

# **PYROLYSE ET GAZÉIFICATION**

## **DES PNEUS HORS D'USAGE**

### **Rapport final**

Présenté à Me Ginette Bureau,  
Vice-présidente, Société québécoise de récupération et de  
recyclage et directrice, programme de gestion intégrée  
des pneus hors d'usage du Québec

30 octobre 2001

Sylvain Léger, Ing.  
François Lafortune, Ph.D.

## Table des matières

Section 1 - Introduction . . . . .	1
Section 1.1 - Pyrolyse : définition et intérêt . . . . .	1
Section 1.2 - Gazéification : définition et intérêt . . . . .	3
Section 1.3 - Nouvelles technologies : est-ce vraiment le cas? . . . . .	4
Section 1.4 - Comparaison avec l'incinération . . . . .	5
Section 1.5 - Raisons pour utiliser les traitements thermiques . . . . .	6
Section 1.5.1 - Raisons pour utiliser la pyrolyse et la gazéification . . . . .	9
Section 2 - Application de la pyrolyse et de la gazéification . . . . .	11
Section 3 - Concepts technologiques . . . . .	16
Section 3.1 - Gazéification . . . . .	16
Section 3.2 - Pyrolyse . . . . .	24
Section 3.3 - Produits de la pyrolyse et de la gazéification . . . . .	28
Section 4 - Analyse économique . . . . .	32
Section 4.1 - Coût en capital investi . . . . .	32
Section 4.2 - Coûts d'opération . . . . .	34
Section 5 - Marchés pour les produits issus de la pyrolyse et de la gazéification . . . . .	35

Section 5.1 - Produits issus de la pyrolyse et de la gazéification des pneus	35
Section 5.2 - Marchés pour les produits issus de la pyrolyse et de la gazéification des pneus	37
Conclusion	47
Bibliographie	50
Annexes	66
Définitions	66
Acronymes et abréviations	71

## Liste des tableaux

Les principales motivations de marché envers le traitement thermique . . .	6
Facteurs économiques, environnementaux et politiques affectant le changement . . . . .	7
Facteurs affectant la demande pour des procédés de pyrolyse et de gazéification . . . . .	10
Application de la pyrolyse et de la gazéification par type de déchets . . .	11
Options technologiques pour traiter les pneus hors d'usage . . . . .	12
Exemples de procédés dans le secteur des pneus . . . . .	14
Types de réacteurs de gazéification . . . . .	18
Avantages et désavantages de différents types de gazogènes . . . . .	20
Réacteurs de pyrolyse. Méthode de chauffage et taux de chauffage . . .	25
Technologies de pyrolyse. Conditions de procédé et produits majeurs .	27
Exemple de facteurs de puissance . . . . .	33
Composition du gaz de synthèse . . . . .	36
Propriétés des huiles et des huiles pyrolytiques . . . . .	38
Propriétés des noirs de carbones et noirs pyrolytiques . . . . .	41
Composition des noirs pyrolytiques . . . . .	42
Valeur calorifique des noirs pyrolytiques . . . . .	44

## Liste des figures

Représentation schématique de la gazéification . . . . .	17
Effet de la température de gazéification sur les paramètres du procédé .	23
Représentation schématique de la pyrolyse . . . . .	24
Produits de transformation de la gazéification . . . . .	28
Produits de transformation de la pyrolyse . . . . .	30
Coût d'investissement en capital pour divers procédés . . . . .	32
Coût d'opération pour divers procédés . . . . .	34
Représentation schématique de la pyrolyse . . . . .	48

## **Section 1 - Introduction**

La présente étude présente un état de situation sur la mise en valeur des pneus hors d'usage par voie thermique, à l'exclusion de l'incinération.

Ainsi nous aborderons les concepts de pyrolyse et de gazéification, en faisant ressortir les aspects techniques sous-tendant ces deux types de technologie, ainsi que les aspects opérationnels de leur utilisation. Nous verrons aussi les produits résultant de leur utilisation, et des freins à leur pénétration de marché.

La présente étude est basée sur des recherches documentaires et des analyses de marché.

### **Section 1.1 - Pyrolyse : définition et intérêt**

Naturellement, on serait tenté de décrire la pyrolyse comme étant « le brûlage de matières résiduelles en absence d'air ». Quoique non adéquat en termes scientifiques, cette définition comporte tout de même l'essence du processus, qui est : le chauffage d'un matériau sous atmosphère contrôlée dans lequel il n'y a pas suffisamment d'oxygène pour initier une flamme de combustion. Ainsi, le matériau est fragmenté en substances qui peuvent servir de combustible. Par exemple, un type de pyrolyse transforme le charbon en charbon de bois. C'est un exemple de « pyrolyse lente », ou de carbonisation. La plupart des procédés de pyrolyse utilisant des matières résiduelles sont des procédés de « pyrolyse rapide » produisant des liquides pyrolytiques plutôt qu'un combustible solide.

De façon plus formelle, la pyrolyse conventionnelle est la

dégradation thermique de matériaux carbonés à des températures se situant entre 400 °C et 800 °C, en absence complète d'oxygène, ou en quantité tellement réduite que la gazéification n'a pas lieu à un taux important. De tels procédés volatilisent et décomposent la matière organique par la chaleur et non par le feu, d'où la confusion étymologique. En linguistique, il faudrait utiliser le vocable «thermolyse» (chaleur) plutôt que «pyrolyse» (feu). Mais l'usage en a décidé autrement. La thermolyse est principalement rencontrée dans les pays francophones, en France majoritairement.

Lorsqu'une matière résiduelle est brûlée dans un incinérateur moderne, le produit en ressortant est presque essentiellement de l'énergie. En pyrolyse, nous obtenons une fraction gazeuse, une fraction liquide, et un résidu solide, en des proportions variant selon le type de pyrolyse utilisé et les paramètres réactionnels. Conséquemment, il s'offre plusieurs possibilités de mise en valeur de ces produits. Par exemple, une de ces fractions peut être raffinée en produits recyclables, alors qu'une autre fraction peut produire de l'énergie. Nous verrons plus loin dans ce rapport quelques-unes de ces possibilités.

## **Section 1.2 - Gazéification : définition et intérêt**

Au cours de la gazéification, une partie du carbone présent dans la matière résiduelle est converti en produits gazeux, ne laissant qu'un solide, mélange de résidu inerte et de solide carboné. À la différence de l'incinération, cette dernière produit un gaz de CO<sub>2</sub> et d'eau (résultat de la combustion complète) alors qu'en gazéification, on vise à ne briser que partiellement les molécules pour générer un gaz riche en produits, que l'on appelle «gaz de synthèse». À titre d'exemple, pensons à la gazéification du charbon pour produire le «gaz de ville», tel que cela se faisait au début du siècle (Lasalle Coke).

Tout comme en pyrolyse, le gaz de synthèse produit peut servir à plusieurs usages, et ainsi la gazéification des matières résiduelles offre plus de flexibilité en ce qui a trait à la valeur ajoutée des produits que l'incinération. Le gaz de synthèse peut être purifié et utilisé comme intrant pour l'industrie pétrochimique, ou il peut être entreposé et utilisé comme combustible.

### **Section 1.3 - Nouvelles technologies : est-ce vraiment le cas?**

Plusieurs développeurs/entrepreneurs clament «un procédé nouveau de traitement thermique» ou «technologie émergente». Dans les faits, la pyrolyse et la gazéification ne sont pas de nouveaux concepts, toutes deux étant utilisées depuis de nombreuses années. Le plus grand essor quant aux procédés de gazéification, principalement du charbon, eut lieu dans les années '70 et '80 en réaction aux deux crises du pétrole, afin de produire des combustibles «stratégiques» et des alternatives énergétiques au pétrole brut.

La motivation à appliquer la gazéification aux matières résiduelles a émergé avec l'accroissement de la prise de conscience de la problématique liée aux matières résiduelles, dont les volumes disponibles à l'enfouissement s'amenuisant, la contamination des eaux souterraines due aux lixiviats des sites d'enfouissement, et les problèmes techniques associés aux premiers procédés d'incinération des matières résiduelles (émission atmosphériques, gestion des cendres, etc.).

La production d'énergie à partir de matières résiduelles a pris un essor au milieu des années '80, alors que l'on était sous l'impression que l'énergie peu coûteuse et abondante était chose du passé. Plusieurs procédés furent alors développés, mais durent fermer car non économiques et/ou non fiables. Aujourd'hui, ces concepts émergent de nouveau, comme potentiellement «meilleurs» et «plus acceptables» que l'incinération.

## **Section 1.4 - Comparaison avec l'incinération**

L'incinération conventionnelle fait appel à un excès d'air pour les réactions de combustion et d'oxydation, alors que la pyrolyse et la gazéification sont opérées soit en absence d'air (pyrolyse) ou en oxydation partielle, à un niveau sous-stoéchiométrique (gazéification).

Les principes sous-tendant les technologies de pyrolyse et de gazéification seront décrits plus loin (section 3).

La raison principale pour laquelle ces procédés sont considérés aujourd'hui est que l'incinération est impopulaire et que les utilisateurs et les preneurs de décision regardent pour des alternatives «plus acceptables». Mais, au-delà de cela, il y a plusieurs tendances technologiques et forces du marché qui, ensemble, accroissent l'intérêt pour la pyrolyse et la gazéification.

## **Section 1.5 - Raisons pour utiliser les traitements thermiques.**

Dans l'encadré qui suit, on énonce les raisons principales qui font en sorte que le traitement thermique est en croissance, que ce soit l'incinération, la pyrolyse ou la gazéification.

### **Les principales motivations de marché envers le traitement thermique**

- < réduction de volume des matières résiduelles;
- < rend la matière résiduelle sécuritaire et inerte;
- < récupère une valeur économique de la matière résiduelle (principalement sous forme d'électricité);
- < motivation envers le développement durable conduisant à des initiatives en réutilisation et en recyclage;
- < la filière énergétique de la matière résiduelle est complémentaire au recyclage;
- < méthode pratique en gestion des quantités croissantes de matières résiduelles;
- < détournement de matière résiduelle de l'enfouissement;
- < manque chronique d'espace d'enfouissement dans certains pays et manque appréhendé à court terme dans d'autres;
- < instruments économiques et fiscaux (par exemple, tarifs d'accueil au site d'enfouissement; subventions pour énergie alternative).

Les changements peuvent être compris en regard des facteurs globaux suivants:

<b>Facteurs économiques, environnementaux et politiques affectant le changement</b>	
Environnement	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; plus grande importance accordée à l'environnement par la société;</li><li>&lt; emphase sur le développement durable des pratiques environnementales dans les sociétés industrialisées;</li><li>&lt; nouvelles initiatives des Nations Unies et autres niveaux de gouvernement quant au réchauffement de la planète et la réduction de la pollution;</li><li>&lt; emphase accrue sur le recyclage.</li></ul>
Lois et règlements	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; contrôle sur l'utilisation des sites d'enfouissement;</li><li>&lt; modifications des lois et règlements;</li><li>&lt; objectifs de réduction d'émission de gaz à effet de serre;</li><li>&lt; responsabilité du producteur en regard des déchets post-consommation;</li><li>&lt; contrôles plus serrés sur la disposition des boues.</li></ul>
Économie	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; augmentation continue des coûts de traitement;</li><li>&lt; utilisation des instruments économiques (taxes, subventions) qui affectent le changement;</li><li>&lt; coût plus élevé des matières premières;</li><li>&lt; déréglementation de l'électricité permettant à des producteurs d'énergie à partir de déchets de se connecter sur les réseaux, rendant ainsi les projets plus viables;</li><li>&lt; prêts spéciaux des pays développés vers les pays sous-développés pour des projets environnementaux.</li></ul>
Gestion des ressources	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; manque de place pour des nouveaux sites d'enfouissement dans plusieurs pays;</li><li>&lt; plus de tri des déchets en fractions discrètes pour des gestions particulières.</li></ul>

<b>Facteurs économiques, environnementaux et politiques affectant le changement</b>	
---	--

Technologie	< développement de nouveaux procédés de traitement des déchets.
-------------	---

### **Section 1.5.1 - Raisons pour utiliser la pyrolyse et la gazéification**

Malgré que l'incinération des déchets pour produire de l'énergie soit la technologie thermique la plus répandue, elle a toujours plusieurs désavantages, et non le moindre, son image publique négative. Ainsi l'incinération engendre de l'hostilité au niveau local (syndrome «pas dans ma cour») qui peut résulter en une incompatibilité entre les politiques nationales qui encouragent les projets générateurs d'énergie et les difficultés au niveau local à trouver des sites appropriés pour recueillir de tels projets.

Les entreprises qui développent de nouvelles technologies de traitement thermique tentent de capitaliser sur ces rejets de l'incinérateur, devenant ainsi leur argument majeur de marché. Toutefois, ces entreprises doivent se positionner clairement comme étant différentes de celles prônant l'incinération. Pour cette raison, en général la littérature marketing mentionne «notre procédé n'est pas de l'incinération».

