être évacué : il a donc craquage thermique des goudrons (concentration de quelques mg.Nm^{-3} dans le syngas).

-> Ce réacteur est donc plus adapté pour une utilisation décentralisée du syngas.

Mais demande un combustible de qualité et homogène ainsi que des réglages du réacteur plus pointus.

Débit maximum de 0,5 t/h.



Schémas de principes de fonctionnement de réacteurs de gazéification

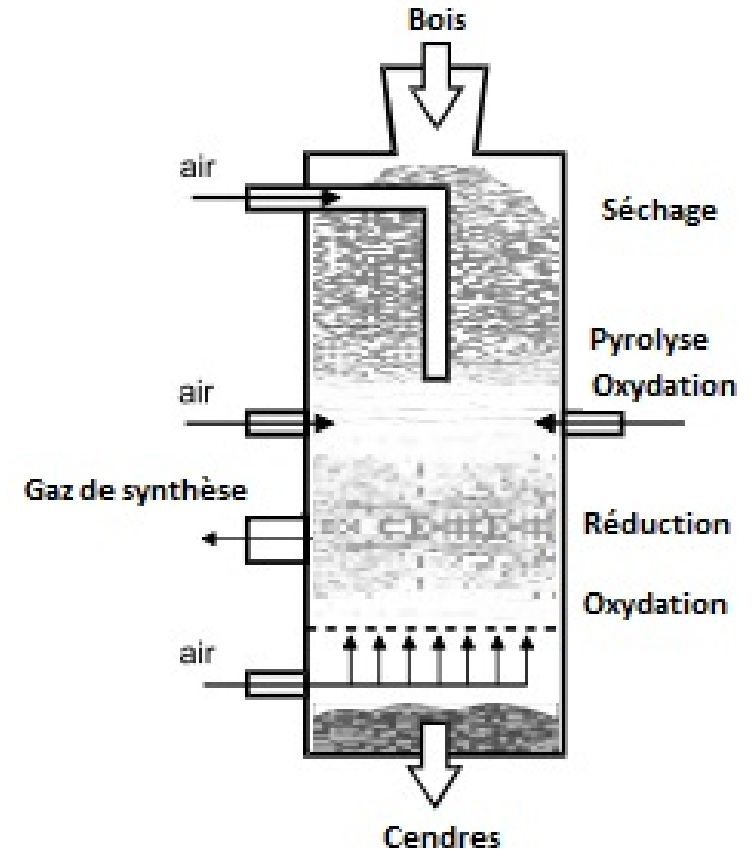
Seiler, Jean-Marie. 2019. La Gazéification. <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>

Procédés et technologies

- **Procédé à double feu (*Double fire gasifier*)**

Une combinaison des procédés co-courant et contre-courant. Les gazogènes co-courant ne permettant pas de convertir l'ensemble du coke présent dans la zone de réduction, en partie basse du réacteur.

Ici on rajoute une injection d'air (à gauche sur la figure ci-contre) pour créer une seconde zone d'oxydation et oxyder entièrement la fraction de carbone résiduelle.

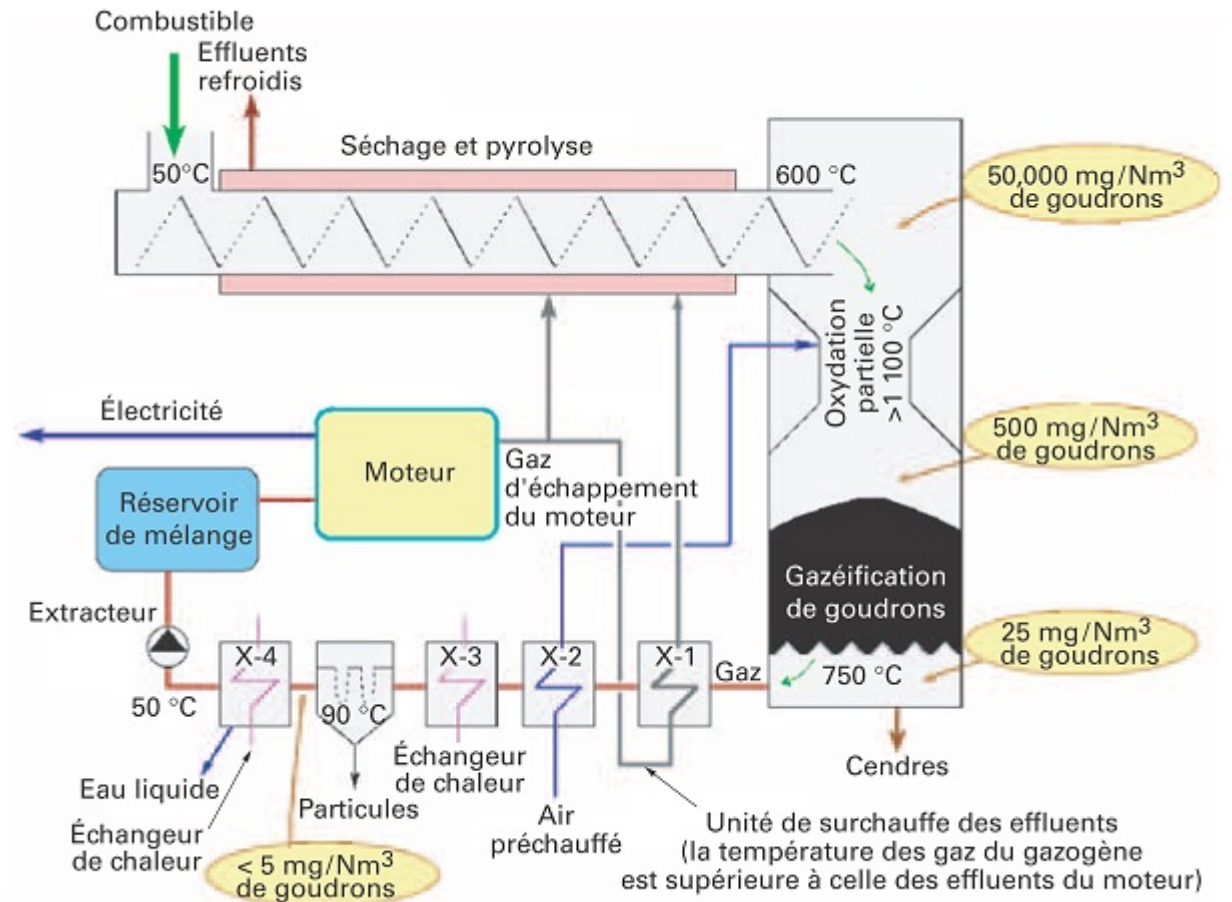


F. Lettner, H. Timmerer, et P. Haselbacher, « Biomass gasification - State of the art description », Intelligent Energy Europe (IEE), Deliverable 8, 2007
<http://www.gazeification.info/home1>

Procédés et technologies

- **Les procédés étagés**

Dérivé des gazogènes co-courant avec une séparation des étapes de pyrolyse et d'oxydation/réduction dans deux réacteurs distincts. Cela permet une conduite optimale des deux réacteurs pour minimiser la concentration de goudrons ($< 20 \text{ mg.Nm}^{-3}$).



Procédé étagé "Viking" DTUL. Gerun - Tech. Ing. <http://www.gazeification.info/home1>

Procédés et technologies

- **Les lits fluidisés**

Par ce procédé, les particules sont mises en suspension dans le réacteur par injection à sa base d'un gaz qui va « soulever » les grains. Il faut donc des particules de petites tailles (2 à 5 mm), ce qui nécessite généralement un broyage préalable de la biomasse.

Cela favorise les échanges thermiques et massiques entre le gaz et le solide. La biomasse est pré-séchée.

Dans ce type de réacteur, les différentes étapes de pyrolyse, combustion ou oxydation ont lieu dans une seule et même zone. Par ailleurs, le gaz produit est fortement chargé en particules, exigeant la mise en œuvre de traitements avant sa valorisation (cyclone).

