

PÉTROCHIMIE

Des hydrocarbures aux matériaux
du monde moderne

Noosophie IA

sous la direction de Hieronymus Anonymus



Éditions Noosophie
Comprendre pour agir

PÉTROCHIMIE

Des hydrocarbures aux matériaux du monde moderne

Noosophie IA

sous la direction de Hieronymus Anonymus

Éditions Noosophie

Informations éditoriales

Titre : Pétrochimie

Sous-titre : Des hydrocarbures aux matériaux du monde moderne

Auteur : Noosophie IA

Direction : Hieronymus Anonymus

Éditeur : Éditions Noosophie

Entité éditrice actuelle : Association Noosophie

Localisation publique : Roumagne, Lot-et-Garonne, France

Site : noosophie.fr

Édition : Première édition numérique

Date de publication : septembre 2026

Format : DOCX maître / PDF / EPUB

ISBN : non attribué

Prix : Gratuit

Licence : CC BY-NC-ND 4.0

Titulaire des droits / concédant : Hieronymus Anonymus (pseudonyme public ; identité civile non publiée)

© : Hieronymus Anonymus

Contact : contact@noosophie.fr

Cette édition est mise à disposition sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). Elle peut être copiée et partagée sous sa forme inchangée, avec attribution, à des fins non commerciales. La diffusion d'une traduction, adaptation, version modifiée ou œuvre dérivée nécessite une autorisation préalable. Pour toute demande : contact@noosophie.fr.

Licence : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Note sur la génération et la responsabilité éditoriale

Ce livre a été élaboré dans le cadre d'une collaboration entre Hieronymus Anonymus et Noosophe IA. Hieronymus Anonymus a initié le projet, fixé son objet et ses finalités, arbitré les orientations, relu, corrigé et validé le manuscrit final. Noosophe IA a contribué à la recherche documentaire, à la structuration, à la rédaction, à la comparaison des arguments, aux audits de cohérence et à l'édition. Le texte n'est donc ni une sortie brute d'un modèle ni un texte humain simplement corrigé par une IA : il résulte d'un processus itératif de génération, de critique, de vérification et de validation humaine. Les décisions de finalité, de validation et de publication demeurent humaines.

Note au lecteur

Ce livre n'est ni un manuel exhaustif de génie chimique ni un catalogue de molécules. Son objectif est de rendre intelligible un système industriel : comment des charges issues du pétrole et du gaz deviennent quelques molécules plateformes, puis des intermédiaires, des matériaux et finalement des objets.

Les équations, procédés et ordres de grandeur sont introduits lorsqu'ils éclairent un mécanisme ou une décision industrielle. Ils ne remplacent pas les données de conception, les normes de sécurité ni les ouvrages techniques spécialisés.

Le livre distingue systématiquement des questions souvent confondues : danger intrinsèque et risque réel, émissions de procédé et carbone contenu dans les produits, recyclabilité théorique et recyclage effectivement réalisé, substitution d'une matière et suppression d'une fonction.

Cette séparation n'a pas pour but de neutraliser le jugement. Elle vise au contraire à le rendre plus précis.

Sommaire

PARTIE I — Du pétrole aux molécules de base	5
Chapitre 1 — La pétrochimie, infrastructure matérielle du monde moderne	6
Chapitre 2 — Ce que contiennent réellement le pétrole et le gaz	18
Chapitre 3 — Casser et reconstruire les hydrocarbures	37
PARTIE II — Quelques molécules, des milliers de produits	61
Chapitre 4 — Éthylène et propylène : les grands arbres des oléfines	62
Chapitre 5 — Benzène, toluène et xylènes : l'univers des aromatiques	86
Chapitre 6 — Du complexe pétrochimique à l'objet quotidien	103
PARTIE III — Une industrie puissante sous contraintes	123
Chapitre 7 — Comment fonctionne et survit l'industrie pétrochimique	124
Chapitre 8 — Peut-on transformer la pétrochimie ?	144