Quoique le public et les politiciens puissent mieux accepter les entreprises présentant chaque technologie comme «une nouvelle solution sophistiquée à la gestion des déchets», il n'est pas encore certain qu'un groupe d'individus s'opposant à l'incinération ne s'opposera pas à une usine de pyrolyse ou de gazéification. En d'autres termes, est-ce que le syndrome «pas dans ma cour» ne s'appliquera pas aussi à ce genre de technologie?

Les coûts liés à l'incinération augmentent. Comme les normes environnementales se resserrent et que l'on requiert les meilleures technologies, la complexité des usines a augmenté et ainsi en est-il des coûts en capital investi et des coûts d'opération. Aujourd'hui, une installation moderne d'incinération de déchets produisant de l'énergie peut coûter de 30 à 100 millions de dollars US et présenter des coûts d'opération de 50 à 100 dollars par tonne. Ces faits militent en faveur d'alternatives telles la pyrolyse et la gazéification.

<b>Facteurs affectant la demande pour des procédés de pyrolyse et de gazéification</b>	
<b>Demande accrue</b>	<b>Demande décroissante</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; désir de récupérer des produits ayant une certaine valeur et/ou de l'énergie;</li><li>&lt; image négative de l'incinération;</li><li>&lt; perception que les nouveaux procédés sont plus «verts» et de haute technologie;</li><li>&lt; contraintes à enfouir les déchets;</li><li>&lt; plus petites cheminées;</li><li>&lt; augmentation des coûts et des normes liées à la disposition des résidus d'incinération;</li><li>&lt; compatibilité avec le recyclage (résidus stables);</li><li>&lt; efforts de marketing des fournisseurs.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; technologie relativement «non éprouvée»;</li><li>&lt; nature conservatrice de l'industrie;</li><li>&lt; l'incinération à grands volumes est éprouvée;</li><li>&lt; technologie à lit fluidisé acquiert son acceptation dans de nombreux pays;</li><li>&lt; manque d'historique commercial chez plusieurs fournisseurs;</li><li>&lt; manque de connaissances de plusieurs procédés auprès de clients potentiels.</li></ul>

## Section 2. - Application de la pyrolyse et de la gazéification

Au cours des dernières années, la pyrolyse et la gazéification ont trouvé leur niche auprès de plusieurs sources d'intrants.

<b>Application de la pyrolyse et de la gazéification par type de déchets</b>	
Municipal	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; déchets solides municipaux</li><li>&lt; boues d'usine d'épuration (aussi considérée comme biomasse)</li><li>&lt; déchets provenant de centre de tri</li></ul>
Industriel	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; pneus</li><li>&lt; boues fortement chargées de métaux</li><li>&lt; boues de papetières</li><li>&lt; solvants usés</li><li>&lt; huiles hors norme et contaminées</li><li>&lt; déchets commerciaux mélangés et déchets toxiques</li><li>&lt; restauration de sols contaminés</li><li>&lt; résidus de raffinerie</li><li>&lt; sables de fonderie</li></ul>
Déchets post-consommation	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; plastiques mélangés</li><li>&lt; fluff automobile</li><li>&lt; résidus de déchetage d'équipements électriques et électroniques</li></ul>
Agricole	<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; déchets de l'industrie forestière</li><li>&lt; déchets de culture</li><li>&lt; litières de poulets et de porc</li><li>&lt; jacinthes d'eau et autres herbes envahissantes</li><li>&lt; semences contaminées</li></ul>

La disposition de pneus usés est un sujet d'importance en gestion des déchets. La société est à la recherche de méthodes environnementalement acceptables et économiques de gestion de ces pneus hors d'usage. Il y a donc un potentiel certain pour la pyrolyse et la gazéification.

L'expérience démontre que l'enfouissement des pneus conduit à un niveau de risque inacceptable quant à des incendies possibles. Une fois allumé, un pneu peut difficilement être éteint (rappelons-nous l'incendie de Saint-Amable). C'est une des raisons qui ont amené les décideurs à bannir de l'enfouissement les pneus hors d'usage.

Des méthodes alternatives ont été développées au cours des dernières années afin de récupérer et de recycler des produits issus des pneus hors d'usage.

<b>Options technologiques pour traiter les pneus hors d'usage</b>		
Physique	pneu entier	< barrières (murs en course automobile) < brise-vague (mer) < clôtures (sur les fermes)
	rechapage	< nouveau pneu
	poudrette	< additif à l'asphalte < tapis de ferme < tapis athlétique
	cryogénie	< poudrette < métal
Thermique	co-combustion en cimenterie; bouilloire pour production électrique	< énergie
	incinération spécialisée	< énergie et métaux
	pyrolyse	< noir pyrolytique < métal < huile pyrolytique et < gaz de synthèse

<b>Options technologiques pour traiter les pneus hors d'usage</b>		
	pyrolyse et gazéification	< noir pyrolytique < métal < gaz de synthèse
	gazéification	< noir pyrolytique < métal < gaz de synthèse

Plusieurs pneus sont valorisés comme co-combustible dans les cimenteries, ce qui est particulièrement le cas aux États-Unis et en Europe de l'Ouest. Au Japon, les pneus sont généralement incinérés avec les déchets solides dans des incinérateurs municipaux.

Plusieurs incinérateurs spécialisés ont eu des difficultés opérationnelles et technologiques, et ont été abandonnés depuis, ne réussissant pas à faire leurs frais.

L'effet global des problèmes associés à l'incinération ou à la co-combustion en cimenterie des pneus hors d'usage a été de créer une mauvaise réputation à la destruction thermique de pneus hors d'usage. Ceci a un impact certain sur la pyrolyse et la gazéification. Pour cette raison, les entrepreneurs tendent à se distancer de la combustion en tentant de démontrer :

- < fiabilité opérationnelle basée sur une usine de démonstration;
- < données d'émissions atmosphériques par un laboratoire indépendant;
- < économie du procédé viable qui ne repose pas sur des prix exorbitants pour les sous-produits (noir pyrolytique, métal, huile pyrolytique).

Plusieurs entrepreneurs ont reconnu le potentiel du marché du pneu et ainsi poursuivent des projets spécifiques en utilisant des technologies optimisées pour ce type d'intrants.

<b>Exemples de procédés dans le secteur des pneus</b>			
<b>Entrepreneur</b>	<b>Pays</b>	<b>Type de procédé</b>	<b>Statut</b>
Alcyon Engineering	Suisse	Pyrolyse	semi-commercial 36 ktpa
Ande Scientific	Grande Bretagne	Pyrolyse	Laboratoire
Beven Recycling	Grande Bretagne	Pyrolyse	Démonstration 3-4 ktpa, 2.5 M USD
BPI	Grande Bretagne	Pyrolyse + combustion	Démonstration
Conrad industries	USA	Pyrolyse	Démonstration
Hebco	Canada	Pyrolyse	Laboratoire/sem ble arrêté
Pyrovac	Canada	Pyrolyse sous vide	Pilote/semble avoir délaissé le domaine des pneus
RGR Ambiente	Italie	Pyrolyse	Pilote
Traidec	France	Pyrolyse	Commercial

Les procédés varient quant au mode d'introduction des pneus dans la chambre de pyrolyse, et quant à la dimension des intrants (pneus entiers ou déchiquetés). La plupart prétendent récupérer du noir pyrolytique commercialement vendable, mais la pureté et la reproductibilité sont variables, et, par voie de conséquence, pouvant représenter un frein pour le marché.

Le même raisonnement s'applique au métal qui aurait trop de contamination par des produits carbonés pour trouver preneur auprès de recycleurs/utilisateurs.

Quelques-uns de ces procédés utilisent le gaz de synthèse produit pour alimenter leur propre procédé en énergie, alors que d'autres utilisent l'huile pyrolytique produite à cette fin. Dans tous les cas, deux des difficultés majeures à considérer sont l'exclusion de l'oxygène (étanchéité) et la prévention de formation de goudrons à l'intérieur du procédé.

## **Section 3 - Concepts technologiques**

### **Section 3.1 - Gazéification**

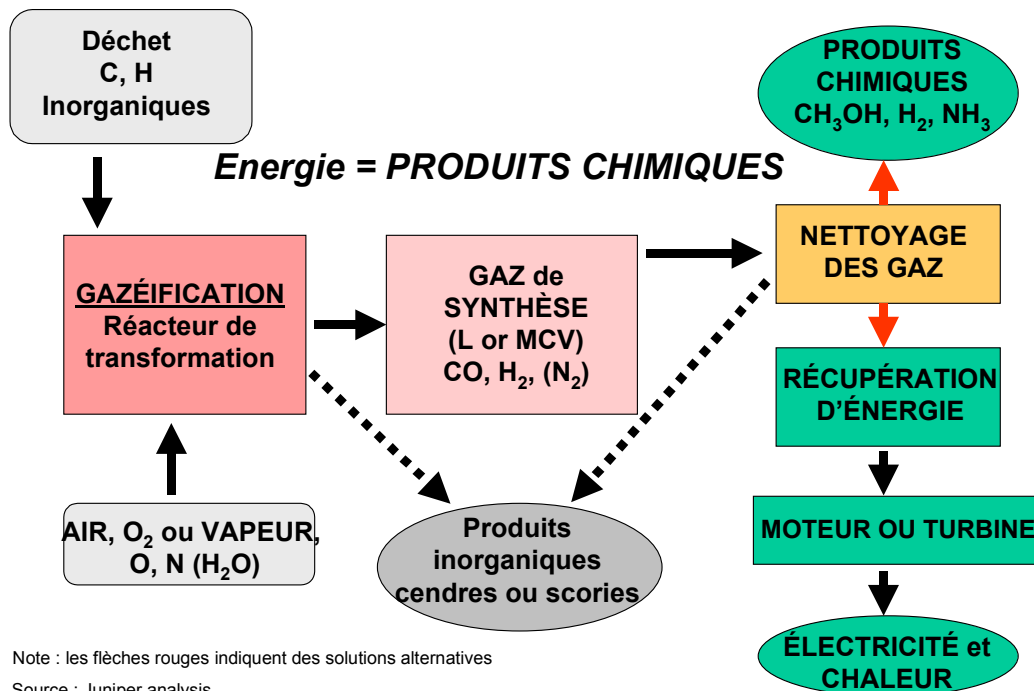
Les développements majeurs dans les procédés de gazéification ont eu lieu dans les années '70 et '80 en réponse aux deux crises pétrolières. Les développements d'alors ont surtout utilisé le charbon comme combustible, afin de fournir une source stratégique d'énergie alternative au pétrole brut.

L'élan vers l'application de la gazéification aux déchets domestiques et autres déchets a pris forme en vertu de la prise de conscience de leurs impacts environnementaux, de la diminution des volumes disponibles à l'enfouissement, de la contamination des eaux souterraines par les sites d'enfouissement et des problèmes techniques liés aux premières applications de la combustion à l'incinération des déchets. La production d'énergie à partir des déchets domestiques a pris de l'ampleur au milieu des années '80 alors que l'on croyait que l'énergie bon marché et abondante était un concept du passé.

La gazéification est un procédé de traitement thermique, dans lequel la plus grande partie du carbone est transformée en gaz (gaz de synthèse), laissant un résidu inerte, par combustion partielle d'une partie du combustible avec de l'air, ou de l'oxygène pur, ou avec de l'air enrichi par de l'oxygène, ou, finalement, par de la vapeur d'eau à contre-courant. Des températures relativement élevées sont utilisées, 900 - 1100°C avec l'air, et 1000 - 1400°C avec l'oxygène. La gazéification avec l'air est la technologie la plus courante. C'est plus économique mais donne un gaz de synthèse relativement pauvre, car contenant jusqu'à 60% d'azote (inerte), et présentant une valeur calorifique de 4 - 6 MJ/m<sup>3</sup>(TPN). La gazéification utilisant l'oxygène rend un gaz de meilleure qualité énergétique (10 - 18 MJ/m<sup>3</sup>(TPN)), mais évidemment, requiert l'oxygène pur pour ce faire, ce qui s'avère plus dispendieux.

En gazéification, le contenu énergétique du déchet est transféré à la phase gazeuse sous forme d'énergie chimique qui peut à son tour être réutilisée comme source de produits chimiques, ou comme source d'énergie via un processus additionnel.

