

Analyse stratégique des technologies de recyclage des pneus usagés

Pyrolyse thermique et stratégie de valorisation EET

Défis techniques de la pyrolyse, exigences de conformité européennes et stratégie de valorisation commerciale des produits.



Les enjeux clés de la pyrolyse thermique des pneus



Les pneus usagés présentent des compositions variables et contiennent des impuretés inhérentes — soufre, chlore et de multiples phases minérales inorganiques. Un contrôle précis de la température est essentiel pour minimiser la contamination du noir de carbone recyclé (rCB) par les huiles.



L'huile de pyrolyse brute (TPO) présente une forte teneur en soufre, des résidus de chlore organique, une faible aromaticité et une part importante de fractions lourdes au-delà de 343 °C. Un hydrotraitement est nécessaire pour répondre aux spécifications d'admission en raffinerie. Le temps de séjour des vapeurs conditionne la répartition des produits, et une filtration fine est requise pour éliminer les particules solides.



Le rCB brut contient 8 à 16 % en poids de cendres. Certaines impuretés minérales ne peuvent être éliminées par un simple lavage acide-base. La pyrolyse endommage la structure renforçante du noir de carbone : le rCB ne peut donc remplacer que partiellement le noir de carbone vierge de qualité pneumatique.



L'approche EET repose sur une technologie de pyrolyse éprouvée en trois étapes. Après purification, le rCB désaché (cendres < 5 %, particules < 76 µm) est activé à la vapeur pour produire un charbon actif commercial avec un indice d'iode > 750 mg/g.



Le TPO brut est purifié puis distillé avec un point de coupe à 343 °C, séparant une fraction légère (LTT) et une fraction lourde (HTT). Le HTT peut être mélangé à de l'huile d'anthracène pour la production de noir de carbone par procédé four-huile. Le LTT peut être envoyé directement en raffinerie ou subir un hydrotraitement optionnel pour éliminer métaux organiques, chlore et soufre. Le gaz non condensable alimente les besoins thermiques internes du procédé.



Tous les produits doivent être conformes aux réglementations européennes en vigueur : le noir de carbone respecte les normes ASTM D1765, ISO 2556 et REACH ; le charbon actif suit REACH (CE 1907/2006) et CLP (CE 1272/2008). Une certification ISCC Plus est disponible pour la traçabilité en économie circulaire.

Normes européennes applicables

Noir de carbone N330, N660

- ASTM D1765
- ISO 2556
- REACH Annexe II (UE 2020/878)
- Teneur en HAP selon REACH Annexe XVII

Charbon actif

- REACH (CE 1907/2006)
- CLP (CE 1272/2008)

Certification ISCC Plus

Traçabilité de l'économie circulaire pour
l'ensemble des produits issus de la pyrolyse.

Le recyclage par pyrolyse des pneus usagés

Matières premières

Compositions différentes selon les types de pneus.

Impuretés telles que le sulfure de zinc (ZnS), l'oxyde de zinc (ZnO), l'orthosilicate de zinc (Zn_2SiO_4), le dioxyde de silicium (SiO_2), des aluminosilicates, des sulfures/silicates/sulfates de calcium-magnésium, le sulfure de fer(II) (FeS), l'oxyde de fer(III) (Fe_2O_3), ainsi que des sels alcalins mineurs, du chlore et du soufre présents dans le caoutchouc.

Procédé de pyrolyse

Le contrôle de la température est déterminant pour la composition du TPO et du rCB, en particulier pour limiter la contamination du rCB par l'huile organique.

Les défis liés à l'huile de pyrolyse (TPO)

Forte teneur en soufre

L'huile de pyrolyse thermique contient une forte teneur en soufre (principalement thiophénique). Sans craquage catalytique, les composés soufrés à haut poids moléculaire sont abondants. Une hydrodésulfuration poussée est indispensable pour les usages en charge de raffinerie, production de BTX ou additifs SAF, ce qui augmente les coûts d'exploitation.

Résidus de chlore organique (dizaines à centaines de ppm)

Le chlore organique provient principalement du caoutchouc butyle chloré des nappes intérieures. La décomposition thermique ne libère que partiellement le HCl ; des composés aromatiques organochlorés subsistent dans l'huile. Le lavage à l'eau n'élimine que les chlorures inorganiques. Le chlore résiduel provoque l'empoisonnement des catalyseurs et la corrosion des équipements en aval.