Procédés et technologies

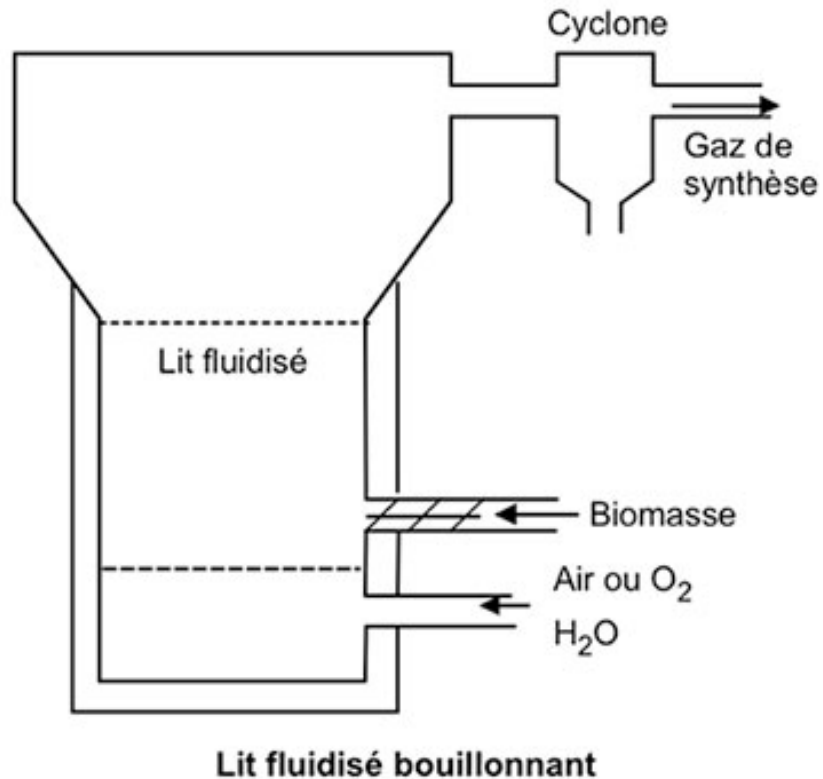
- **Les lits fluidisés**

Bon rendement et permet l'utilisation de combustibles plus variés tels que les CSR (Combustibles Solides de Récupération).

Peu adapté aux installations de faible puissance à cause de sa complexité de mise en œuvre.

Discuté dans une présentation ultérieure.

Procédés et technologies



- **Lit fluidisé dense ou lit « bouillonnant »**
(*bubbling fluid bed*)

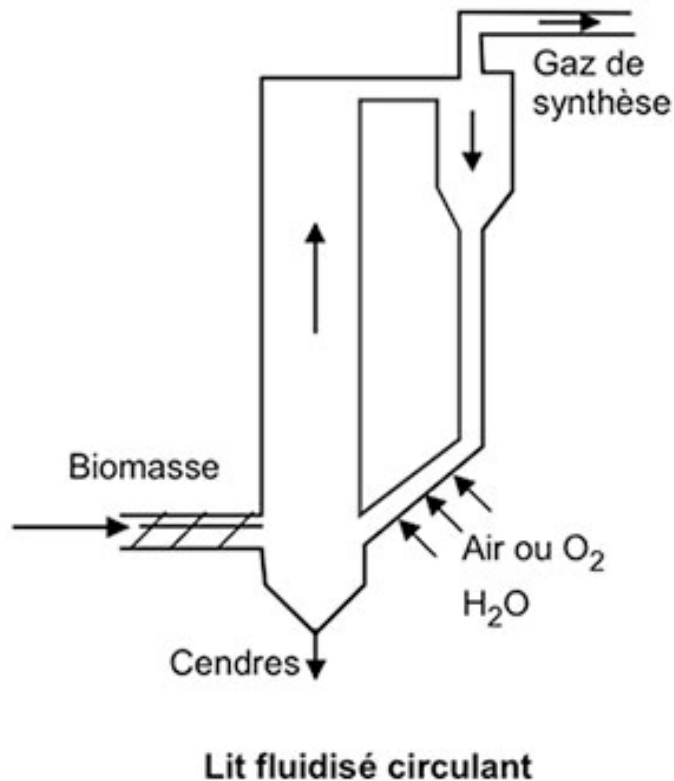
Le combustible repose sur une grille à travers laquelle traversent les gaz oxydants. Leur vitesse est juste assez élevée ($1-2 \text{ m.s}^{-1}$) pour permettre le brassage des particules sans les entraîner hors du lit. Température entre 700 et 800°C.

-> Pas très souple d'exploitation, en particulier au niveau du contrôle du niveau du lit lors des variations de charge. Débit de la biomasse de 10 à 15 t/h. Concentration en goudrons de l'ordre de 10 mg.Nm^{-3}

Schémas de principes de fonctionnement de réacteurs de gazéification

Seiler, Jean-Marie. 2019. La Gazéification. <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>

Procédés et technologies



- **Lit fluidisé circulant (*circulating fluid bed*)**

Le combustible circule entre la zone de réaction et un cyclone séparateur où les cendres sont éliminées.

La vitesse de fluidisation est plus élevée (4 à 6 $m.s^{-1}$), si bien qu'une partie des particules du lit est entraînée hors du réacteur.

Un cyclone sépare la phase solide qui est ensuite réinjectée dans la zone de réaction.

-> Plus grande tolérance vis-à-vis du combustible que le lit dense. Intérêt économique pour les débits de biomasse élevés (15t/h ou plus).

Schémas de principes de fonctionnement de réacteurs de gazéification

Seiler, Jean-Marie. 2019. La Gazéification. <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>

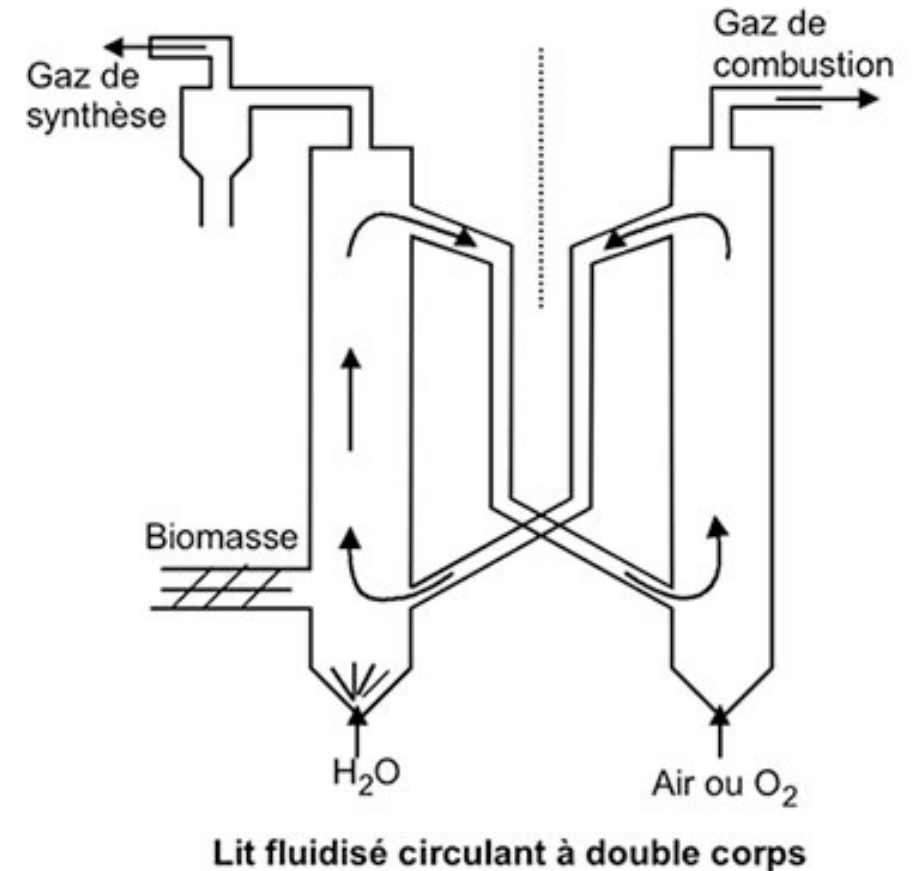
Procédés et technologies

- **Lit fluidisé circulant à double corps (*twin fluid beds*)**

Extension du lit circulant. Le système de recirculation permet d'assurer, dans le circuit de retour, le mélange du matériau de fluidisation et de la biomasse dans un réacteur séparé dans lequel s'effectue la combustion du solide résiduel.

Le matériau recirculant devient alors un caloporteur qui transfère l'énergie de combustion du carbone solide résiduel vers le réacteur de gazéification.

-> Intérêt économique seulement pour les débits de biomasse élevés (10t/h ou plus) car trop complexe.



Schémas de principes de fonctionnement de réacteurs de gazéification

Seiler, Jean-Marie. 2019. La Gazéification. <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>

Procédés et technologies

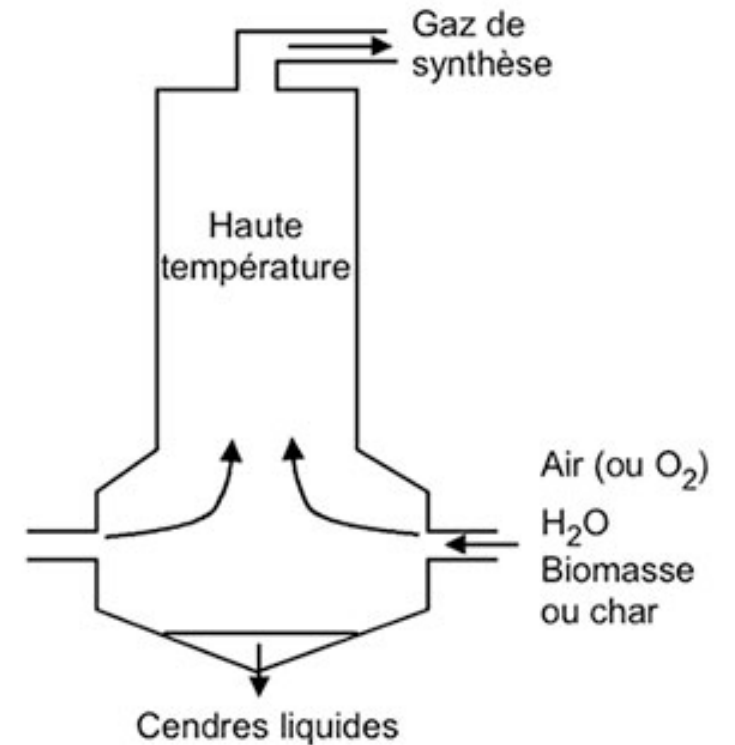
- **Réacteur à flux entraîné (*entrained flow*)**

- Le combustible est finement pulvérisé dans un jet d'oxygène : nécessite une biomasse ou du charbon moulu. + forte consommation en oxygène.
- Pression entre 20 et 50 bars. Températures élevées (1400 - 1600°C) et cinétique de réaction très rapide. Vitesse de fluidisation supérieure à 6 m/s. Temps de séjour dans le réacteur de l'ordre de la seconde.