## Représentation schématique de la gazéification



Un procédé de gazéification est une combinaison d'étapes successives :

- 7 séchage par ajout de chaleur pour enlever la vapeur d'eau du déchet solide
- 7 pyrolyse par ajout de chaleur pour volatiliser les composantes organiques et produire les gaz de synthèse. Produit aussi des goudrons volatils et laisse un solide (*char*), le noir pyrolytique
- 7 gazéification du noir pyrolytique et des goudrons pyrolytiques, et amélioration des gaz de synthèse par oxydation partielle des produits hydrocarbonés de hauts poids moléculaires

Plusieurs types de réacteur ont été utilisés pour la gazéification. Ceux-ci sont regroupés selon le mode de contact gaz/solide, tel que décrit au tableau qui suit:

<b>Types de réacteurs de gazéification</b>	
<b>Type de réacteur</b>	<b>Mode de contact</b>
<b>Lit fixe</b>	
Descendant	le solide descend, le gaz descend, i.e co-courant
Ascensionnel	le solide descend, le gaz monte, i.e. contre-courant
Co-courant	solide et gaz dans le même sens, p.ex. descendant (vers le bas), mais pourraient tous deux monter
Contre-courant	solide et gaz en direction opposée, p.ex. ascensionnel, mais les directions d'écoulement pourraient être inversées
Diagonal	le solide descend, le gaz se déplace à angle droit (i.e. horizontalement)
Variantes	lits agités; gazogène à deux cellules
<b>Lit fluidisé</b>	
Lit à bulles	vitesse des gaz relativement faible, les solides inertes restent dans le réacteur
Lit circulant	Le solide inerte est éluutrié, séparé et recirculé
Lit entraîné	Habituellement il n'y a pas de solides inertes; présente une grande vitesse des gaz ; peut être utilisé comme un réacteur cyclonique

<b>Types de réacteurs de gazéification</b>	
<b>Type de réacteur</b>	<b>Mode de contact</b>
Réacteurs jumelés	la gazéification à vapeur et/ou la pyrolyse a lieu dans le premier réacteur, et le résidu carboné est transféré dans le second réacteur où il subit une combustion pour fournir l'énergie pour chauffer le médium de fluidisation pour la recirculation. Un lit fluidisé à bulles est généralement utilisé comme chambre de combustion.
<b>Lit mobile</b>	transport mécanique du solide, habituellement horizontalement. Typiquement utilisé pour des procédés à basses températures comme la pyrolyse
Variantes	cellules multiples; lit mobile horizontal ; cellules inclinées ; four à vis ou à vrille
<b>Autres</b>	
Four rotatif	procure un bon contact solide/gaz
Réacteurs cycloniques ou à vortex	utilise l'attrition et l'abrasion avec des vitesses de particules élevées pour engendrer de hauts taux de réaction
Plasma	Température de réaction de l'ordre de 3 000 °C. Gaz de synthèse et résidu vitrifié ( <i>slag</i> )

Les réactions intervenant en gazéification et la distribution relative des produits de réaction dépendent des paramètres suivants :

- 7 Granulométrie et distribution granulométrique
- 7 Taux d'humidité
- 7 Mode de contact gaz/solide

- 7 Pression
- 7 Taux de chauffage
- 7 Température et profil de température
- 7 Temps de résidence

Pour obtenir de hauts taux de conversion du carbone et une faible teneur en goudron dans le gaz de synthèse, une température d'opération élevée est souhaitée. Toutefois, plusieurs autres facteurs limitent cette température d'opération :

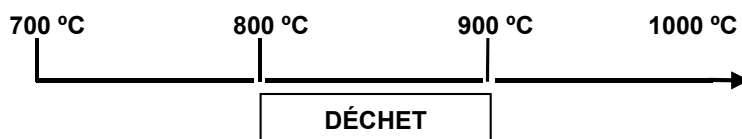
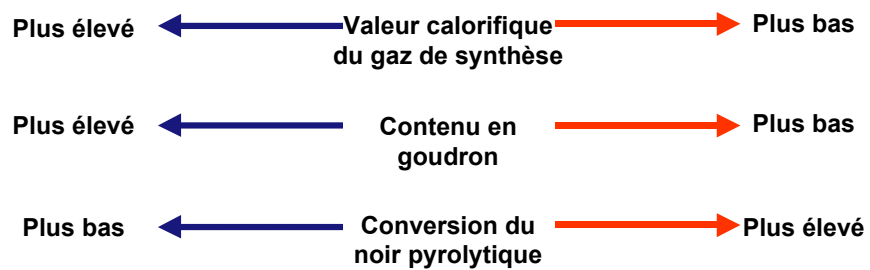
- 7 la possibilité que les cendres se volatilisent, surtout pour des combustibles à forte proportion de composés inorganiques (p.ex. les pneus)
- 7 la valeur calorifique du gaz de synthèse qui dépend de sa composition
- 7 des problèmes avec les réfractaires des réacteurs

<b>Avantages et désavantages de différents types de gazogènes</b>		
<b>Type de gazogène</b>	<b>Avantages</b>	<b>Désavantages</b>
Descendant	Haut taux de conversion du carbone	faible capacité nominale
	Faible production de goudron	requiert une alimentation de granulométrie uniforme
	peu d'entraînement de cendres	formation de scories sur la grille
	temps de résidence élevé des solides	requiert des combustibles secs
	construction simple	faible plage d'opération

<b>Avantages et désavantages de différents types de gazogènes</b>		
<b>Type de gazogène</b>	<b>Avantages</b>	<b>Désavantages</b>
Ascensionnel	Efficacité thermique élevée	Beaucoup de goudron dans le gaz de synthèse
	Non dépendant de la taille du combustible	Plus de 20 % de l'énergie dans le goudron
	Une alimentation à plus de 50% d'humidité est possible	faible rendement en hydrogène et monoxyde de carbone
	aucun problème de dimensionnement	Un craquage catalytique des goudrons est requis comme traitement
Lit fluidisé à bulles	bon contact gaz/solide et bon mélange	perte de carbone avec les cendres
	capacité calorifique spécifique élevée	pré-conditionnement de l'alimentation requis
	bon contrôle de température	limites de tailles
	peut tolérer des variations dans la qualité du combustible	
	bonne plage d'opération	
	facilité de mise en marche et d'arrêt	

<b>Avantages et désavantages de différents types de gazogènes</b>		
<b>Type de gazogène</b>	<b>Avantages</b>	<b>Désavantages</b>
Lit entraîné	Génère un gaz de synthèse sans goudrons	scories des cendres
	le gaz de synthèse contient peu de méthane	carbone perdu avec les cendres
	haut taux de conversion	l'alimentation doit être réduite en dimensions et être sous forme de suspension liquide
		contact gaz/solide pauvre
		matériaux spéciaux requis
		opération à pression élevée
		problèmes de sécurité

### Effet de la température de gazéification sur les paramètres du procédé

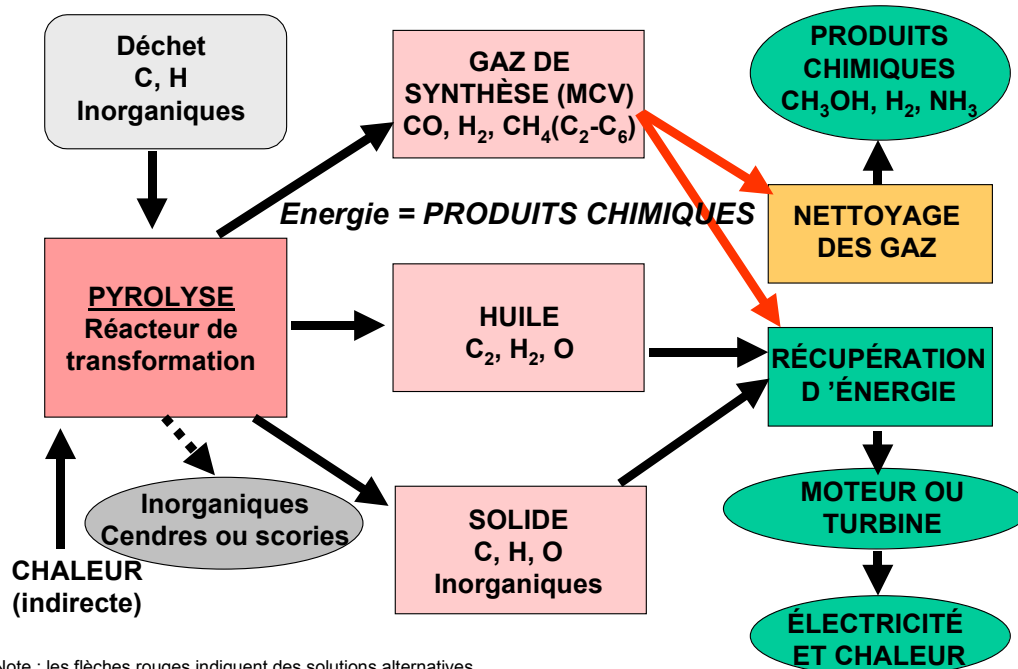


### Section 3.2 - Pyrolyse

La pyrolyse est la dégradation thermique de matériaux carbonés à des températures allant de 400 à 800°C, soit en absence totale d'oxygène, ou en si faible quantité que la gazéification n'a lieu qu'à une très faible part. De tels procédés volatilisent et décomposent le solide organique par la chaleur ; conséquemment, aucune combustion n'est possible.

Les produits issus de la pyrolyse comprennent toujours du gaz, du liquide et un solide, le noir pyrolytique, en proportions relatives variant selon la méthode de pyrolyse et les paramètres réactionnels, tels la température et la pression. Des températures basses produisent plus de liquide et de plus hautes températures plus de gaz de synthèse. Toutefois des processus ultérieurs peuvent convertir l'un vers l'autre (gaz → liquide ou liquide → gaz).

#### Représentation schématique de la pyrolyse



Note : les flèches rouges indiquent des solutions alternatives  
Source : Juniper analysis

La thermolyse lente (carbonisation) requiert une réaction lente à faible température pour maximiser le rendement en résidu carboné.

La thermolyse rapide ou flash est utilisée pour maximiser soit le gaz ou le liquide. Le gaz est de valeur calorifique moyenne (13-21 MJ/m<sup>3</sup>(TPN)) et les liquides, souvent appelés huiles pyrolytiques sont des mélanges très complexes d'hydrocarbures qui peuvent être subséquemment traités pour les convertir en produits chimiques ou en puissance et chaleur.

La pyrolyse diffère de la gazéification et de la combustion, qui sont habituellement des réactions auto-thermiques. La pyrolyse est endothermique, requérant un apport d'énergie, généralement appliqué indirectement à travers les parois du réacteur.

<b>Réacteurs de pyrolyse Méthodes de chauffage et taux de chauffage</b>			
<b>Type de réacteur</b>	<b>Méthode de chauffage</b>	<b>Mode de transfert de chaleur</b>	<b>Taux de chauffage</b>
Sublimation	Surface chaude	Direct	Élevé
Cyclonique	Combustion du gaz formé	Direct	Élevé
	Chauffage des parois	Indirect	Faible
Lit fluidisé	Produits de combustion	Direct	Élevé
	Gaz recyclé chauffé	Direct	Élevé
	Gazéification partielle	Direct	Élevé

<b>Réacteurs de pyrolyse Méthodes de chauffage et taux de chauffage</b>			
<b>Type de réacteur</b>	<b>Méthode de chauffage</b>	<b>Mode de transfert de chaleur</b>	<b>Taux de chauffage</b>
	Tubes à fumée	Indirect	Modéré
Écoulement entraîné	Produits de combustion	Direct	Élevé
	Sable chaud recyclé	Indirect	Élevé
Lit fixe	Produits de combustion	Direct	Faible
	Gaz recyclé chauffé	Indirect	Faible
	Gazéification partielle	Direct	Faible
Lit se déplaçant horizontalement	Produits de combustion	Direct	Faible
	Combustion des gaz produits	Indirect	Faible
Four rotatif	Chauffage des parois	Indirect	Faible
Transport	Sable chaud	Direct	Élevé
Vortex	Chauffage des parois	Indirect	Élevé

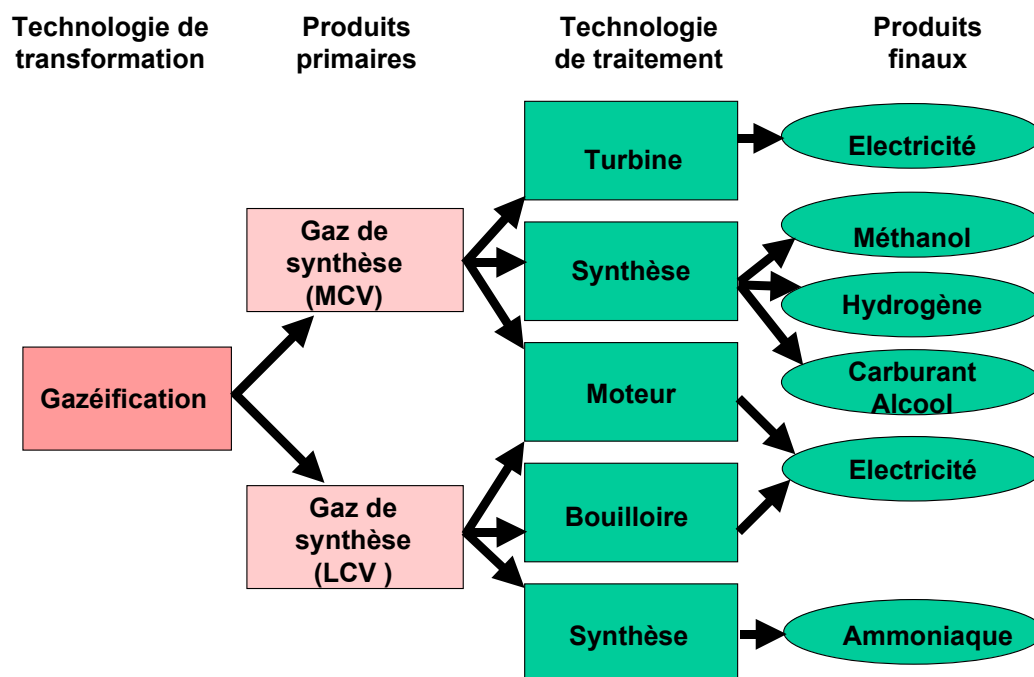
<b>Technologies de pyrolyse Conditions de procédé et produits majeurs</b>				
<b>Technologie</b>	<b>Temps de résidence</b>	<b>Taux de chauffage</b>	<b>Température °C</b>	<b>Produits majeurs</b>
Carbonisation	Heures - jours	Très lent	300 - 500	Charbon
Carbonisation sous pression	15 min - 2 h	Modéré	450	Charbon
Pyrolyse conventionnelle	Heures	lent	400 - 600	Noir pyrolytique, liquides, gaz de synthèse
	5 - 30 min	Modéré	700 - 900	Noir pyrolytique, gaz de synthèse
Pyrolyse sous vide	2 - 30 s	Modéré	350 - 450	Liquides
Pyrolyse flash	0,1 - 2 s	Élevé	400 - 650	Liquides
	< 1 s	Élevé	650 - 900	Liquides, gaz de synthèse
	< 1 s	Très élevé	1000 - 3000	Gaz de synthèse