PARTIE I — Du pétrole aux molécules de base

Chapitre 1 — La pétrochimie, infrastructure matérielle du monde moderne

Nous associons spontanément le pétrole à ce qui brûle. Essence dans un moteur, kérosène dans une turbine, fioul dans une chaudière : l'image dominante est celle d'une matière extraite du sous-sol, raffinée, puis détruite par combustion pour obtenir de l'énergie. Cette représentation est juste, mais incomplète. Une partie des hydrocarbures suit une autre destinée. Au lieu d'être brûlés pour libérer leur énergie, leurs molécules sont séparées, transformées, recombinaées et introduites dans des chaînes industrielles qui aboutissent à des emballages, des textiles, des peintures, des mousses, des adhésifs, des solvants, des détergents, des composants électroniques, des pièces automobiles, des matériaux d'isolation ou des dispositifs médicaux.

C'est ce second destin du pétrole et du gaz que nous allons étudier.

La pétrochimie peut être définie comme l'ensemble des transformations chimiques qui utilisent des charges hydrocarbonées — provenant principalement du pétrole et du gaz naturel — pour fabriquer des produits chimiques. L'Agence internationale de l'énergie inclut sous le terme *petrochemical* les produits issus de la conversion de telles charges : composés organiques, intermédiaires et produits finis tels que plastiques, fibres, solvants ou agents tensioactifs.¹ La définition paraît simple. Ses conséquences le sont beaucoup moins.

Entre un gisement de gaz naturel et une bouteille en polyéthylène, il n'existe pas une transformation unique. Il existe une succession de séparations, de conversions et de purifications. Entre une fraction de naphta et un vêtement en polyester, plusieurs familles de molécules apparaissent puis disparaissent comme intermédiaires. Ce qui semble, à l'échelle du consommateur, être un seul « matériau

plastique » est l'aboutissement d'une architecture industrielle complexe.

Comprendre la pétrochimie exige donc de changer d'échelle. Il faut cesser un moment de regarder les objets et regarder les chaînes qui les rendent possibles.

Du combustible à la matière première

Une molécule d'hydrocarbure possède au moins deux valeurs industrielles très différentes. Elle peut être brûlée, auquel cas ses liaisons chimiques sont utilisées comme réserve d'énergie. Elle peut aussi être conservée comme matière carbonée et transformée en d'autres molécules.

Cette distinction est fondamentale.

Lorsqu'un litre de carburant est brûlé, sa fonction principale est énergétique. Lorsque des hydrocarbures deviennent de l'éthylène, puis du polyéthylène, leur carbone devient au contraire une partie de la matière du produit final. Le pétrole n'est plus seulement une source d'énergie : il devient une source d'atomes organisables.

Cette fonction de matière première explique pourquoi la transition énergétique ne règle pas mécaniquement la question pétrochimique. Une automobile électrique peut réduire ou supprimer sa consommation directe d'essence sans supprimer le besoin de polymères, d'élastomères, d'isolants, de peintures, de résines, de câbles ou d'adhésifs qui entrent dans sa fabrication. Remplacer un moteur thermique résout une fonction — la propulsion sans combustion locale d'essence — mais ne répond pas automatiquement à une autre : produire les matériaux de l'objet.

Cette distinction devient de plus en plus importante à l'échelle mondiale. Alors que l'usage du pétrole comme combustible subit la concurrence de l'électrification et d'autres sources d'énergie dans plusieurs secteurs, l'usage comme matière première chimique persiste. L'Agence internationale de l'énergie constatait ainsi qu'en

2025 la progression de la demande mondiale de pétrole avait ralenti, mais identifiait encore le naphta, le GPL et l'éthane comme des matières premières majeures de la consommation pétrochimique.² Ses projections publiées en 2025 indiquaient même que la pétrochimie devait devenir, à partir de 2026, la principale source de croissance de la demande mondiale de pétrole, avec 18,4 millions de barils par jour nécessaires en 2030 à la production de polymères et de fibres synthétiques selon ce scénario.³

Ces chiffres ne prouvent pas que cette trajectoire soit inévitable. Une projection dépend de technologies, de politiques, de prix et de comportements susceptibles de changer. Ils montrent néanmoins pourquoi une compréhension de l'avenir du pétrole qui ignorerait la pétrochimie deviendrait insuffisante.