-> Craquage complet des goudrons, très haut rendement en gaz, faible impact environnemental et forte puissance des installations. Mais implique un prétraitement coûteux de la biomasse (taille des particules sous le millimètre). La pyrolyse peut être faite en amont du réacteur.

Schémas de principes de fonctionnement de réacteurs de gazéification

Seiler, Jean-Marie. 2019. La Gazéification. <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>



Réacteur à courant fluide ou à flux entraîné

Une des meilleures solutions pour faire de l'électricité à partir du charbon à l'échelle industrielle!

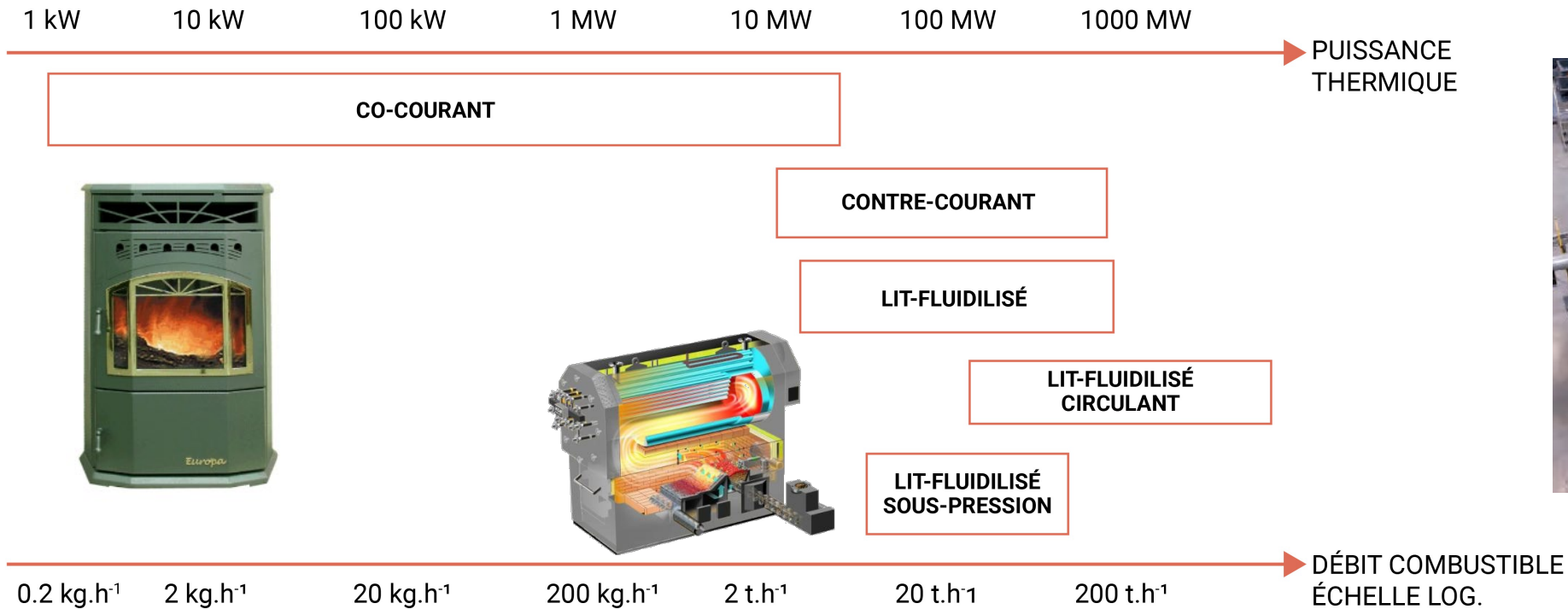
Procédés et technologies

- **Procédés allothermiques par plasma thermique**

Contrairement à tous les procédés précédents dits autothermiques, un procédé allothermique utilise une source d'énergie extérieure. Pas d'apport d'oxygène donc pour une combustion (perte énergétique importante par séparation cryogénique de l'oxygène dans l'air). Il présente l'avantage de conserver la totalité de la biomasse entrante pour sa conversion en gaz de synthèse et par conséquent permet d'augmenter les rendements matières, en gardant des rendements énergétiques très bons. De plus, l'outil plasma permet de réduire significativement la quantité de goudrons.

Procédés et technologies

- Des petites aux grosses installations



Domaine de puissance des différentes technologies, graphique ©Naōden
Images tirées de la présentation de Nicolas Lacroix, 2019

Question

- Parmi les propositions suivantes, lesquelles peuvent être utilisées comme combustible pour un procédé de gazéification RENEUVELABLE (sans émettre du CO₂ d'origine fossile) ?
 - A. Déjections animales
 - B. Charbon minéral (coke)
 - C. Déchets plastiques
 - D. Boues de station d'épuration
 - E. Résidus de cultures



ENR2020

Procédés et technologies

- **Les combustibles**

- Parmi l'ensemble des technologies existantes, la gazéification permet de convertir une vaste diversité de combustibles :

- toute la matière organique composée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène et de peu d'eau.

- Exemples de combustibles :

- **Origine fossile** : charbon minéral, déchet plastique, coke de pétrole -> pas la meilleure option car dans tout les cas cela finira dans l'atmosphère si il y a combustion du syngas : on amène du CO₂ fossile dans le cycle naturel
- **Origine renouvelable (la biomasse)** : tout type de bois, résidus de cultures, sous-produits agroalimentaires, déjections animales
- **Autres déchets** : pneus usagés, boues de station d'épuration séchées...

Procédés et technologies

- **Les combustibles**

- Deux facteurs d'importance pour le PCI du syngas et le rendement du procédé :

- le taux d'humidité
 - la granulométrie du combustible

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- La pyrolyse : préambule à la gazéification
- Description et origine
- Procédés et technologies
- ***Valorisation du syngas***
- Projets et perspectives
- Conclusion

Valorisation du syngas

- **L'épuration du syngas**

- C'est une étape essentielle **dès la sortie du réacteur** et avant sa valorisation;
- Le gaz de synthèse contient des **polluants** et des **éléments à l'origine d'encrassement**, de **désactivation de catalyseurs** et de **corrosion** pour certaines parties du procédé en aval du gazéifieur;
- Il faut donc épurer le syngas.