### Section 3.3 - Produits de la pyrolyse et de la gazéification

La pyrolyse et la gazéification ont été utilisées avec les déchets solides et plusieurs approches ont été développées utilisant diverses combinaisons de technologies qui se regroupent en deux catégories :

- 7 l'utilisation de la pyrolyse ou de la gazéification pour générer un gaz chaud duquel de la vapeur et ensuite de l'électricité sont générées dans un procédé intégré
- 7 l'utilisation de la pyrolyse ou de la gazéification pour produire un gaz de synthèse qui est refroidi et purifié avant la génération directe d'électricité par des moteurs à gaz

#### Produits de transformation de la gazéification



Source : Juniper analysis

Les produits de la gazéification varieront selon la configuration du réacteur et le type d'oxydant utilisé. Le gaz de synthèse peut être utilisé pour diverses applications utiles et rentables :

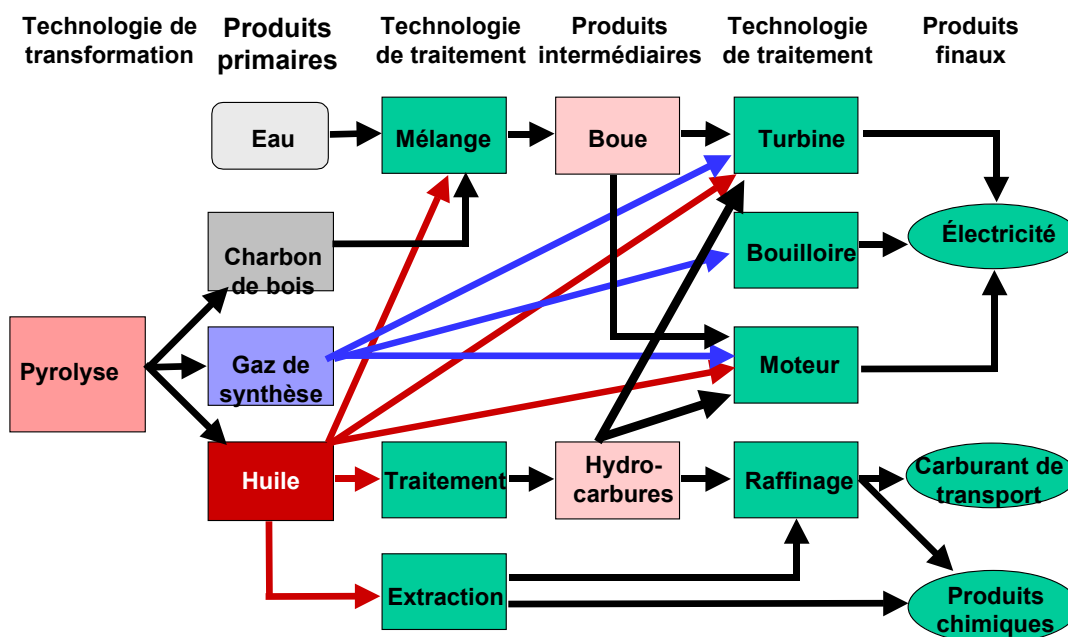
- 7 produits chimiques, tels l'hydrogène, le méthanol, et l'ammoniaque
- 7 carburants pour véhicules (alternative au pétrole)
- 7 électricité

De façon similaire, les produits de la pyrolyse (liquide, gaz et noir pyrolytique) peuvent engendrer des produits utiles, ainsi que de l'énergie.

Le gaz de synthèse produit par la pyrolyse est habituellement de valeur calorifique moyenne (14-18 MJ/m<sup>3</sup> (TPN)), selon l'alimentation et les conditions d'opération. Ce gaz renferme une forte teneur en hydrocarbures comprenant des liquides pyrolytiques non condensés, et des hydrocarbures saturés et non saturés, particulièrement du méthane, produit via un processus de dégradation thermique complexe.

La valeur calorifique est alors augmentée par la présence de méthane et une concentration relativement élevée de liquides condensables.

### Produits de transformation de la pyrolyse



Source : Juniper analysis

Le liquide produit par pyrolyse rapide est hautement oxygéné et contient une quantité appréciable d'eau issue de l'humidité du déchet et de la réaction de pyrolyse elle-même. Ces propriétés font en sorte que les liquides pyrolytiques sont relativement instables tant du point de vue physique que chimique, créant des problèmes d'entreposage, d'utilisation, et de raffinage.

La teneur en oxygène des liquides pyrolytiques est très élevée (40-50% pondéral sur base humide) et la valeur calorifique typique est de 15-20 MJ/kg humide.

Les liquides pyrolytiques présentent généralement les problèmes suivants :

- 7 taux d'humidité; conduisant à une valeur calorifique réduite, un pH faible (acide), une viscosité réduite, des stabilités physique et chimique réduites
- 7 Fortes charges en particules provenant de l'entraînement de résidu carboné et de cendres
- 7 Forte teneur en métaux alcalins dû à l'entraînement des cendres
- 7 pH acide causant des problèmes de corrosion
- 7 risques pour la santé (toxicité similaire au pétrole brut)

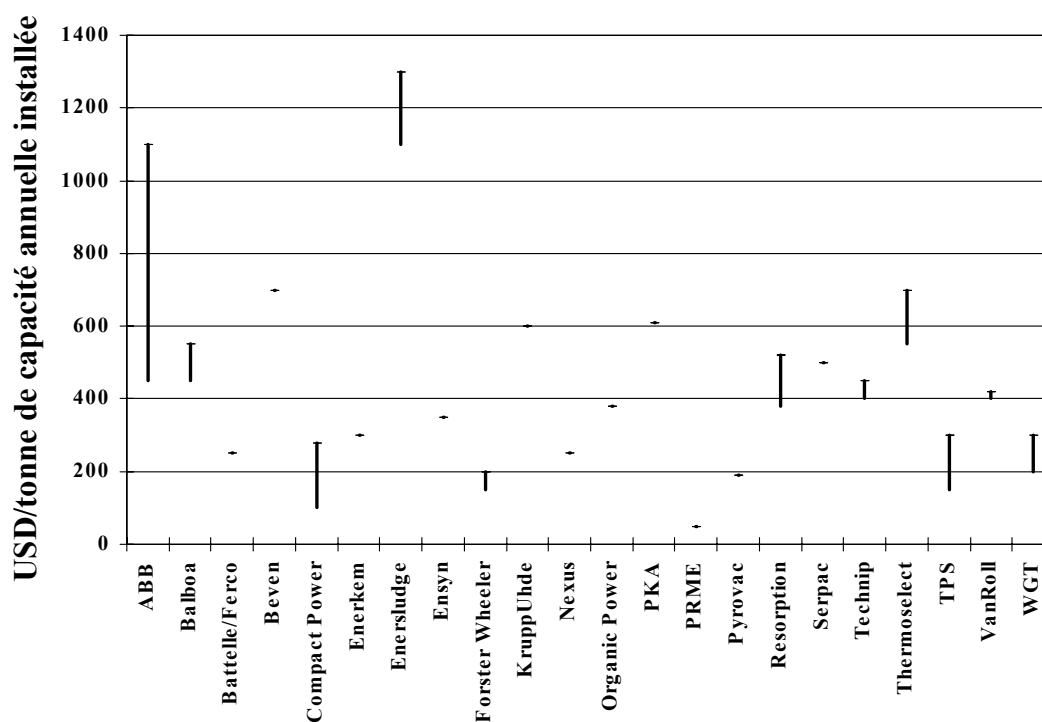
Les liquides produits par des procédés de pyrolyse rapide ne peuvent pas être introduits dans les circuits de marché conventionnels sans traitement. Les liquides peuvent être traités par voie catalytique, ceci étant démontré au niveau du concept, mais pas encore commercialement éprouvé. L'attention a surtout porté sur l'hydrotraitement, procédé bien connu en raffinerie de pétrole, donnant des paraffines. On explore aussi l'utilisation de craquage sur zéolites pour générer des produits aromatiques et oléfiniques.

## Section 4 - Analyse économique

### Section 4.1 - Coût en capital investi

Peu de données sont disponibles à ce chapitre. Quant à l'application pour les pneus hors d'usage, nous n'avons trouvé que pour la compagnie Beven, qui présente un procédé pouvant traiter de 3 à 4000 tonnes par an de pneus, pour une valeur de 2,5 millions de dollars US, ce qui revient à environ 700 USD/tonne traitée annuellement.

Coût d'investissement en capital pour divers procédés



En faisant l'hypothèse qu'il y a environ 120 pneus/tonne, cela revient à environ 6 USD/pneu nominal. Beven a des modules de 3000 tpa, soit environ 350 000 pneus/an/module.

On peut s'attendre à ce qu'un procédé à plus grande échelle (1, 3, 5 millions de pneus/an) aura des économies d'échelle au chapitre des coûts en capital investi, car l'unité ou la batterie d'unités utilisera des équipements de mise en valeur des produits ayant des capacités adéquates. La mise à l'échelle de ces équipement entraîne une augmentation des coûts en capital investi non pas linéaire mais suivant une relation de puissance :

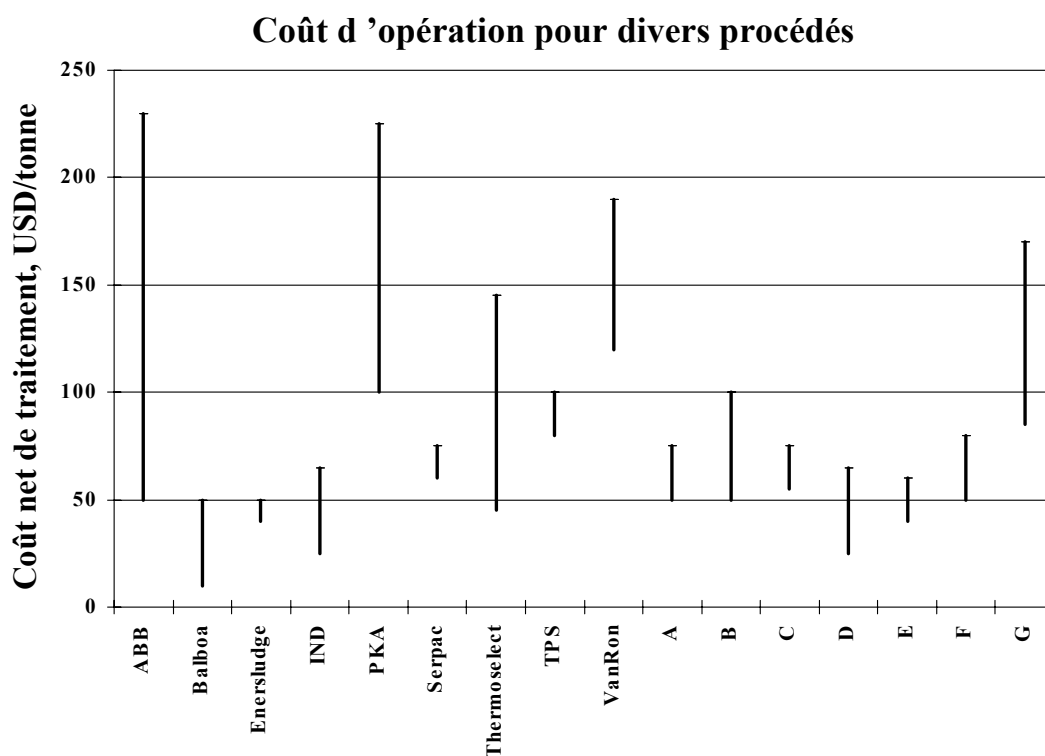
$$\$_2 = \$_1 \times \left( \frac{C_2}{C_1} \right)^x$$

où  $\$_1$  et  $C_1$  sont respectivement les coûts et la capacité d'un équipement de procédé #1,  
 $\$_2$  et  $C_2$  sont respectivement les coûts et la capacité d'un équipement de procédé #2, et  
 $x$  est le facteur de puissance.