Le pétrole peut perdre une partie de son rôle énergétique sans perdre immédiatement son rôle matériel.

Une industrie fondée sur quelques carrefours moléculaires

L'un des paradoxes de la pétrochimie est l'extraordinaire diversité de ses produits à partir d'un nombre relativement restreint de grandes molécules intermédiaires.

Le pétrole brut lui-même n'est pas une substance unique. C'est un mélange complexe d'hydrocarbures. Le gaz naturel n'est pas davantage réductible au méthane : selon sa composition et son traitement, il peut fournir notamment de l'éthane, du propane ou du butane. Les raffineries et unités de traitement du gaz séparent donc des fractions qui possèdent des compositions, des volatilités et des utilisations différentes.

Certaines deviennent des carburants. D'autres deviennent des charges de pétrochimie.

Parmi celles-ci, le naphta occupe une place centrale dans de nombreuses régions. L'éthane constitue une autre charge majeure, particulièrement là où les liquides associés à la production de gaz

naturel sont abondants. L'Agence internationale de l'énergie cite précisément l'éthane et le naphta comme exemples de matières premières utilisées pour produire de l'éthylène dans des vapocraqueurs.⁴

Mais l'éthylène n'est pas un produit que le consommateur achète.

C'est justement ce qui le rend important.

La pétrochimie est organisée autour de molécules qui fonctionnent comme des carrefours. Elles ne valent pas principalement comme objets finaux mais par le nombre de transformations qu'elles rendent possibles. L'éthylène en est l'exemple le plus évident. Il peut être polymérisé pour donner différentes familles de polyéthylènes. Il peut aussi devenir oxyde d'éthylène, éthylène glycol ou d'autres intermédiaires qui ouvriront à leur tour de nouvelles chaînes.

Le propylène joue un rôle comparable. Le benzène, le toluène et les xylènes constituent une autre grande famille de plateformes, celle des aromatiques. D'autres routes partent du méthane ou du gaz de synthèse.

Nous pouvons donc représenter provisoirement la pétrochimie comme un arbre :

charges hydrocarbonées → molécules plateformes → intermédiaires → matériaux ou molécules fonctionnelles → produits.

Cette représentation reste volontairement simplifiée. Une véritable usine ne ressemble pas à un arbre dessiné sur une page. Les flux se séparent puis se rejoignent ; des sous-produits deviennent les matières premières d'autres unités ; des molécules sont recyclées ; des flux de chaleur sont récupérés ; des produits sont purifiés puis transportés vers d'autres complexes. Mais l'image de l'arbre permet de comprendre une première propriété fondamentale : la diversité visible à la fin du système ne signifie pas qu'une diversité équivalente existe à son entrée.

Quelques carrefours moléculaires ouvrent un très grand nombre de routes.

Le vapocraqueur : produire de la simplicité à partir de la complexité

Pour comprendre ce que signifie réellement « transformer » un hydrocarbure, prenons le cas qui deviendra central dans les prochains chapitres : le vapocraquage, ou *steam cracking*.

Le mot *craquage* est presque trompeusement simple. Il suggère que l'on casse de grosses molécules pour en obtenir de plus petites. C'est vrai, mais cela ne suffit pas à décrire le procédé.

Dans un vapocraqueur, une charge telle que l'éthane ou le naphta est chauffée très fortement en présence de vapeur. Les réactions thermiques rompent et réorganisent des liaisons chimiques et produisent notamment des oléfines légères comme l'éthylène et le propylène. Une description technique récente du procédé indique que les hydrocarbures peuvent atteindre environ 750 à 875 °C dans la zone réactionnelle, pendant un temps extrêmement court, avant que le mélange ne soit refroidi rapidement pour limiter les réactions secondaires.⁵

Cette opération révèle déjà plusieurs caractéristiques que nous retrouverons dans toute la pétrochimie.