Valorisation du syngas

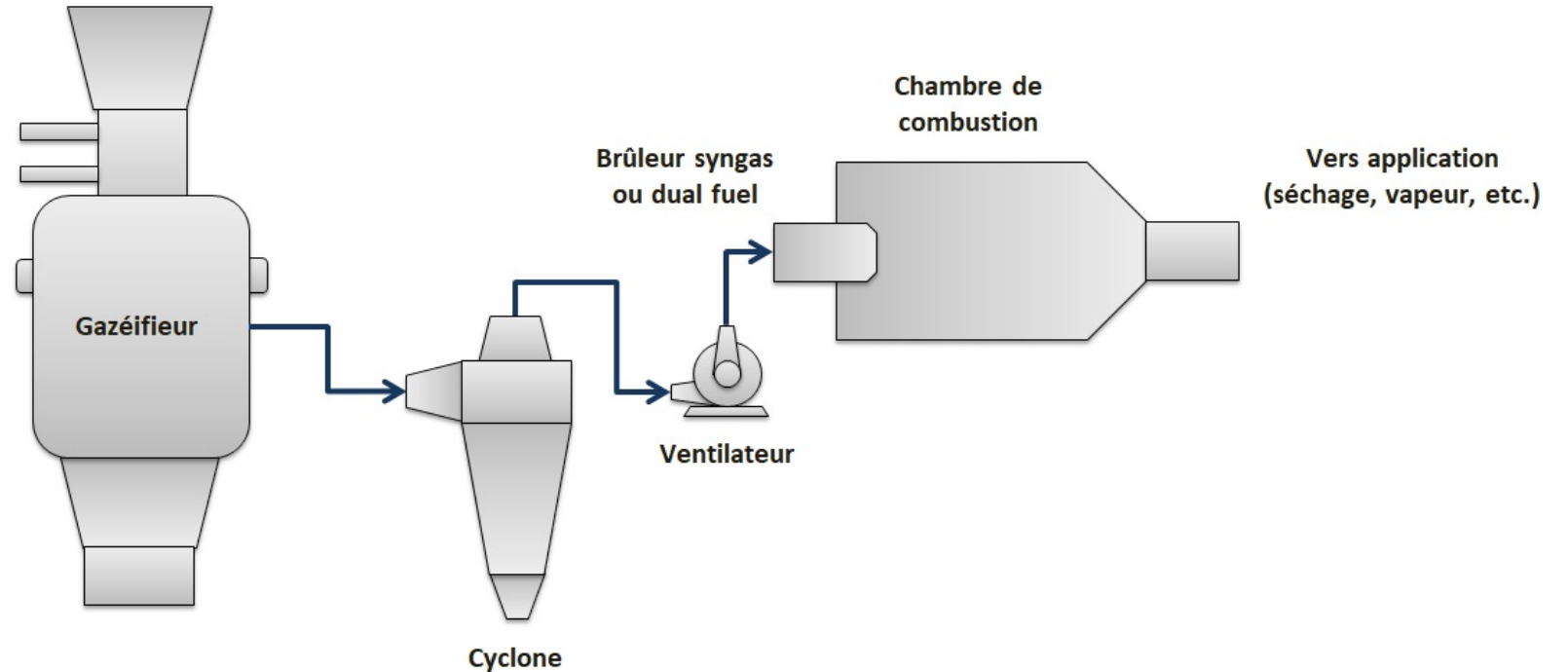
- **L'épuration du syngas**

- Une partie de cette étape consiste à séparer le **dihydrogène** et le **monoxyde de carbone**, du **dioxyde de carbone** pour augmenter le PCI su syngas;
- Les techniques sont variées
 - cyclones
 - filtres granulaires (adsorption chimique)
 - électrofiltres
 - filtres à manches
 - filtres céramiques
 - craquage thermique
 - charbon actif
 - lavage à l'eau...

Valorisation du syngas

- **Production de chaleur en substitution de combustibles fossiles**

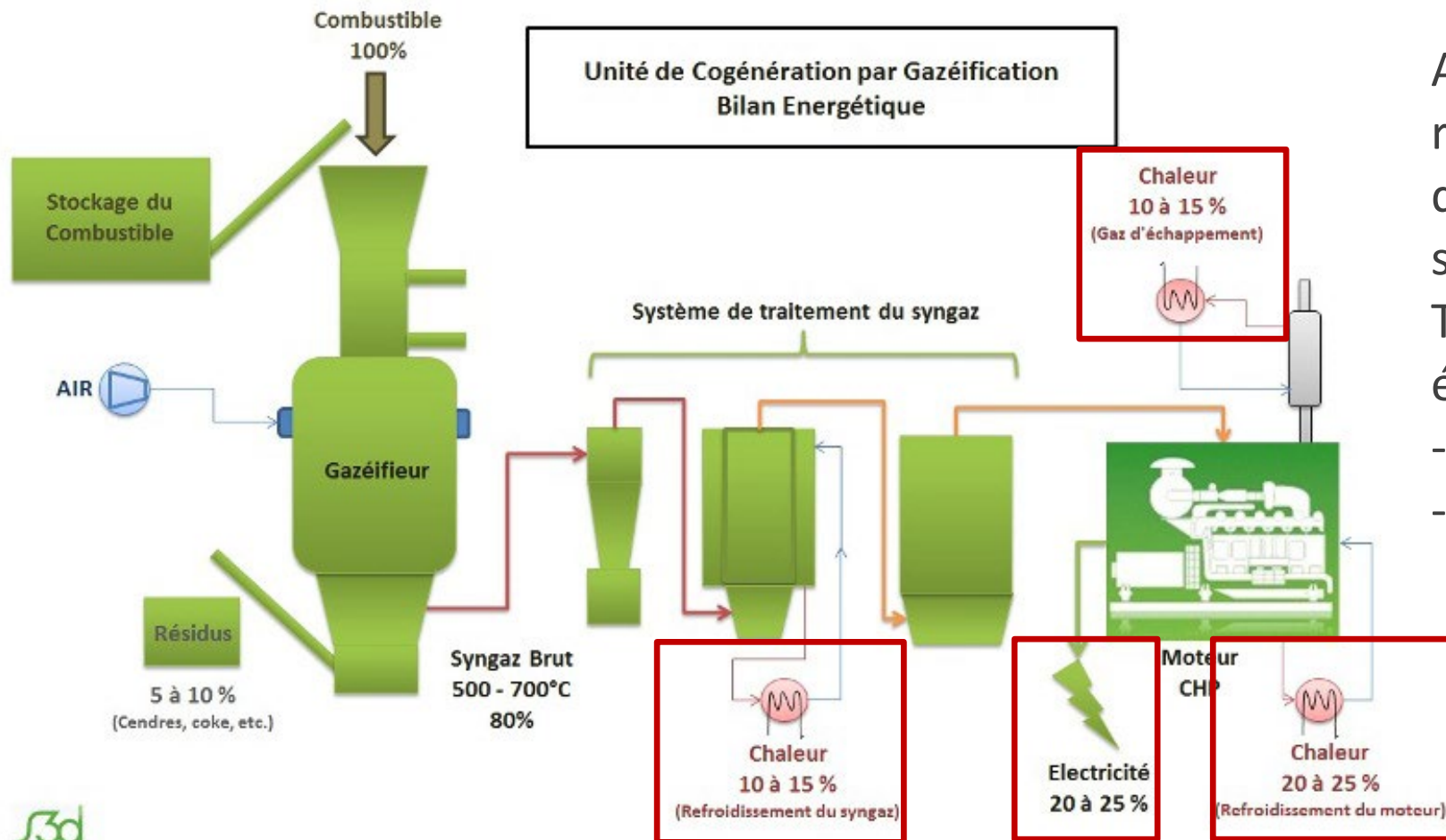
Une combustion directe, simple à mettre en œuvre. Possible d'utiliser les installations existantes. En général, opéré en mode dual fuel (100% syngas, 100% gaz naturel ou un mélange des deux). Pour les industries avec des besoins de séchage, production de vapeur, cuisson...



<http://www.gazeification.info/valorisaion-du-syngas>

Valorisation du syngas

- La cogénération : production d'électricité + chaleur, moteur à gaz



Application la plus répandue là où les tarifs de rachat de l'électricité sont favorables.

Très bonne valorisation énergétique :

- 20-25% en électricité
- 40-55% en chaleur



<http://www.gazeification.info/valorisaion-du-syngas>



Valorisation du syngas

- **Production d'électricité dans une pile à combustible**

Pas une combustion mais une réaction électrochimique dans une pile à combustible haute température de type SOFC (Solid Oxide Fuel Cell).

Rendement électrique de 50 à 60%. Au stade de la recherche (Projet BioCellus, Projet ValorPac,...)