Exemples de facteurs de puissance		
Équipement	Plage de grosseur	Facteur de puissance
2 stages, 150 psi	10 - 400 pi <sup>3</sup> /min	0,69
Compresseur rotatif 1 stage, 150 psi	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup> pi <sup>3</sup> /min	0,79
Ventilateur, centrifuge	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup> pi <sup>3</sup> /min	0,44
Ventilateur, centrifuge	2 X 10 <sup>4</sup> - 7 X 10 <sup>4</sup> pi <sup>3</sup> /min	1,17
Échangeur de chaleur à tubes	100 - 400 pi <sup>2</sup>	0,60
Moteur, induction, 440 V	5 - 20 HP	0,69
Moteur, induction, 440 V	20 - 200 HP	0,99

## Section 4.2 - Coûts d'opération

Peu de données existent et plusieurs sont confidentielles, devenant par la même des informations stratégiques pour les compétiteurs. Néanmoins, quelques données sont illustrées ci-après. Il est à noter que nous n'avons trouvé aucune donnée à ce chapitre pour le traitement des pneus hors d'usage.



Par calcul statistique, on constate que le coût d'opération varie entre 55 et 110 USD/tonne, soit, en considérant 120 pneus/tonne, entre 0,45 et 0,90 USD/pneu traité. En considérant 1\$ can = 0,635 \$US, cela revient à 0,75 à 1,50 \$ CAN/pneu.

## **Section 5 - Marchés pour les produits issus de la pyrolyse et la gazéification**

Cette section aborde les usages actuels et potentiels des produits issus de la pyrolyse et de la gazéification des pneus hors d'usage. Leur viabilité technique et économique est étudiée si possible.

### **Section 5.1 - Produits issus de la pyrolyse et de la gazéification des pneus**

Comme nous l'avons vu précédemment, les produits sont un solide (noir pyrolytique, noir de carbone, acier), un liquide (huile) et un gaz.

#### **Huile**

L'huile issue de la pyrolyse et de la gazéification des pneus présente une similitude avec l'huile # 6, cette dernière étant un produit pétrolier bas de gamme ayant une certaine teneur en contamination.

#### **Noir de carbone**

Le noir de carbone, carbone industriel d'importance, est toute forme finement divisée de carbone amorphe (non structuré). La combustion partielle des hydrocarbures produit du noir de carbone. Ses usages dépendent de sa composition chimique, ses propriétés en tant que pigment, son état de subdivision et ses propriétés d'adsorption.

Le procédé de base de fabrication du noir de carbone est la combustion de combustibles en atmosphère pauvre en air, i.e. la combustion partielle ou décomposition thermique des hydrocarbures en phase vapeur. Cette combustion produit de fines particules de noir de carbone, qui, lorsque séparées des gaz de combustion, se présentent sous forme de poudre intensément noire et très légère. Par opposition, les charbons et les noirs pyrolytiques sont formés par la pyrolyse des solides.

## Gaz

Le gaz issu de la pyrolyse et la gazéification des pneus présente typiquement les compositions suivantes :

Composition du gaz de synthèse			
Gaz	Formule	Pyrolyse	Gazéification
Hydrogène	H <sub>2</sub>	19,9	7,6
Azote	N <sub>2</sub>	3,7	43,3
Oxygène	O <sub>2</sub>	0,7	0,9
Monoxyde de carbone	CO	3,3	12,0
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	5,2	10,9
Méthane	CH <sub>4</sub>	35,7	18,0
Éthylène	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9,7	1,4
Éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8,6	
Propylène	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	5,3	1,8
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,8	
C <sub>4</sub> famille	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> ÷ C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	6,2	3,8
Valeur calorique	volumique	1000 BTU/pi <sup>3</sup>	450 BTU/pi <sup>3</sup>
	pondérale	20 000 BTU/lb	6450 BTU/lb

## **Acier**

On retrouve deux types d'acier pour les procédés de pyrolyse et de gazéification :

- a) acier enlevé préalablement au traitement thermique : cet acier est contaminé par la fibre et du caoutchouc.
- b) acier extrait après le traitement thermique : cet acier est contaminé par du noir pyrolytique.

## **Variabilité des produits de réaction**

Le type de procédé influe sur la qualité des produits. Ainsi, lorsqu'un procédé «batch» est utilisé, séparer l'acier et le noir pyrolytique est fort simple: seulement en vidant le réacteur à la fin du processus. Pour les procédés en continu, on doit généralement fractionner le pneu en petits morceaux avant de les traiter thermiquement. Cette «granulation» peut résulter en une contamination du noir pyrolytique par du métal ainsi broyé/coupé.

## **Section 5.2 - Marchés pour les produits issus de la pyrolyse et de la gazéification des pneus**

### **Huile**

Les procédés de pyrolyse et de gazéification des pneus peuvent être opérés afin de générer une phase liquide «huileuse» représentant entre 30 % et 50 % du produit issu de la fraction organique du pneu. Compte tenu qu'un pneu contient typiquement 12,5 % de métal, et 10 % de fraction minérale, alors la fraction organique du pneu sera (100 %- 12,5 %-10 %), soit 77,5 %. Ainsi la fraction liquide «huileuse» sera de 25 % - 40 % du pneu.

Puisque plusieurs types de pneus sont traités thermiquement ensemble, l'huile sera constituée d'une combinaison de divers types d'huile et de noir de carbone. Séparer les huiles en leurs diverses composantes s'avère un processus très difficile à réaliser.

## **Usages potentiels**

### *Usage en tant que combustible*

L'huile issue de la pyrolyse et de la gazéification des pneus a des caractéristiques similaires à l'huile # 6. L'huile # 6 peut être introduite dans des brûleurs munis de pré-chauffage pouvant accepter des huiles à haute viscosité. La valeur calorifique d'une huile détermine son usage en tant que combustible.

<b>Propriétés des huiles et des huiles pyrolytiques</b>				
<b>Propriété</b>	<b>Huile # 2 Kérosène</b>	<b>Huile # 6 Bunker</b>	<b>Pyrolyse</b>	<b>Gazéification</b>
Viscosité à 40 °C (cSt)	1,2	30	3,1 - 6,3	5,5
Valeur calorique (BTU/lb)	20 000	18 900	18 000 - 19 500	19 300

Ce qui limite les usages en tant que combustible sont :

- 7 teneur en particules (noir pyrolytique) entraînées dans le gaz de pneus avant condensation en huile (0,1 % à 2 % de la masse d'huile brute).  
Peuvent être enlevées par centrifugation.
- 7 teneur en eau, entraînée dans le gaz de pneus et condensant (gaz à liquide) à  $T < 100$  °C (de 1 % à 12 % de la masse d'huile brute).  
Peut être enlevée par centrifugation.
- 7 teneur en soufre, ce dernier issu de la composition intrinsèque du pneu (vulcanisation); le soufre est réglementé dans certains pays (de 0,1 % à 0,8 % de la masse d'huile brute).  
Peut être réduit par traitement chimique.

### *Usage en tant que lubrifiant*

Les procédés de re-raffinage comprennent l'obtention, à partir d'huile pyrolytique, d'huile à chauffage, d'essence, de carburant d'aviation et de produits chimiques. Les huiles pyrolytiques contiennent de 1 à 1,2 partie de H pour chaque partie de C.

Les huiles lubrifiantes contiennent au moins 2 parties de H pour 1 partie de C. Ainsi vouloir valoriser les huiles pyrolytiques en huiles lubrifiantes requerra le recours à un procédé de traitement, souvent catalytique, d'hydrogénation de l'huile. À date, il semble que ce type de mise en valeur des huiles pyrolytiques soit non viable en analyse technico-économique.

### *Analyse du marché*

Les huiles pyrolytiques semblent avoir quatre usages potentiels, aucun n'apparaissant économiquement viable à ce jour.

- 7 mélanger l'huile pyrolytique avec d'autres huiles pour produire un combustible utilisable est encore sous étude.
- 7 mettre en valeur l'huile pyrolytique en huile lubrifiante n'est pas viable, techniquement et économiquement.
- 7 mettre en valeur l'huile pyrolytique en une huile similaire à l'huile # 4, par exemple, par distillation est à l'étude mais aucune donnée économique à grande échelle n'existe à ce jour.
- 7 mettre en marché l'huile pyrolytique en tant que combustible se bute aux problèmes de contamination (particules, eau, soufre) et à sa viscosité qui la rangent parmi les huiles # 6, peu dispendieuses et plus propres.

### **Noir de carbone**

Le carbone existe sous deux formes cristallines (diamant et graphite) et sous plusieurs formes amorphes (formes moins ordonnées, non cristallines). Sous ces dernières formes, on retrouve la lignite, les charbons, et le noir pyrolytique, noir de carbone.

Les noirs de carbone ont leurs propres normes industrielles et se présentent sous diverses formes, selon la granulométrie, la surface spécifique, la masse moyenne des agrégats, la distribution de particules et des agrégats, et la structure.

Les divers usages du noir de carbone varient selon les propriétés de pigmentation, les états de subdivision, la capacité d'adsorption, et autres propriétés colloïdales.

Le noir pyrolytique trouvera sa niche dans l'univers des noirs de carbone, seulement en conformité avec les standards de l'industrie. Le principal frein à la commercialisation du noir pyrolytique en noir de carbone est sa haute teneur en contamination inorganique ( pourcentage de cendres = 10 % - 23 %).

### ***Surface spécifique***

La surface spécifique représente la plus importante caractéristique des noirs de carbone. C'est cette propriété qui guide les applications commerciales qu'auront les noirs de carbone.

Les noirs pyrolytiques présentent des surfaces spécifiques autour de 40 m<sup>2</sup>/g, ce qui leur confère le grade de noir de carbone bas de gamme. Les noirs de carbone commerciaux ont des surfaces spécifiques allant de 20 m<sup>2</sup>/g pour les bas de gamme jusqu'à 1 700 m<sup>2</sup>/g pour des application à haute valeur ajoutée.

<b>Propriétés des noirs de carbone et noirs pyrolytiques</b>				
<b>Type</b>	<b>Surface spécifique m<sup>2</sup>/g</b>	<b>DBP ml/100 g</b>	<b>Volatile %</b>	<b>Usages typiques</b>
Fortement noir	230 - 560	50 - 120	2 - 10	laques, plastiques
Moyennement noir	100 - 200	50 - 120	1 - 5	protection UV des plastiques, agent colorant des plastiques, encres, peintures
Noir régulier	80 - 140	60 - 100	1 - 1,5	protection UV des plastiques, encres, ton de bleu encres, offset
Faible en noir	25 - 42	65 - 120	1	encres offset
Pyrolyse	40	85	1 - 10	agent colorant des plastiques
Gazéification	60 - 90	90 - 120	1 - 10	protection UV des plastiques, agent colorant des plastiques

### **Structure**

La structure est la deuxième plus importante propriété des noirs de carbone. La structure est déterminée par la forme et la taille des agrégats, le nombre de particules par agrégat et leur masse moyenne. Ces caractéristiques se reflètent dans l'entassement des agrégats et le volume des espaces vides du matériaux brut (noir de carbone). La mesure du volume des espaces vides, une caractéristiques reliée à la structure, est utilisée comme indicateur de la dite structure. On utilise en laboratoire l'absorption du DBP pour ce faire (DBP = phtalate de dibutyle).

Dans le tableau précédent, on constate que les noirs pyrolytiques se classent bien par comparaison aux noirs de carbone.

### **Usages potentiels**

#### *Mise en valeur en noir de carbone*

La plupart des noirs de carbone commerciaux destinés à l'industrie du caoutchouc ont une teneur en carbone de 97 % et une densité de 16 - 32 lb/pi<sup>3</sup>. Généralement, la teneur en carbone a moins d'importance que la surface spécifique ou la structure. En plus de l'oxygène lié chimiquement à sa surface, le noir de carbone contient de faibles quantités d'humidité, d'hydrocarbures extractibles par solvant, de soufre, d'hydrogène et de sels organiques.

Les noirs pyrolytiques, qu'ils soient issus de pyrolyse ou de gazéification, présentent typiquement les caractéristiques suivantes:

<b>Composition des noirs pyrolytiques</b>		
<b>Propriété</b>	<b>%</b>	<b>Remarque</b>
Carbone fixe	85 - 90	
Solides volatils	1 - 5	Extraction par solvant
Cendres	10 - 15	SiO <sub>2</sub> , ZnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, TiO <sub>2</sub>
Soufre	1 - 2	
Humidité	0,1 - 0,8	
Chlore total	0,1 - 0,2	
Densité	30 - 35 lb/pi <sup>3</sup>	

Il n'y a pas, selon nos recherches de données technico-économiques sur les avantages à raffiner les noirs pyrolytiques en noirs de carbone.