Faible aromaticité, forte part de fractions lourdes

Comparée à la pyrolyse catalytique, l'huile de pyrolyse thermique a une teneur aromatique bien plus faible et contient d'importants oligomères lourds bouillant au-delà de 343 °C. Complexe et instable, elle limite son usage direct comme carburant. Les fractions lourdes servent au noir de carbone, les fractions légères nécessitent une valorisation complexe.

Forte sensibilité au temps de séjour des vapeurs

Un temps de séjour prolongé intensifie le craquage thermique secondaire ; un temps trop court laisse un excès d'oligomères lourds. Les procédés industriels nécessitent un contrôle précis du temps de séjour pour équilibrer rendement et composition du produit. L'entraînement de fines particules de rCB dans l'huile impose une filtration fine à haute température.

Les défis liés au noir de carbone recyclé (rCB)

Forte teneur en cendres, efficacité d'élimination limitée

Le rCB brut présente une teneur en cendres de 8 à 16 % en poids (ZnS, ZnO, orthosilicate de zinc, silice, aluminosilicates, sulfures/silicates/sulfates de calcium-magnésium). Le lavage acide-base dilué n'élimine que le ZnS et le ZnO ; l'orthosilicate de zinc et les aluminosilicates sont chimiquement récalcitrants. Le broyage combiné au lavage ne permet pas d'atteindre la spécification de cendres ($\leq 0,5$ %) du noir de carbone vierge type N330.

Dommages thermiques aux structures d'agrégats renforçants

Les agrégats de noir de carbone d'origine frittent et s'agglomèrent sous l'effet de la pyrolyse ; l'absorption de DBP diminue. Le broyage ne fait que fragmenter les agglomérats macroscopiques sans reconstituer le réseau ramifié d'origine. La performance de renforcement dans le caoutchouc est nettement inférieure à celle du noir de carbone vierge : le rCB ne convient qu'à une substitution partielle des formulations de bande de roulement.

Soufre résiduel et traces de chlore

Le soufre est présent sous forme de sulfures inorganiques et de soufre organiquement lié au sein du rCB. Des traces de chlore organique subsistent également, affectant négativement le comportement de vulcanisation du caoutchouc.

Une technologie éprouvée et industrialisée

OBJECTIF

Faire des produits issus de la pyrolyse des produits commerciaux standards.

STRATÉGIE — S'appuyer sur des technologies matures

■ Procédé de pyrolyse en trois étages

Cette technologie est utilisée en Chine depuis plus de 4 ans pour la pyrolyse des pneus usagés. Elle permet de produire un rCB à très faible contamination en huile organique, grâce à un contrôle précis de la température à chaque étage.

■ Production de charbon actif par activation vapeur

Le rCB est purifié pour éliminer oxydes et silice (cendres < 5 %), puis granulé à < 76 μm . L'activation à la vapeur produit un charbon actif dont l'indice d'iode peut atteindre > 750 mg/g — un niveau permettant sa commercialisation.



Distillation et production de noir de carbone

Procédé de distillation

Purification : élimination des particules solides présentes dans l'huile.

Séparation du LTT et du HTT avec un point de coupe à 343 °C.

Production de noir de carbone (procédé four-huile)

À partir de l'huile lourde de pyrolyse (HTT).

Le HTT peut être mélangé à de l'huile d'anthracène pour produire du noir de carbone commercialisable.