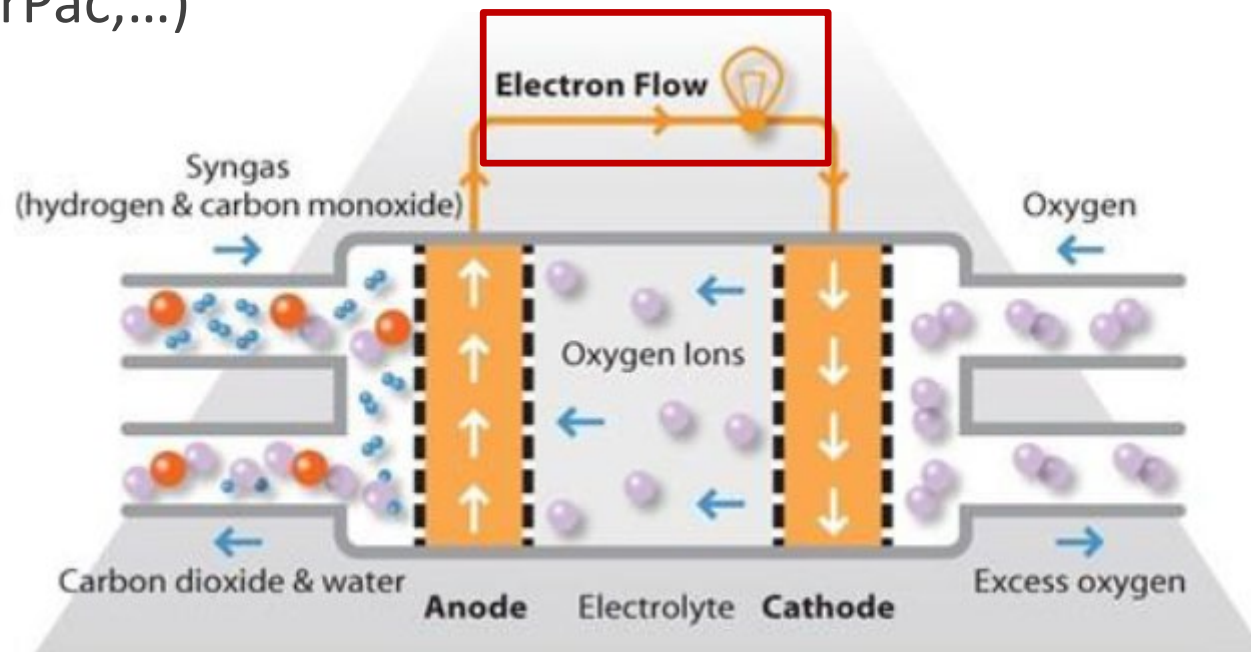
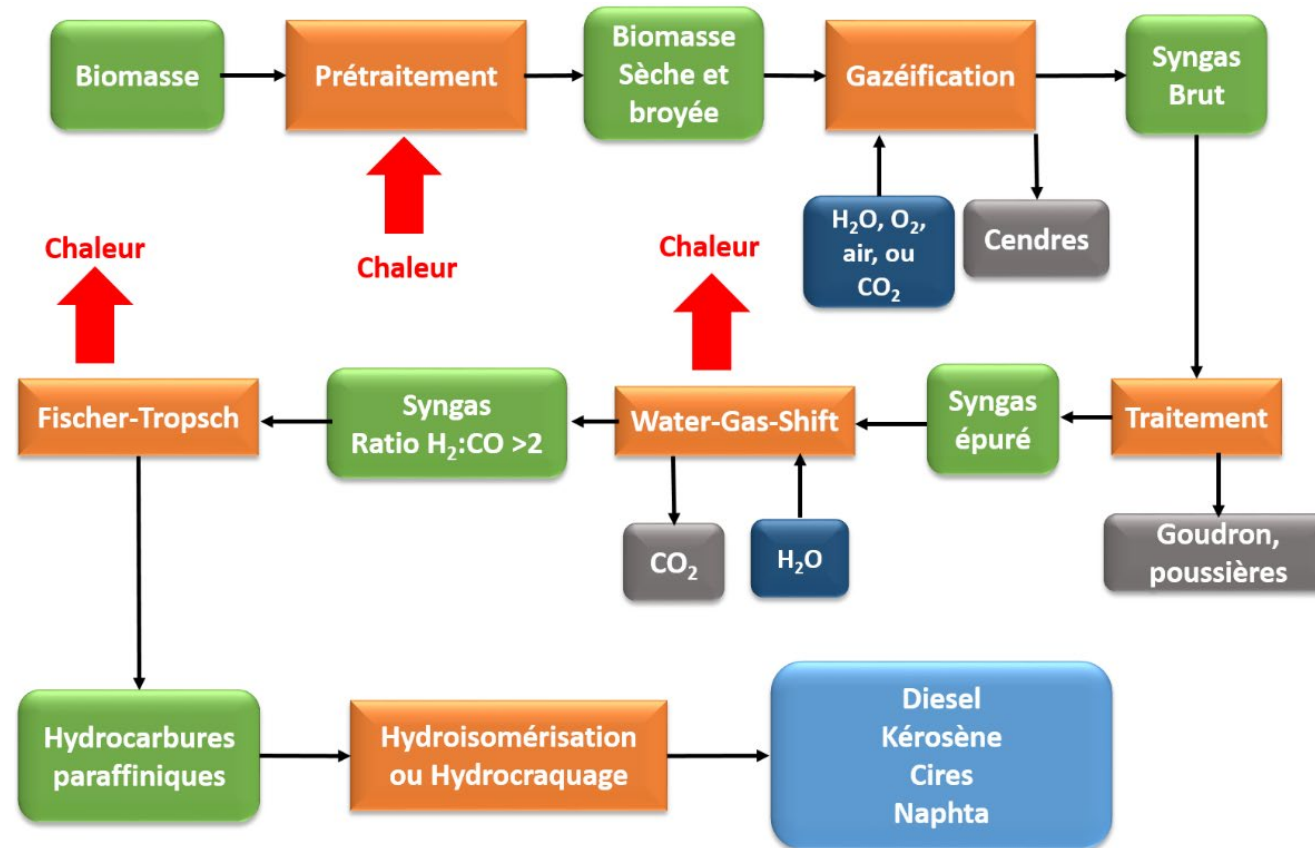


Schéma de principe d'un cellule SOFC,
François RICOUL, thèse Univ Nantes, 2016

Valorisation du syngas

- Production de biocarburants : Bio-gazole, procédé Fischer-Tropsch

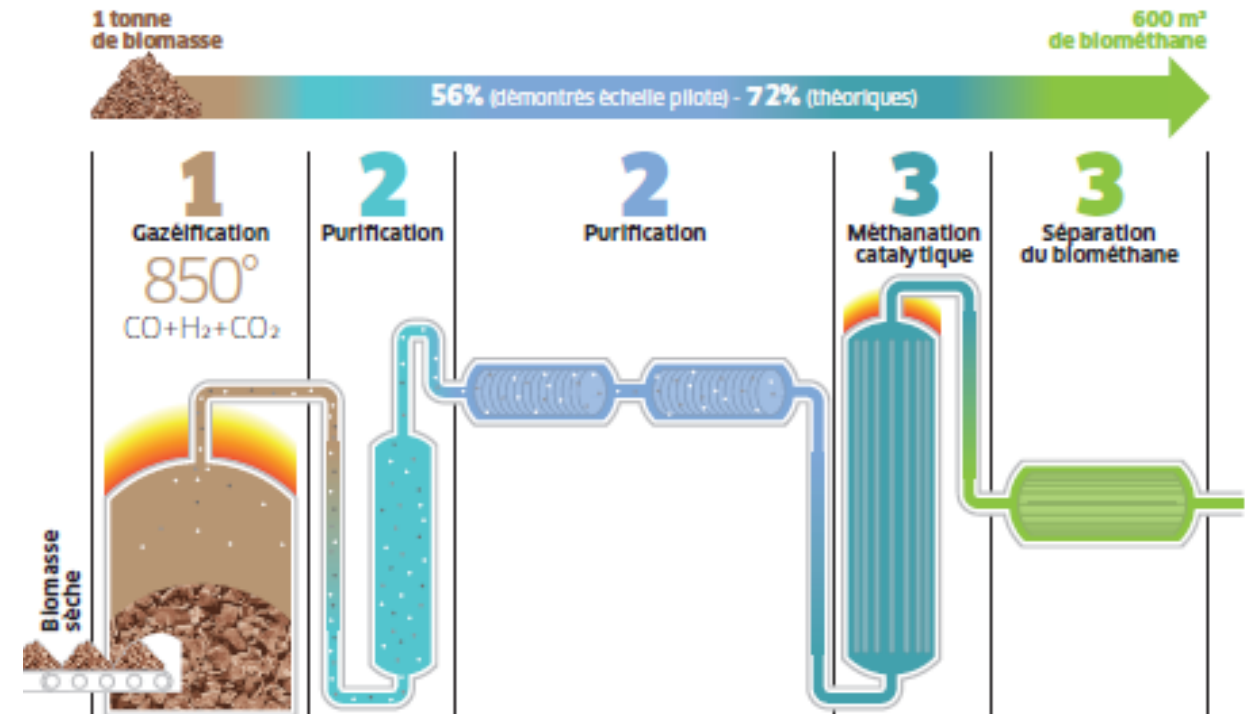


Chaîne de procédés gazéification/Fischer-Tropsch
<http://www.gazeification.info/valorisaion-du-syngas>

Valorisation du syngas

- Production de biocarburants : Biométhane 2G, Méthanation

- Différent de la **méthanisation** qui utilise des bactéries en milieu anaérobie pour dégrader la matière organique.
- La **méthanation** permet de reformer du CH₄ selon les réactions suivantes :



Chaîne de procédé gazéification/Méthanation

Plaquette du projet GAYA, 2017. <http://www.projetgaya.com/en/>

Valorisation du syngas

- **Production de biohydrogène**

- Aujourd'hui, plus des 3/4 de l'hydrogène est produit à partir d'énergies fossiles par reformage d'hydrocarbures;
- La gazéification fait partie des procédés parmi les plus propres (avec l'électrolyse de l'eau et la méthanisation) permettant de produire un gaz riche en H₂.