### *Usages en noirs de carbone spéciaux*

Les noirs pyrolytiques sont la plupart du temps de taille variant entre 10 et 100 microns. Ce domaine de grosseur de particules limite la capacité de ce matériau à se substituer aux noirs de carbone standards qui renferment des particules plus petites que 1 micron. Toutefois, quelques noirs de carbone contenant des particules de plus petites surfaces spécifiques (i.e. plus grosses particules) peuvent trouver une application dans les plastiques comme agent de renforcement, ou pour en altérer les propriétés anti-statiques ou de conductivité électrique. Ainsi, on peut envisager des applications comme encres (propriétés électriques), les peintures (coloration) et les plastiques (protection UV, renforcement, coloration, propriétés électriques).

### *Usages comme encre d'imprimerie*

Plus d'une quarantaine de noirs de carbone spéciaux ont été formulés, présentant des caractéristiques variant de 20 m<sup>2</sup>/g de surface spécifique pour les encres bon marché, jusqu'à 500 m<sup>2</sup>/g pour des applications très particulières. Quelques-uns de ces noirs de carbone ont une teneur en carbone de moins de 90 %. Ainsi, certains noirs pyrolytiques pourraient présenter un intérêt dans cette catégorie.

### *Usage comme charbon activé*

Le charbon activé est une forme microcristalline, non graphitique du carbone qui a été transformé afin d'augmenter sa porosité interne. Alors que les noirs de carbone ont des surfaces spécifiques de l'ordre de 20 - 1 700 m<sup>2</sup>/g, les charbons activés ont pour leur part des surfaces spécifiques de 300 - 2 500 m<sup>2</sup>/g. Cette grande surface spécifique favorise l'adsorption de contaminants présents dans des gaz ou dissous/dispersés dans les liquides, d'où leur application en technologie de l'environnement.

Les charbons activés pour le traitement en phase liquide sont sous forme de poudre au granulaire. Pour l'adsorption en phase gazeuse, ils sont sous forme de granules durs ou de pastilles.

Quant au noir pyrolytique, une granulation ultérieure permettant d'amener la taille des particules à environ 1 micron procure une surface spécifique de quelque 100 m<sup>2</sup>/g, insuffisant pour le qualifier de charbon activé (300 - 2 500 m<sup>2</sup>/g). Une activation est alors requise. Trois type d'activation existent communément :

- 7 activation par H<sub>2</sub>O : vapeur surchauffée d'eau qui «ouvre» le réseau microporeux du carbone, pertes d'environ 10 - 15 % de la masse initiale
- 7 activation par CO<sub>2</sub> : idem, perte d'environ 15 - 20 % de la masse initiale
- 7 activation par KOH : idem, perte d'environ 20 - 30 % de la masse initiale.

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas pu trouver de données d'analyse technico-économique pour les processus d'activation des noirs pyrolytiques en charbon activé. Toutefois, il convient de mentionner que, si au départ, le noir pyrolytique contient 15 % de cendres inorganiques, ce pourcentage augmentera, selon le mode d'activation choisi, car les pertes se font au niveau du carbone «organique». Ainsi, par activation au KOH, assumant une perte de 25 %, le taux de cendres du charbon activé résultat sera de 15 %/(100 - 25) % = 20 %.

Ceci peut représenter une contrainte à la commercialisation du charbon activé issu du noir pyrolytique.

#### *Usage comme combustible*

Le noir pyrolytique a une valeur calorifique qui est intéressante pour un usage en tant que combustible.

<b>Valeur calorifique des noirs pyrolytiques</b>	
<b>Item</b>	<b>Valeur calorifique BTU/lb</b>
Lignite	7 200
Charbon	15 000

<b>Valeur calorifique des noirs pyrolytiques</b>	
<b>Item</b>	<b>Valeur calorifique BTU/lb</b>
Pyrolyse	13 100
Gazéification	12 500

Il faut toutefois ne pas mettre en veilleuse que la combustion du noir pyrolytique entraîne des émissions ayant des particules entraînées, des composés soufrés ( $SO_x$ ), des oxydes d'azote ( $NO_x$ ), des hydrocarbures, et autres gaz (certains acides, tel HCl). Selon le cas, un traitement de ces émissions peut être requis pour se conforme aux lois et règlements en vigueur aux endroits où cela est appliqué.

### ***Analyse de marché***

Quatre niches de marché potentielles existent pour le noir pyrolytique issu de la pyrolyse et de la gazéification des pneus, quoique aucune ne semble actuellement viable économiquement.

- 7 traitement du noir pyrolytique pour l'introduire dans des produits en caoutchouc : semble être encore au stade de recherche et développement.
- 7 usage dans l'industrie de fabrication de produits en plastique : semble être encore au stade de recherche et développement.
- 7 combustible : sous certaines réserves (émissions atmosphériques) et selon les prix du marché du charbon.
- 7 noir de carbone spécial : semble accessible pour les encres, peintures et plastiques (noircissement, protection UV).

### **Gaz**

Le gaz produit par des procédés de pyrolyse et de gazéification a une valeur calorifique moyenne ou faible, respectivement. Sa teneur intéressante en méthane et éthane l'assimile au gaz naturel. Toutefois, la présence importante

de CO<sub>2</sub> et CO empêche que le gaz pyrolytique soit mélangé au gaz naturel pour des fins de revente ou d'utilisation commerciale.

Ainsi, le gaz pyrolytique trouve son usage seul. Il sert généralement dans le procédé lui-même, pour faire de l'électricité en majeure partie, soit directement (turbine à gaz) ou par production de vapeur surchauffée (turbine à vapeur).

## **Métal**

La qualité du métal varie considérablement selon les procédés et selon que l'on recueille le métal avant ou après le traitement thermique.

Les facteurs influençant sa mise en marché en tant que métal usé sont :

- 7 propreté
- 7 quantité
- 7 conditionnement (mise en ballot, par exemple)
- 7 coût de transport
- 7 coût d'entreposage

## **CONCLUSION**

### **Recyclage ou valorisation ?**

La question a soulevé plusieurs discussions au cours des années '90, plus particulièrement vers '97 -'98, où quelques projets de pyrolyse et de gazéification avaient cours au Québec.

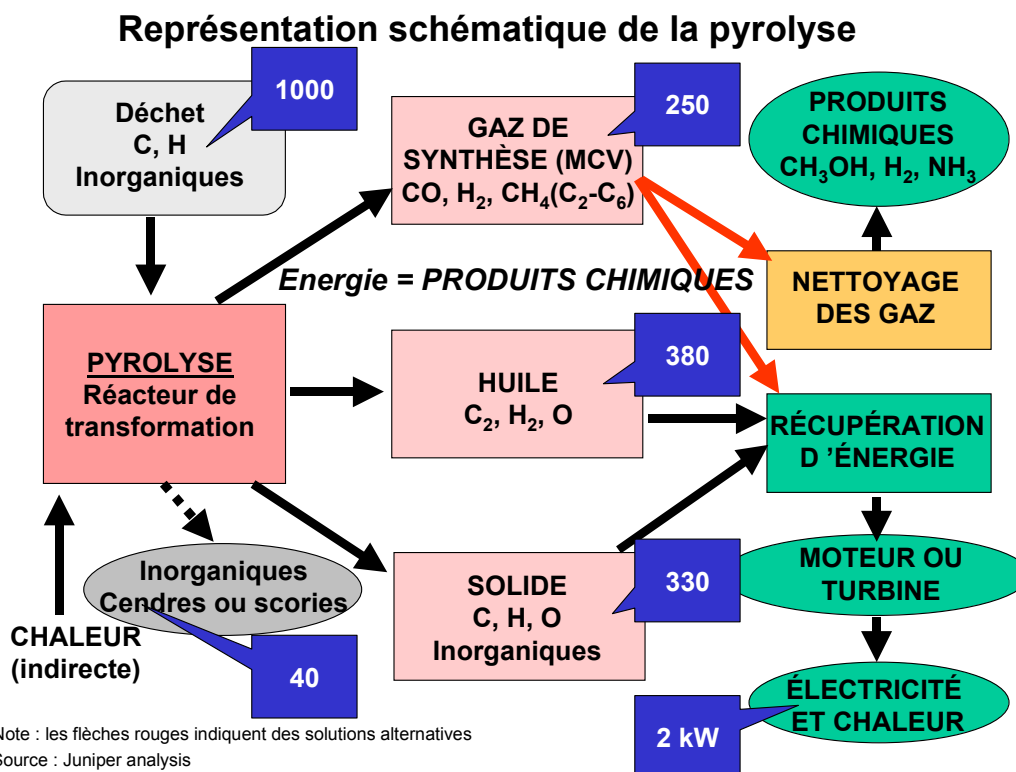
Nous aborderons la question sous un angle strictement technique (ou technologique), en nous appuyant sur la seule approche objective qui soit : l'examen des bilans de matière.

Nous avons décrit au chapitre 3 - concepts technologiques, nous pouvons schématiser la pyrolyse et la gazéification.

Dans les deux cas, il peut y avoir production de 3 types de produits :

- < gaz de synthèse
- < liquide
- < solide

Les proportions peuvent varier selon la technologie et le procédé. Pour illustrer notre propos, considérons un procédé de pyrolyse ayant le bilan suivant :



Ainsi dans notre exemple, 63 % du pneu se retrouve valorisé en énergie électrique, et 33% du pneu trouve une voie en recyclage (métal et noir pyrolytique). 4 % est sous forme de déchet (cendres).

Comme nous l'avons souligné à la section 5, le métal et le noir pyrolytique trouvent difficilement preneurs sur le marché, étant donné les qualités variables de ces deux sous-produits. Dans le schéma précédent, nous avons fait l'hypothèse que ces deux sous-produits étaient traités, purifiés et donc recyclables.

Nous croyons que le défi des prochains promoteurs résidera dans la démonstration à faire que les sous-produits trouvent preneurs dans des activités de recyclage.

Aujourd'hui, il n'y a aucune distinction apparente entre l'incinération/combustion en cimenterie et les avenues de pyrolyse et de gazéification, en regard de la hiérarchie écologique des 3R-V. Tel que mentionné auparavant, la plupart des procédés produisent de l'énergie, quasi exclusivement.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Affolter J, Bovey R, Vuille J-P. Manufacture of carbon black by pyrolysis of waste rubber. *Eur patent appl. EP 928817 A1*. 1999.

Ani FN, Jamil MK. Pyrolytic recycling of waste rubber materials to liquid fuel. *Polymer recycling*. 1997, vol. 3, no 4, p. 255-261.

Anonyme. Environmental Factors of Waste Tire Pyrolysis, Gasification and Liquefaction. *California Integrated Waste Management Board CalRecovery Report no 1364*. 1995.

Anonyme. A clean process for recycling tyres and waste oil. *Chem eng (int. Ed)*. 1997, vol. 104, no 9, p. 25.

Anonyme. A "clean" process for recycling tires and waste oil. *Chemical Engineering* . sep-97, p. 25.

Anonyme. Coalite develops pyrolysis process for tyres. *ENDS Report*. 2000, no 308, p. 17.

Anonyme. Scrap tyres. *European Rubber journal. Supplemental number*. 1998, vol. 180, no 12, p. 33.

Anonyme. TARRC secures contract in tyre pyrolysis. *Indian Rubber Journal*. 2000, vol. 48, p. 57.

Anonyme. Many ways to reuse tyres from recovery to combustion. *Industria della Gomma*. 1995, vol. 39, no 3, p. 35-38.

Anonyme. New technology for the recovery of scrap tyres. *Industria della Gomma*. 1998, vol. 42, no 1, p. 47-48.

Anonyme. Developers clinch north american deal for tyre pyrolysis plant. *Materials reclamation weekly*. 1992, vol. 160, no 9, p. 24.

Anonyme. What should be done with europe's two million tonnes of used tyres ?. *Plastics and rubber international*. 1992, vol. 17, no 6, p. 16.

Anonyme. Energy from scrap tyres fuels JV pyrolysis systems. *Plastics and rubber weekly*. 1993, no 1470, p. 12.

Anonyme. Le recyclage thermique, clef de voûte d'une gestion rationnelle des déchets (Thermal recycling, the key to rational waste management). *Plastiques modernes et élastomères*. 1991, vol. 43, no 8, p. I-XVI.

Anonyme. First choice for tire reduction to 2 inch shreds to 1 inch chips and crumb with removal of wire and fluff. *Reduction technology Inc, Leeds, Al., 1994, pp4, 11 ins, 21/6/94, 26T 1-815*. 1994.

Anonyme. Is pyrolysis recycling ? - Oregon's view. *Reuse/recycle*. 1994, vol. 24, no 3, p. 17-19.

Anonyme. Hojo waste tyre pyrolysis power generation system. *Rubber Southern Africa*. 1994, vol. 9, no 6, p. 5.

Anonyme. Tyre pyrolysis systems. *Rubber world*. 1993, vol. 208, no 5, p. 77.

Anonyme. Eastern shale corporation to market pyrolysis system. *Scrap tire news*. 1991, vol. 5, no 3, p. 7.