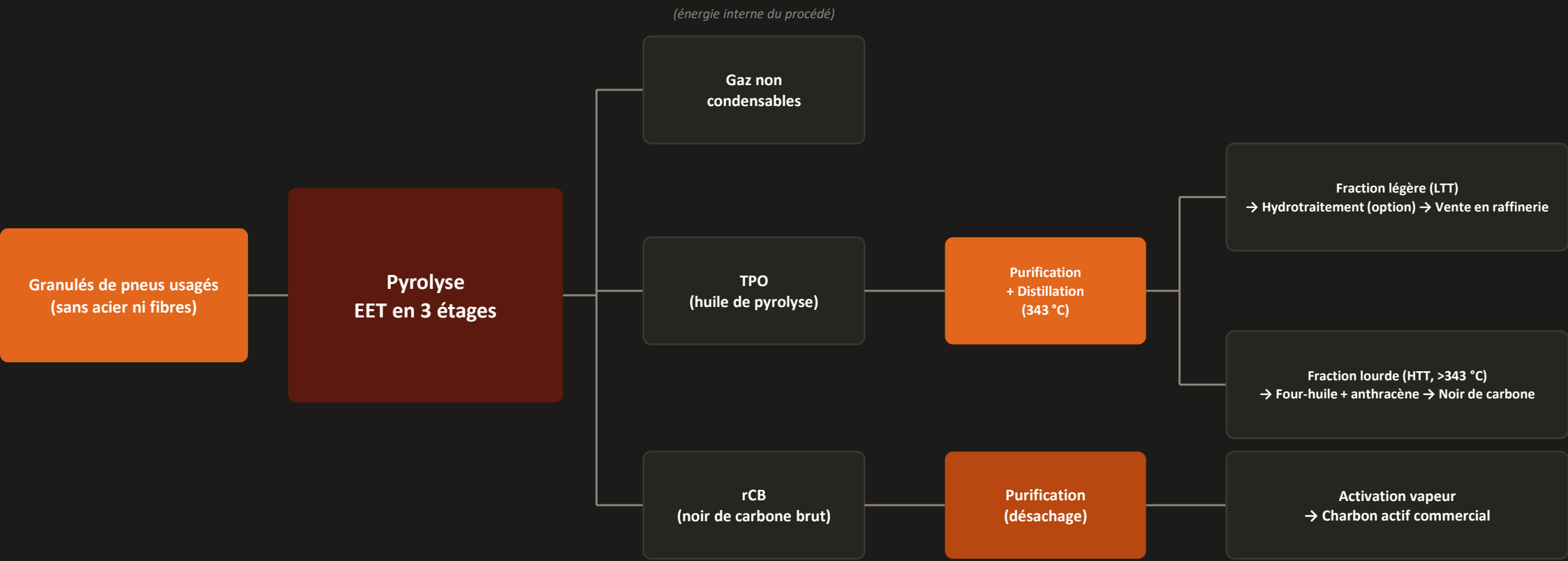
Le LTT : une charge conforme aux standards de raffinerie

Le LTT peut être vendu directement en raffinerie, ou traité par hydrotraitement pour éliminer métaux, chlore et soufre — notamment sous forme organique. Les produits peuvent alors être vendus comme charge de vapocraquage. Les standards acceptés par les grands raffineurs sont résumés ci-dessous.

Élément	Unité	ExxonMobil	Shell	Total	BP	Chevron	Réf. industrie	Sinopec
Chlore total	mg/kg	≤ 10	≤ 5-10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Silicium	mg/kg	≤ 3	≤ 1-3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Métaux totaux (Fe+Ca+Na+K...)	mg/kg	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Teneur en eau	% pds	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Soufre	mg/kg	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Azote	mg/kg	≤ 400	≤ 200-400	≤ 400	≤ 400	≤ 400	≤ 400	≤ 400
Oxygène	mg/kg	≤ 100	≤ 50-100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Indice de brome	gBr ₂ /100g	≤ 20	≤ 15-20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	Sur demande	Sur demande
Impuretés mécaniques	—	Aucun dépôt visible (toutes sources)						
Densité à 20 °C	g/cm³	0,78-0,85	0,78-0,85	0,78-0,85	0,78-0,85	0,78-0,8	0,78-0,85	0,78-0,85
Plage de distillation	—	C5-C30, fractions lourdes strictement contrôlées (toutes sources)						

PROCÉDÉ RECOMMANDÉ

Procédé de pyrolyse EET en trois étages



Le procédé transforme un déchet unique en trois flux valorisables — énergie interne, huile purifiée conforme aux standards de raffinerie, et carbone (noir de carbone ou charbon actif) — dans un cahier des charges maîtrisé de bout en bout.

Merci de votre attention

Discutons de la manière dont cette technologie de pyrolyse en trois étages peut s'intégrer à votre projet de valorisation.

Contact rapide

EPS Energies (Energy PyroSwiss)

Olivier Hubert

+33 629 05 77 07

**PYROLYSE
EN 3 ÉTAGES**