Valorisation du syngas

- **Production de biohydrogène**

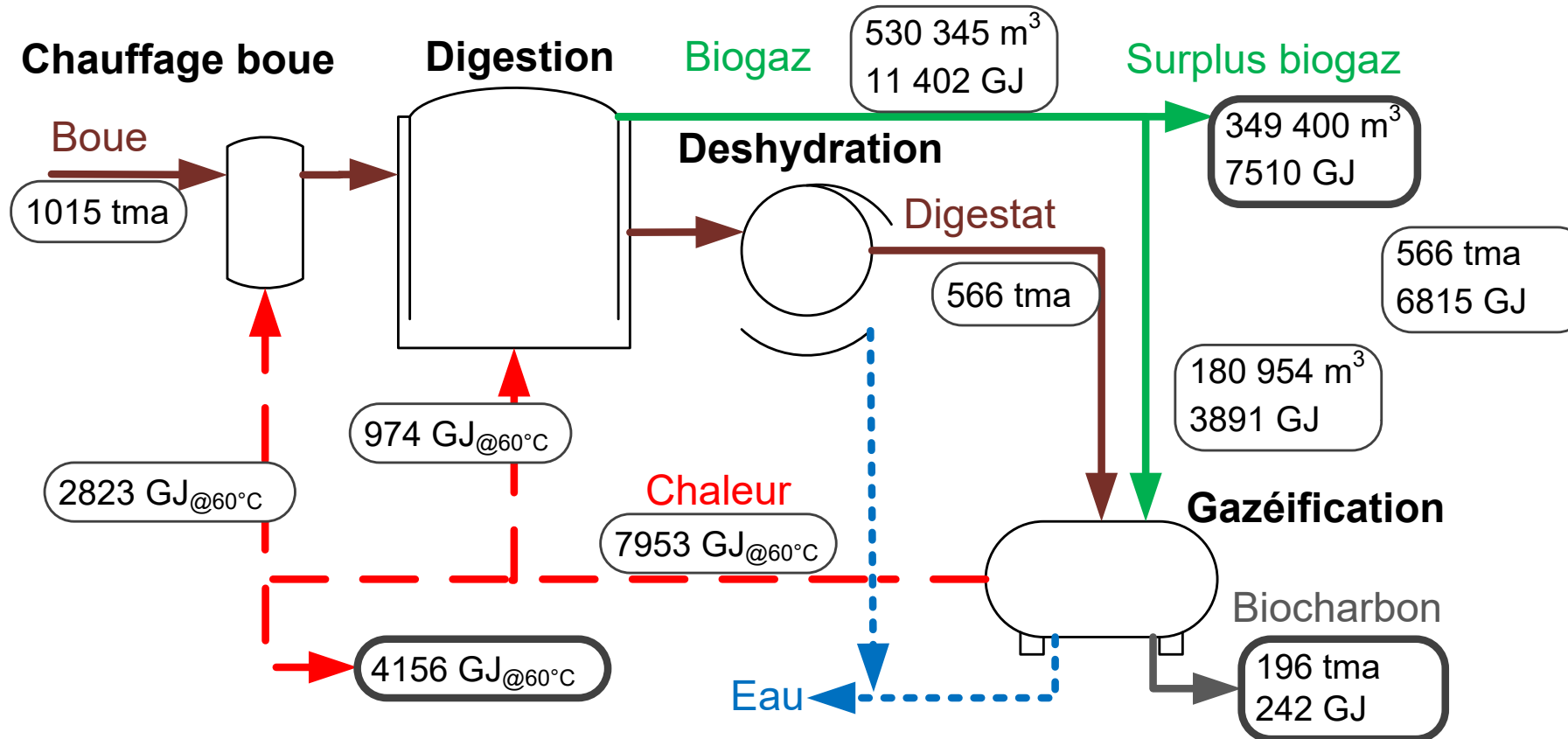
- Parmi les applications possibles de l'hydrogène citons :

- Injection dans le réseau de gaz naturel : l'hydrogène ne peut pas dépasser 6% de la masse totale du gaz. Le premier démonstrateur de « Power-to-gas » en France a été lancé en juin 2018 à Dunkerque.
 - Revente aux industriels : fabricants d'ammoniac et de méthanol.
 - Stockage d'énergie fixe pour la production d'électricité.
 - Stockage d'énergie pour la mobilité : alimentation des véhicules électriques à hydrogène.

Une présentation est disponible sur l'hydrogène dans le Module 4 – Vecteurs d'énergie

Valorisation du syngas

- Couplage théorique digestion anaérobie - gazéification



Tiré de la présentation de Nicolas Lacroix, 2019

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- La pyrolyse : préambule à la gazéification
- Description et origine
- Applications et approches
- Valorisation du syngas
- ***Projets et perspectives***
- Conclusion

Projets et perspectives

B&W Volund

- 400 000 tonnes/an
- Copenhague
- $\approx 25\%$ d'efficacité électrique
- Système de contrôle de pollution avancé
- Dépassements de coûts...
- Manque de déchets

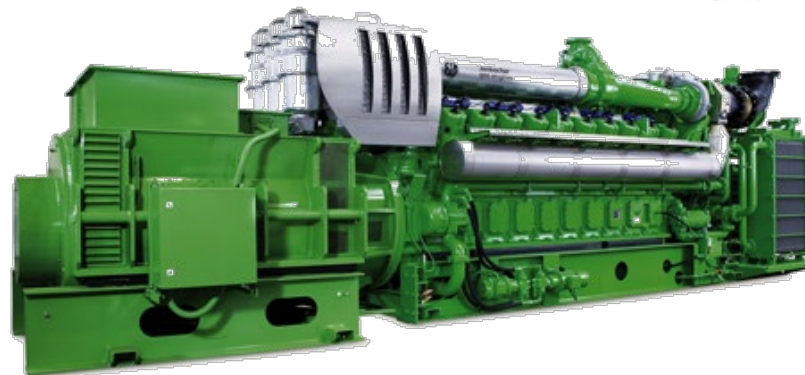
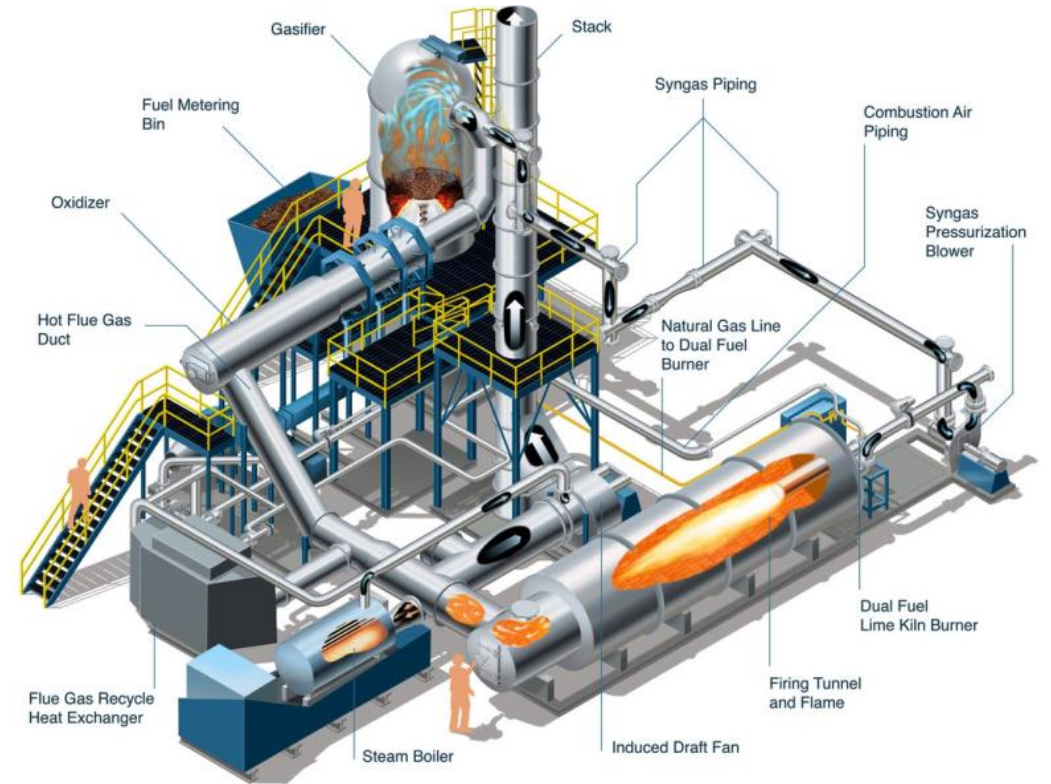