Anonyme. Pyrolysis plant to be built in Germany. *Scrap tire news*. 2000, vol. 14, no 3, p. 11.

Anonyme. Integrated Technology Group Inc. acquires gasification technology. *Scrap tires news*. 2000, vol. 14, no 9, p. 12.

Anonyme. Recycling : oil from old tyres. *TAB : Tyres Accessories Batteries*. 1993, no 6, p. 3.

Anonyme. ELM Energy plans more tyre-burning plants. *Tire business*. 1993, vol. 10, no 19, p. 17.

Anonyme. Makers of scrap tyre processing equipment. *Tire business*. 1991, vol. 8, no 22, p. 21-22.

Anonyme. Beven recycling : tyre recycling by pyrolysis. *Tyres & accessories*. 1994, no 10, p. 61-62.

Anonyme. Energeco : it's time for action. *Tyres & Accessories*. 1994, no 10, p. 63-64.

Anonyme. IPEC-SYNPRO Environmental : economically-viable pyrolysis. *Tyres & Accessories*. 1994, no 10, p. 70-71.

Anonyme. New tires-to-energy power station "onstream in 2002". *Tyres & Accessories*. 2000, no 2, p. 24-26.

Anonyme. Pyrolysis process will take 1M scrap tires. *Tyres & Accessories*. 2000, no 10, p. 12.

Anonyme. RMA view of the scrap tyre problem. *Tyres & Accessories*. 1994, no 10, p. 58.

Anonyme. Feature : tyres. *Warmer Bulletin*. 1993, no 38, p. 6.

Anonyme. Pyrolysis and gasification : a sunrise technology. *Warmer bulletin*. 2000, no 72, p. 8.

Argemi R, Rodriguez N, Franco S. Pirolisis de neumaticos para autogeneracion electrica (Pyrolysis of tyres for electricity generation). *Ingenieria Quimica*. 1995, vol. 27, no 313, p. 159-163.

Barducci G, Bellini F, Cellai R. Trattamento criogenico dei rifiuti solidi (Cryogenic treatment of solid wastes). *La Chimica e l'Industria*. 1995, vol. 77, no 8, p. 517-22.

Beck MR. Pyrolysis carbon black : an overview. *IRC'93. 144th Meeting. Conf proceedings. ACS Rubber division*. 1993, Paper 4, pp 25. 012.

Beck MR, Klingensmith W. A black filler for rubber from tire pyrolysis char. *Plastics, Rubber and Paper Recycling. ACS symposium series 609*, p. 255-272.

Berti L, Marani M, Scialdoni R. Emissions from a plant for the combustion of waste tyres. *Macplas*. 1991, vol. 16, no 128, p. 54-55.

Bouziane R. Batch process for recycling hydrocarbon containing used materials. *USPTO*. 1998, no 5821396, p. .

Boyer B. Pursuing venture financing. *148th ACS Rubber division meeting, Fall 1995, conf preprints*. 1995, paper 37, p 22.012.

Carrasco F, Roy C. Reutilizacion y reciclaje de neumaticos usados. Aspectos Quimicos, ambientales y economicos (Reuse and recycling of used tyres. Chemical, environmental and economic aspects). *Ingenieria Quimica (Madrid)*. 1991, vol. 23, no 263, p. 153-158.

Chang JS, Looy PC, Novog D, Jamal S. Thermal pyrolysis of used tires : the effect of plasma torch power and plasma gases. *Prog Plasma process mater 1997, Proc int therm plasma processes conf, 4th*. 1997, p. 403-410.

Chang Y-M. On pyrolysis of waste tyre : degradation rate and product yields. *Resources, Conservation and Recycling*. 1996, vol. 17, no 2, p. 125-139.

Chebil S, Chaala A, Darmstadt H, Roy C. Modification of bitumen with scrap tyre pyrolytic carbon black : comparison with commercial carbon black : 2. Microscopic and surface spectroscopic investigation. *Polymer recycling*. 1997, vol. 3, no 1, p. 17-28.

Chen JH, Chen KS, Tong LY. On the pyrolysis kinetics of scrap automotive tires. *Journal of Hazardous Materials*. 2001, vol. 84, no 1, p. 43 (13).

Clark C, Meardon K, Russell D. Scrap tire technology and markets. *Noyes Publications pp xii, 316, USD 54, 10 ins, 18/3/93, 6T 1-8 (13)*. 1993.

Clark C, Meardon K, Russell D. Scrap tire technology and markets. *Pollution technology review*. 1993, no 211, p. 316 pp.

Clark, Meardon, Russell. Burning tires for fuel and tire pyrolysis : air implications. *NTIS PB-92-145358/XAB*. 1991.

Conesa JA, Fullana A, Font R. Tire pyrolysis : evolution of volatile and semivolatile compounds. *Energy & Fuels*. 2000, vol. 14, no 2, p. 409-418.

Dagnall S. Workshop on scrap tyres as fuel. *Waste manag Today (News J)*. 1991, vol. 4, no 3, p. 38-41.

De Marco Rodriguez I, Laresgoiti MF, Cabrero MA, Torres A, Chomon MJ, Caballero B. Pyrolysis of scrap tyres. *Fuel Processing Technology*. 2001, vol. 72, no 1, p. 9-22.

Drozdovskii VF. Current state and future prospects for processing and application of scrap tyres outside the C.I.S.. *International Polymer Science and technology*. 1992, vol. 19, no 11, p. T/57-T/66.

Dufton P. Tyre disposal into the 21st century. *Tyretch '95 : 21st century technology : evolution or revolution ? Conference proceedings*. 1995, paper 9.

Dufton PW. Scrap tyres - disposal and recycling options. *Shawbury, RAPRA Technology Ltd, RAPRA Industry Analysis series*. 1995.

Earle BA. Dallas investors purchase tire pyrolysis plant. *Rubber and plastics news*. 1993, vol. 23, no 2, p. 3.

Earle BA. Tireoil advances plans to build pyrolysis units. *Rubber and plastics news* 2. 1993, vol. 14, no 12, p. 4.

Earle BA, Moore M. Fla. Firm pursues new method of pyrolysis. *Tire business*. 1993, vol. 10, no 19, p. 17.

Eastman AL. United States scrap tyre alternatives, markets and solutions. *IRC'93. 144th Meeting. Conf proceedings. ACS Rubber division*. 1993, Paper 5, pp 20. 012.

EMPA; Swiss Federal Laboratories for Mat. Testing & Res.. R'95 - Recovery, recycling, re-integration Vol 5 : thermal processes, energy recovery. *Dubendorf 1995. Pp 240, 8ins 27/3/95 8(13)*. 1995.

Fedchenko V. 2000 a boon for scrap tire recovery market. *Rubber & Plastics News*. January 2001, p. 10.

Galvagno S, Casu S, Casablanca T, Calabrese A, Cornacchia G. Pyrolysis process application on scrap tyres. Experimental results on pilot scale. *RS Rifiuti Solidi*. 2001, vol. 15, no 2, p. 93-101.

Gardner J. Oregon probes controversy over pyrolysis. *Plastics news Usa*. 1993, vol. 5, no 15, p. 20-jan.

Goodin, M.. ATR to build pyrolysis plant in S. Korea. *Tire business*. 1993, vol. 11, no 2, p. 5.

Goulart EA, Mariotoni CA, Sanchez CG. Gasification of used tyres in fluidised bed reactor to produce energy sources. *Polimeros : Ciencia e tecnologia*. 1999, vol. 9, no 4, p. 123-128.

Gray T. Evolving developmental technologies for scrap tires : a promising frontier for dreamers and schemers. *151st ACS Rubber Division Meeting, Spring 1997, Conference preprints, Paper 3*. 1997, p. 29.012.

Halal AM. Federal plans to build 6 tire recycling plants. *Rubber and plastics news* 2. 1997, vol. 18, no 15, p. 7.

Halal AM. Firm to build pyrolysis units. *Waste news*. 1997, vol. 2, no 48, p. 6.

Hayhurst T. Utah firm transforms tires to gaseous fuels. *Tire business*. 2000, vol. 17, no 21, p. 16.

Helleur R, Popovic N, Ikura M, Stanciulescu M, Liu D. Characterization and potential applications of pyrolytic char from ablative pyrolysis of used tires. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2001, vol. 58-59, p. 813-824.

Jones K, Lawson K. What to do with old tyres ?. *Rubbercon '95. Conf preprints*. 1995, Paper F4, pp 13.012.

Joung SN, Park SW, Kim SY, Yoo KP, Bae SY. Thermolysis of scrap tire using supercritical toluene. *Korean J Chem Eng.* 1999, vol. 16, no 5, p. 602-607.

Juniper. The Worldwide Directory of Gasification Et Pyrolysis Technology Suppliers and Processes. . 2001, p. 90.

Juniper. Pyrolysis & Gasification of Waste A Worldwide technology & Business Review, volume 1 : Markets & Trends. . 2000, vol. 1, p. 183 p..

Juniper. Pyrolysis & Gasification of Waste A Worldwide technology & Business Review, volume 2 : technologies & Processes. . 2000, vol. 2, p. 354 p..

Kaminsky W. Possibilities and limits of pyrolysis. *Die Makromolekulare Chemis-Macromolecular symposia.* 1992, no 57, p. 145-160.

Kaminsky W. Pyrolysis of polymers. *Emerging Technologies in plastics recycling, symp proceedings.* 1991, p. 60-72, 8(13).

Kaminsky W. Re-use of rubber and plastics by pyrolysis. *Recycle '93. Conf proceedings.* 1993, Paper 7/4, 8(13).

Kim S. Pyrolysis of scrap tire rubbers : relationships of process variables with pyrolysis time. *Korean J Chem Eng.* 1996, vol. 13, no 6, p. 559-564.

Knoedgen M.. Germany deals with scrap tyres. *European Rubber Journal.* 1998/1999, p. 32.

Leblanc JL, Roy C, Mirmiran S, Benallal B, Schwerdtfeger AE. Plasticising properties of heavy oils obtained from vacuum pyrolysis of used tyres. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 1996, vol. 49, no 3, p. 194-199.

Lesueur D, Dekker DL, Planche JP. Comparison of carbon black from pyrolyzed tires to other fillers as asphalt rheology modifiers. *Transportation research record*. 1995, no 1515, p. 47-55.

Leung DYC, Wang CL. Kinetic modeling of scrap tire pyrolysis. *Energy & Fuels*. 1999, vol. 13, no 2, p. 421-427.

Lin K-S, Wang HP, Jou C J-G, Wei Y-L, Sun Y-P. Syngas recovery of industrial rubber wastes gasification. *Proceedings of the 15th international conference on solid waste technology and management*. 1999.

Ljutzkanov L, Douchanov d, Ganchev Z. Utilisation of used automobile tyres by pyrolysis. *Bulgarian Chemistry and Industry*. 2000, vol. 71, no 3, p. 111-113.

Lowenhaupt B. Concepts and changes of tyre recycling and reasons for selected recycling methods. *IRC '95 Kobe International Rubber Conference, conf proceedings*. 1995, p. 602-605.

Lunney A. Waste tyres : industry faces hard choices. *Plastics and rubber weekly*. 1992, no 1418, p. 9.

Lynum S, Hugdal J, Hildrum R. Carbon black produced by the Kvaerner CB & H Process. *Industria della Gomma*. 1996, vol. 40, no 7, p. 16-19.

Mastral AM, Murillo R, Callen MS, Garcia T. Optimisation of scrap automotive tyres recycling into valuable liquid fuels. *Resources, Conservation and Recycling*. 2000, vol. 29, no 4, p. 263-72.

Matsunami J, Yoshida S, Yokota O, Nezuka M, Tsuji M, Tamaura Y. Gasification of waste tyre and plastic (PET) by solar thermochemical process for solar energy utilization. *Sol Energy-Pergamon*. 1999, vol. 65, no 1, p. 21 (3).

McKenzie KA. Monitoring and promotion of pyrolysis plant. *Workshop on thermochemical processing of biofuels*. 1992, p. 89-94.

Mikolajczyk SJ. Scrap tire recycler in contract trouble again. *Tire business*. 1995, vol. 13, no 13, p. 4.

Moore G. Attracting the recyclers to the big apple. *Scrap tire news*. 1994, vol. 8, no 10, p. 11-oct.

Moore M. Houston entrepreneur bus pyrolysis technology. *Rubber and plastics news*. 1993, vol. 22, no 16, p. 6.

Moore M. Pyrolysis causes company headaches. *Rubber and Plastics News*. 1997, vol. 27, no 6, p. 54-55.

Moore M. Houston firm's goal : pyrolysis plants operating in every state. *Tire business*. 1993, vol. 10, no 22, p. 3.

Mutz K. There is simply nothing better than incineration. *Gummibereifung*. 1994, vol. 70, no 2, p. 72-73.

Napoli A, Soudais Y, Lecomte D, Castillo S. Scrap tire pyrolysis : are the effluents valuable products ?. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 1997, vol. 40-41, p. 373-382.

Nicosia S, Viviani G, Costanzo G. Worn Tyres : materials and energy recovery by retreading. *Dubendorf 1995. Pp 198 8ins 27/3/95 8(13)*.

NTIS. Waste tire recycling by pyrolysis. *NTIS DOE/CE/27504-11*. 1992.

NTIS. Recycling tires. Latest citations from Pollution abstracts. *NTIS PB97-853360*. 1997.

Nylander P-I. Apparatus for recycling of old rubber tires and other products of polymer materials through oxygen-free pyrolysis in a connected continuously operating system. *PCT International. WO 9908849 A1*. 1999.

Petrick P. Challenge of pyrolysis. *Scrap tire news*. 1991, vol. 5, no 10, p. 1-5.

Petrick P. Challenge of Pyrolysis. III. *Scrap tire news*. 1991, vol. 5, no 12, p. 1-5.

Pollesel P. Energy recovery from waste : the application of gasification technologies. *La Chimica e l'Industria*. 1996, vol. 78, no 5, p. 603-7.

Price B. Energy from wastes. *Financial times energy publishing*. 1996.

Raleigh P. UK firm unveils \$52m tyres-to-energy project. *European rubber journal*. 2000, vol. 182, no 3, p. 9.

Reaven SJ. Prospects for pyrolysis technologies in managing municipal, industrial, and DOE cleanup wastes. *US DOE . BLN 52452*. 1994, p. 86 pp.

Roy C, de Caumia B, Labrecque B, Blanchette D, Pakdel H, Roy V. Technical and environmental assessment of the scrap tire vacuum pyrolysis process. *EMR Canada, CRI-M91-7/152-1991E*. 1991.

Roy C, Larouche J-P, Pakdel H. The vacuum copyrolysis of organic wastes and rubber. *EMR Canada, DSS Contract File no : 48S2-23216-5-7146*. 1987.

Roy C, Yang J, Tanguy PA. Numerical model for the pyrolysis of scrap tyres in batch reactors. *AIChE Journal*. 1995, vol. 41, no 6, p. 1500-1512.

San Miguel G, Fowler GD, Sollars CJ. Pyrolysis of tyre rubber : porosity and adsorption characteristics of the pyrolytic chars. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1997/1998, vol. 37, no 6, p. 2430-2435.

Schieber A, Mottitschka W, Eidner D, Modde P, Witthauer K-D, Wolowski P, Neubert X, Escherle A. Pyrolysis-air gasification for manufacture of fuel gases from industrial and household wastes. *European Pat appl. EP 982389 A1*. 2000.

Serumgard JR, Eastman AL. Scrap Tire Recycling : Regulatory and Market Development Progress. *Plastics, Rubber and Paper Recycling. ACS symposium series 609*. 1995, p. 237-244.

Sharma VK, Fortuna F, Mincarini M, Berillo M, Cornacchia G. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment. *Applied Energy*. 2000, vol. 65, no 1, p. 381-394.

Sharma VK, Mincarini M, Fortuna F, Cognini F, Cornacchia G. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment-review. *Energy Convers. Manage*. 1998, vol. 39, no 5/6, p. 511 (18).

Shaw D. Scrap tyre problem solved ?. *European Rubber journal*. 1995, vol. 177, no 5, p. 14.

Shaw D, White E. UK firm claims pyrolysis system viable. *Rubber and plastics news*. 1992, vol. 22, no 7, p. 26.

Shaw D, White L. Pyrolysis works, but who buys ?. *European Rubber Journal*. 1992, vol. 174, no 10, p. 24-26.

Shelley M, El-Halwagi MM. Techno-economic feasibility and flowsheet synthesis of scrap tire plastic waste liquefaction. *Journal of Elastomers and Plastics*. 1999, vol. 31, no 3, p. 232-54.

Takegawa T, Arima K. Method and apparatus for producing carbon black from waste tires. *European Pat appl. EP 768345 A2*. 1997.

Teng H, Serio MA, Wojtowicz MA, Bassilakis R, Solomon PR. Reprocessing of used tyres into activated carbon and other products. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1995, vol. 34, no 9, p. 3102-3111.

Tognotti L, Vitolo S, Tartarelli R. Processi di trattamento termico dei rifiuti (Processes for the thermal treatment of wastes). *La Chimica e l'Industria*. 1994, vol. 76, no 12, p. 761-771.

Webber P. Logistics of tyre disposal and recycling. *Tyrettech '95. 21st century technology : evolution or revolution ? Conf proceedings*. 1995, Paper 10, 2 p, 6T.

Wojtowicz MA, Serio MA. Pyrolysis of scrap tyres : can it be profitable ?. *Chemtech*. 1996, vol. 26, no 10, p. 48-53.

Wyman V. Turning a profit from old tyres. *The Engineer*. 1991, vol. 273, no 7066, p. 36.

Xu BY, Leung DYC, Wu CZ, Luo ZF, Yin XL, Liu P. Circulating fluidized bed gasification for energy recovery from scrap tyres. *APCSEET '96, Asia-Pacific conf on sustainable energy and environmental technology*,. 1996, p. 494-500.

Xue D, Quan X, Zhao Y, Yang F. Waste tire treatment by thermal cracking method. *Huanjing Gongcheng*. 1998, vol. 16, no 1, p. 47-48.

Xue D-M, Quan X, Zhao Y-Z, Liang Y-K, Liu H-Y. Energy balance for waste tire thermolysis. *Dalian Ligong Daxue Xuebao*. 1999, vol. 39, no 4, p. 519-522.

Yamada R, Yamashita H, Yonezawa M, Yoshihama . Method and apparatus for treatment of waste tires. *JP 95190611*. 1995.

Yang J, Tanguy PA, Roy C. Heat transfer, mass transfer and kinetics study of the vacuum pyrolysis of a large used tyre particle. *Chemical Engineering Science*. 1995, vol. 50, no 12, p. 1909-1922.

Zhou D, Xing L. Production of gasoline, diesel oil, and carbon black from waste rubber. *CN 1155571 a*. 1997.

## ANNEXE

### Définitions

Les définitions qui suivent sont présentées afin d'expliquer les termes techniques qui sont habituellement utilisés dans le contexte de procédés de conversion thermique et du traitement thermique des déchets.

Carbonisation | Processus de pyrolyse à basse température, temps de résidence long pour maximiser la production de résidu carboné (*char*).

*Termes anglais utilisés : carbonisation, slow pyrolysis.*

Combustion | Conversion rapide d'énergie chimique en énergie thermique. La combustion survient par le biais d'une flamme dans une zone réactionnelle étroite et la réaction est exothermique. La matière organique est oxydée par réaction avec l'air et le carbone est converti en bioxyde de carbone et l'hydrogène en eau.

*Termes anglais utilisés : combustion, burning, incineration, thermal oxydation, direct firing.*

Gazéification  
intégrée  
à un cycle  
combiné | Une centrale thermique à cycle combinée qui utilise un gazogène pour convertir des déchets en gaz de synthèse qui sont utilisés dans une turbine à gaz pour générer directement de l'électricité. Les gaz chauds d'émission de la turbine sont utilisés pour produire de la vapeur dans une bouilloire, laquelle vapeur est alors utilisée pour générer plus d'électricité via une turbine à vapeur.

Gazéification	<p>La gazéification est un processus d'oxydation partielle au cours duquel la matière organique est transformée en un mélange de produits énergétiques en phase gazeuse, typiquement du monoxyde de carbone, de l'hydrogène et du méthane. Le carbone est récupéré sous forme d'un résidu carboné (<i>char</i>). Ce dernier peut être oxydé au cours du processus pour produire plus de gaz. Des cendres et de la chaleur sont produits aussi.</p> <p><i>Termes anglais utilisés : Gasification, partial oxydation.</i></p>
Gazogène de puissance	<p>Équipement qui permet un processus de gazéification générant des gaz de synthèse (<i>syngas</i>) qui sont préalablement purifiés afin de produire un pseudo-combustible. Ce gaz combustible est alors transformé en énergie électrique via une turbine à gaz ou par un moteur à explosion (bougie).</p>
Gazogène calorifique	<p>Équipement qui permet un processus de gazéification générant des gaz de synthèse (<i>syngas</i>) qui sont utilisés directement, sans purification, pour générer de l'énergie thermique par combustion.</p>
Incinération à air pauvre	<p>Procédé en deux étapes où la première étape de combustion est opérée sous des conditions sub-stoéchiométriques d'oxygène (d'air) afin de créer un environnement réducteur dans lequel la matière organique du déchet solide passe en phase gazeuse, ne laissant qu'un résidu – les cendres. Les gaz produits sont alors oxydés thermiquement en mélangeant avec un excès d'oxygène (d'air) dans une chambre secondaire.</p> <p><i>Termes anglais utilisés : Starved air incineration, two stage incineration, controlled air incineration.</i></p>

Incinération de masse	<p>Incinération à grande échelle de déchets solides, particulièrement les déchets solides municipaux, dans une fournaise à combustion à une étape, afin de générer de l'énergie utile (électricité ou chaleur).</p> <p><i>Termes anglais utilisés : Mass burn incinération, Waste-to-energy, energy from waste.</i></p>
Incinération	<p>L'incinération est un terme qui est utilisé pour décrire tout procédé de combustion faisant appel aux déchets. L'incinération est un procédé en plusieurs étapes qui a lieu dans un réacteur unique.</p> <p>Incinération = pyrolyse + gazéification + oxydation thermique.</p> <p><i>Termes anglais utilisés : Incineration, Thermal oxidation, two stage combustion, thermal destruction.</i></p>
Noir pyrolytique	<p>Solide obtenu par pyrolyse et gazéification, ayant une teneur en carbone élevée.</p> <p><i>Termes anglais utilisés : char, CBp (Carbon Black from pyrolysis).</i></p>
Oxydation thermique	<p>L'oxydation à haute température (sous des conditions d'excès d'air) des composés organiques contenus dans la phase gazeuse, en bioxyde de carbone et en eau.</p> <p><i>Termes anglais utilisés : Thermal oxidation, incineration, thermal destruction.</i></p>

Pyrolyse	<p>Dégradation thermique de la matière organique en absence d'oxygène. Selon les conditions de température d'opération et de temps de résidence, des quantités variables de gaz de synthèse, d'huiles pyrolytiques et de résidu carboné sont produites.</p> <p><i>Termes anglais utilisés : Pyrolysis, thermal distillation, destructive distillation, retorting, carbonisation, fast pyrolysis, ultra pyrolysis, thermal gasification.</i></p>
Reformage de la vapeur	<p>C'est un processus de gazéification, à l'origine utilisé pour convertir les fractions pétrolières en composés plus volatiles, en utilisant la vapeur comme agent de gazéification. C'est utilisé principalement dans l'industrie pétrochimique.</p> <p><i>Termes anglais utilisés : Steam reforming, gasification, hydrogasification, hydroforming.</i></p>
Stoéchiométrie	<p>Le rapport oxygène:déchet est une variable importante. La stoéchiométrie mesure ce paramètre. La conversion du carbone et de l'hydrogène en bioxyde de carbone et en eau respectivement requiert une quantité spécifique d'oxygène - c'est la quantité stoéchiométrique d'oxygène (sous forme d'air) pour compléter les réactions théoriques. La plupart des réactions de combustion requièrent un excès d'air (i.e. plus que la quantité stoéchiométrique) pour compenser pour les diverses inefficacités du procédé. Quelques systèmes emploient des quantités sub-stoéchiométriques d'oxygène (combustion lente) pour atteindre d'autres objectifs de procédé.</p>

Thermolyse

Décomposition thermique de la matière organique en absence d'oxygène. Terme utilisé presque exclusivement en France pour décrire les procédés de pyrolyse.

*Termes anglais utilisés : Thermolysis, pyrolysis, low temperature pyrolysis.*

## ANNEXE

### Acronymes et abréviations

BTU	=	<i>British Thermal Unit</i> , unité d'énergie, équivaut à 1,055 kJ
cSt	=	centistokes, unité de viscosité
g	=	gramme, unité de masse
HP	=	Horsepower, unité de puissance, équivaut à 0,75 kW
kg	=	kilogramme, unité de masse
kJ	=	kilojoule, unité d'énergie
KOH	=	hydroxyde de potassium
ktpa	=	kilotonne par année
kW	=	kilowatt, unité de puissance
lb	=	livre, unité de masse, équivaut à 0,4536 kg
LCV	=	valeur calorifique faible
M	=	million
m <sup>2</sup>	=	mètre carré, unité de surface
m <sup>3</sup>	=	mètre cube, unité de volume
MCV	=	valeur calorifique moyenne
min	=	minute

MJ	=	mégajoule
mL	=	millilitre, unité de volume, équivaut à $10^{-6} \text{ m}^3$
microns	=	micromètre, unité de longueur, $10^{-6} \text{ m}$
NO <sub>x</sub>	=	oxydes d'azote
pi <sup>3</sup>	=	pied cube, unité de volume, équivaut à $0,0283 \text{ m}^3$
SO <sub>x</sub>	=	oxydes de soufre
TPN	=	température et pression normales (25 °C, et 101,3 kPa)
USD	=	dollar américain