<https://www.youtube.com/watch?v=CHE0IZc8BtA>

Projets et perspectives

Nexterra

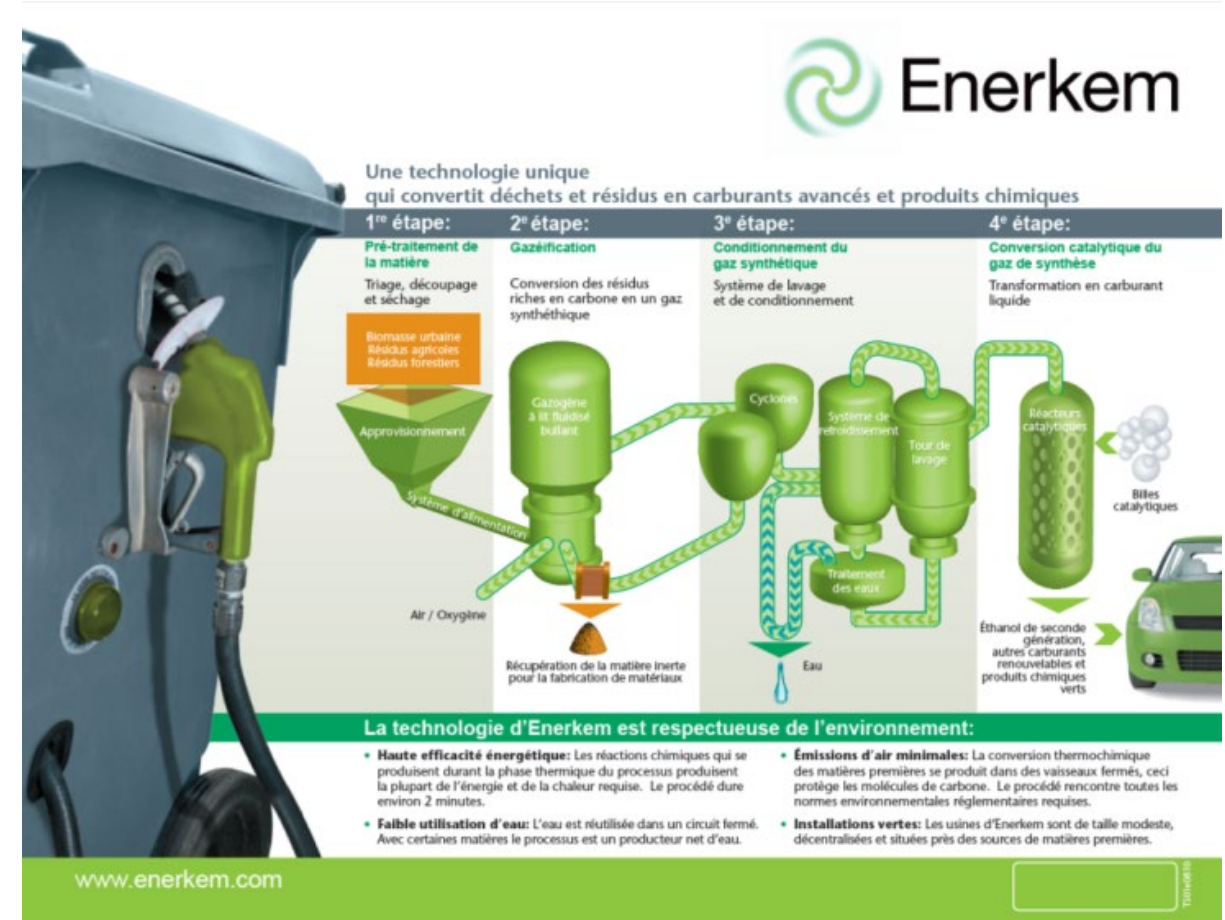
- Spécialisé pour la biomasse
- UBC, UNBC, Dockside green, Kruger, etc.
- Cogénération
- Vapeur : 40 000 lbs/hr
- 2 MW d'électricité
- 8000 tpa et + de résidus



Projets et perspectives

Enerkem

- Recherche à Sherbrooke
- Usine en construction à Edmonton
(38 million de litres d'alcool/an)
- Usine à Varennes prévue

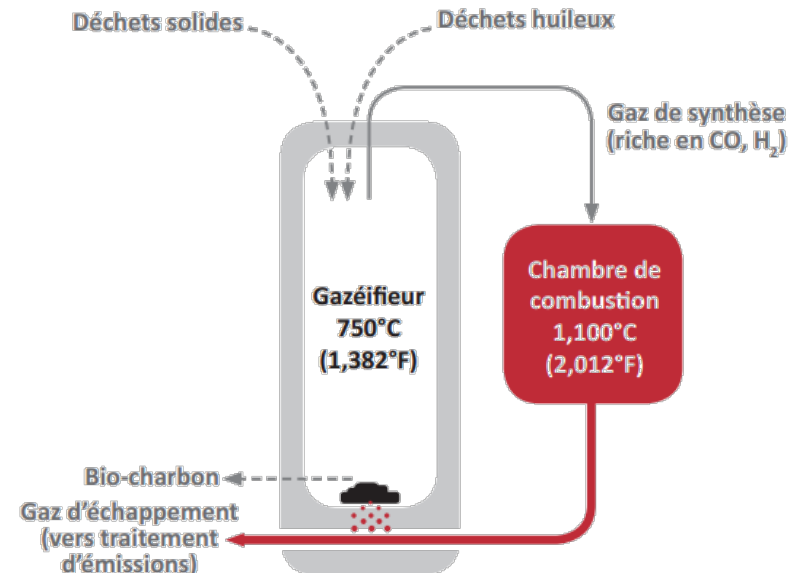


<https://www.youtube.com/watch?v=M01TfJAafSg>

Projets et perspectives

Terragon - MAGS

- Production de biocharbon
- 50 à 100 kW_{th}
- Traite huiles, déchets dangereux, résidus organiques, etc.
- Plusieurs projets en cours



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- La pyrolyse : préambule à la gazéification
- Description et origine
- Applications et approches
- Valorisation du syngas
- Projets et perspectives
- ***Conclusion***

Conclusion

Avantages

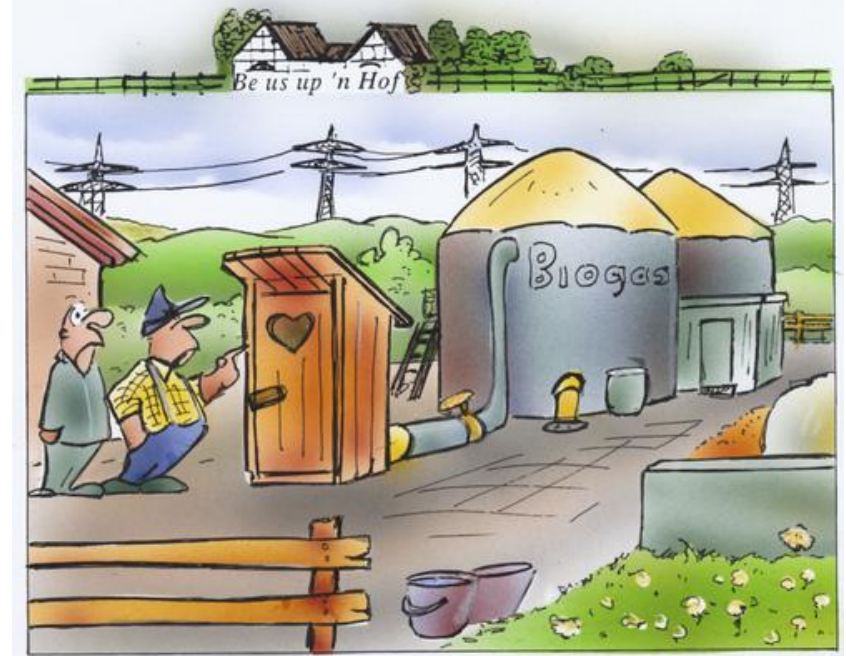
- Relativement propre si bien opéré
- Rapide et flexible
- Détruit les contaminants
- Bonne production d'énergie
- Remplacement des énergies fossiles

Inconvénients

- PCI du syngas faible devant celui du gaz naturel
- Carbone fossile libéré selon le combustible utilisé
- Technologie « nouvelle », encore peu connue et comportant peu d'investissement
- Disponibilité et qualité des combustibles

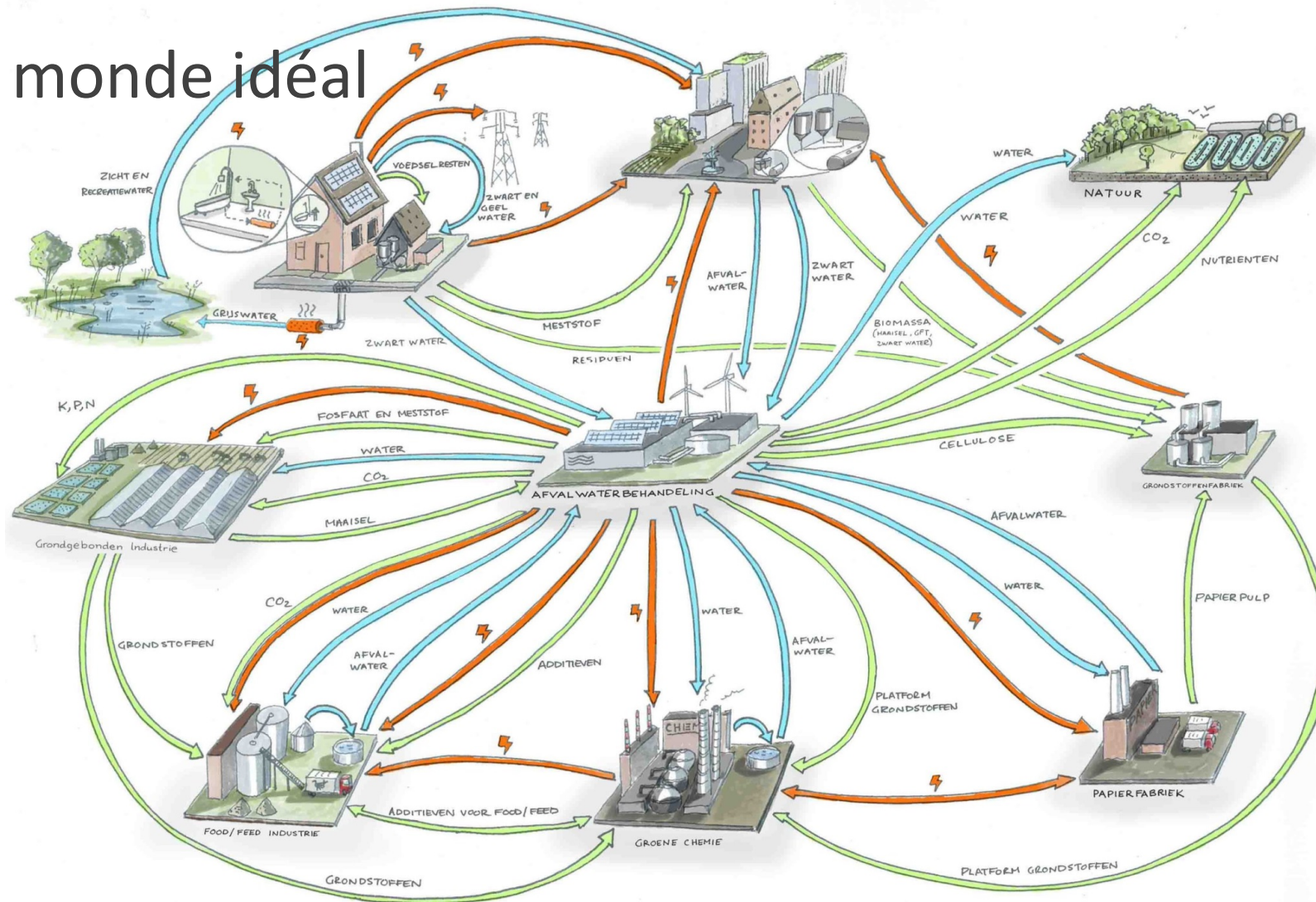
Conclusion

- La pyrolyse du bois et la gazéification sont des procédés anciens et étaient des industries très importantes avant l'avènement des combustibles bon marché tels que la houille, le pétrole et le gaz naturel;
- Solution d'avenir mais pas universelle;
- Substitut aux combustibles fossiles et réduction des émissions de GES.



Conclusion

- Dans un monde idéal



Vidéos sur le sujet

La poubelle province. 2014. Injustice Quebec. 51:19min

<https://www.youtube.com/watch?v=yt0eKz17A7g>

Gasification vs. Incineration. 2011. Global Syngas Technologies Council. 1:12min

<https://www.youtube.com/watch?v=bPRa31dS0vA>

Biomass Gasification and Waste Gasification. 2010. Global Syngas Technologies Council.
4:54min

<https://www.youtube.com/watch?v=PIyJ34boUeQ>

Bibliographie/médiagraphie

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz%C3%A9ification#Histoire>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse_du_bois
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Charbon_de_bois#cite_note-8
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse>
- <http://www.gazeification.info/>
- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>
- <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-laction/valorisation-energetique/dossier/pyrolyse-gazeification/position-lademe>
- <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>
- <https://www.naoden.com/gazeification/>
- Présentation de Nicolas Lacroix à l'ETS, *La gazéification et la digestion anaérobie*, 2019
- Plaquette du projet GAYA, 2017. <http://www.projetgaya.com/en/>
- <http://www.changingworldtech.com/index.html>
- Ricoul, François. (2016). Association d'un procédé de gazéification avec une pile à combustible haute température (SOFC) pour la production d'électricité à partir de biomasse, thèse Université de Nantes.
- Lorcet, Hélène. (2009). Contribution à l'étude et à la modélisation de la pyrogazéification de biomasse par plasma thermique, thèse Université de Limoges.

Bibliographie/médiagraphie

- Potvin, D. et F. Léveillé (2014). Étude sur le potentiel d'utilisation des matières organiques générées par l'agglomération de Québec, Rapport préliminaire, IRDA, 110 p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2011). Politique québécoise de gestion des matières résiduelles: plan d'action 2011-2015.
- MDDEP (2012). Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes: critères de référence et normes réglementaires.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) (2012). Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage (phase 2).
- MDDEFP (2013). Lignes directrices pour la planification régionale de la gestion des matières résiduelles.
- RECYC-QUÉBEC (2008). Fiches techniques à l'attention des élus municipaux : les matières organiques.
- RECYC-QUÉBEC (2013). Table de concertation sur le recyclage des matières organiques : plan d'action 2013-2015.
- RECYC-QUÉBEC (2014). Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/rapport-debouches-municipaux-mo.pdf>
- SOLINOV (2011). Étude de mise en marché en milieu agricole des produits des installations de traitement des matières organiques sur le territoire du Grand Montréal.
- SOLINOV (2012). Étude des marchés potentiels pour le compost qui sera produit par les centres de traitement des matières organiques de l'agglomération de Montréal.
- SOLINOV (2013). Portrait du gisement de résidus organiques de l'industrie agroalimentaire au Québec et estimation des aliments consommables gérés comme des résidus par les ICI de la filière de l'alimentation.

Bibliographie/médiagraphie

- <http://www.maharashtradirectory.com/Catalog/pacificincinerators/products.html>
- <http://www.technischweekblad.nl/Uploads/Images/Technisch-Weekblad-39-VAR-groot.jpg>
- <http://alternativefuels.about.com/od/researchdevelopment/a/gasification.htm>
- http://www.volund.dk/technologies_products/gasification/the_gasification_process
- http://www.emnrd.state.nm.us/emnrd/biomass/docs/GF_presentations/combppt-Klepper.pdf
- <http://www.ifa.ie/Sectors/Forestry/WoodEnergy.aspx>
- <http://green.autoblog.com/2007/10/16/exciting-new-fuel-for-1940-coal-gas/>
- <http://www.quote garden.com/environment.html>
- http://tcpermaculture.blogspot.ca/2011_07_01_archive.html
- <http://biomasse-annonpower.dalkia.com/version-texte/centrale-biomasse/chaudiere/>
- http://news.mongabay.com/bioenergy/2007_06_25_archive.html
- http://www.pentland-macdonald.com/contaminated_land.html
- http://eng.scrubber.su/?page_id=40
- http://www.imgbase.info/images/safe-wallpapers/digital_art/3d_space_scene/17867_3d_space_scene_burning_earth.jpg
- <http://pickenhamposts.blogspot.ca/2011/10/fair-wind-for-bio-digester.html>
- <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/48057.pdf>
- <http://www.adelaide.edu.au/biogas/history/>
- <http://www.techthefuture.com/energy/cow-poo-power/>
- <http://emergency-room-nurse.blogspot.ca/2012/02/putting-lipstick-on-pig.html>
- <http://inhabitat.com/south-korean-researchers-create-clean-biodiesel-from-sewage-sludge/>
- <http://www.pelicanpr.co.uk/uncategorized/two-out-of-three-aint-bad/>

Bibliographie/médiagraphie

- <http://www.lerefletdulac.com/Actualit%C3%A9s/Actualit%C3%A9%20r%C3%A9gionale/2012-03-16/article-2928783/La-collecte-du-bac-brun-debutera-le-16-avril/1>
- www.springer.com/.../9781461410393-c1.pdf?
- <http://www.greglasley.net/nonBirds/cypresswamp.html>
- Site de Bio-Methatech Bio-methatech.com
- <http://aqper.com/index.php/le-biogaz>
- Présentation de Mme Sophie Taillefer, Réseau Environnement, Colloque matières résiduelles, 3 novembre 2013.
- http://www.fcqged.org/pdf/doc_04.pdf
- <http://www.flickr.com/photos/siftnz/4169750713/>
- <http://www.ccibioenergy.com/projects/toronto-success/toronto-dufferin>
- Formation sur la biométhanisation envirocompétences (Éric Camirand)
- <http://www.theguardian.com/sustainable-business/big-brands-waste-reduction-pledges>
- <http://www.ecofoodrecycling.co.uk/wp-content/uploads/food-waste.jpg>
- <http://shoroc.com/e-waste/>
- http://www.gravityflow.com/wp/?page_id=8
- <http://www.biocycle.net/2012/03/14/anaerobic-digestion-in-the-northwest/>
- <http://www.pushingupdandelions.co.uk/wp-content/uploads/2012/10/manure-pile-location-unknown.jpg>
- <http://static1.squarespace.com/static/53c69521e4b037ac5e4c199d/t/53c73936e4b0b83abfc8fbcf/1405565324106/>
- <http://staffingadvisors.com/2009/09/09/the-invisible-200000-problem-in-your-recruiting-efforts/>
- <http://www.trendingenergy.com/wp-content/uploads/2013/05/QC-CA-1024x856.jpg>
- http://media.except.nl/media/cache/uploaded_images/asset_image/Overzicht_ALLNL_v2_pure_image.jpg



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