D'abord, obtenir une molécule utile ne consiste presque jamais à la « trouver » telle quelle dans le pétrole. L'industrie doit fabriquer certaines architectures moléculaires à partir d'autres.

Ensuite, la réaction chimique n'est qu'une partie du procédé. Une unité industrielle doit chauffer, refroidir, comprimer, séparer et purifier. Il ne suffit pas qu'une réaction produise de l'éthylène : il faut aussi être capable d'isoler cet éthylène au milieu de nombreux autres composés avec une pureté compatible avec les réactions suivantes.

Enfin, la matière première influence profondément le résultat. Un vapocraqueur alimenté surtout en éthane ne produit pas exactement la même distribution de produits qu'un vapocraqueur utilisant du naphta. Une charge plus complexe ouvre davantage de voies réactionnelles et génère davantage de coproduits. C'est une première raison pour laquelle la géographie du gaz, du pétrole et des raffineries influence la géographie de la pétrochimie.

Nous reviendrons longuement sur ce procédé. Pour l'instant, une idée suffit : le véritable cœur de la pétrochimie n'est pas le pétrole, mais la maîtrise des transformations.

Une ressource souterraine ne devient pas spontanément une matière moderne. Elle doit traverser une architecture technique.

Pourquoi fabriquer autant de molécules différentes ?

Si la pétrochimie a pris une telle place, ce n'est pas simplement parce que le pétrole a été abondant. C'est parce que la chimie du carbone permet une diversité extraordinaire de structures.

Deux matériaux peuvent contenir principalement du carbone et de l'hydrogène tout en possédant des comportements très différents selon la longueur de leurs chaînes moléculaires, leurs ramifications, les groupes chimiques qui y sont attachés, leur organisation spatiale ou leur degré de réticulation.

Cette diversité permet d'obtenir des matériaux souples ou rigides, transparents ou opaques, résistants aux chocs ou faciles à étirer, isolants ou conducteurs lorsqu'ils sont formulés de manière appropriée, durables ou conçus pour se dégrader dans certaines conditions. Elle permet aussi de fabriquer des solvants, des lubrifiants, des tensioactifs et d'innombrables intermédiaires qui ne deviennent jamais eux-mêmes des plastiques.

Parler de « plastique » comme s'il s'agissait d'une matière unique masque donc une grande partie du problème.

Le polyéthylène d'un film souple n'est pas le polycarbonate d'une pièce rigide. Un polyester textile n'est pas un caoutchouc synthétique. Une résine époxy n'est pas un détergent. Tous peuvent néanmoins appartenir, directement ou par certains de leurs précurseurs, à l'univers pétrochimique.

Cette diversité explique à la fois la puissance et l'inertie du système.

La puissance vient de sa capacité à adapter finement les propriétés de la matière à une fonction. Une industrie qui sait modifier la structure moléculaire, ajouter des groupes fonctionnels, contrôler une polymérisation et formuler des additifs dispose d'un espace immense de conception.

L'inertie vient de la même réussite. Une fois qu'un matériau possède simultanément le bon coût, la bonne masse, la bonne résistance, la bonne stabilité chimique, les bonnes propriétés barrières, la compatibilité avec les machines existantes et un réseau mondial de production, son remplacement ne dépend pas d'une seule caractéristique. Trouver une matière qui lui ressemble ne suffit pas. Il faut reproduire l'ensemble des fonctions pertinentes à un coût et avec des impacts acceptables.

Voilà pourquoi la transition pétrochimique ne peut pas être réduite à la formule : « remplacer le pétrole par autre chose ».

La vraie question est : **remplacer quelle molécule, dans quelle fonction, par quelle route de production, avec quelles ressources, quelles infrastructures et quelles conséquences ?**

Une infrastructure généralement invisible

La pétrochimie possède une autre particularité : elle disparaît derrière les objets qu'elle produit.

Nous parlons d'une bouteille, rarement d'éthylène. Nous parlons d'un pneu, rarement de butadiène, de styrène ou des chaînes industrielles qui ont produit ses différents constituants. Nous parlons d'un vêtement, pas du paraxylène et de l'éthylène glycol dont peut

provenir le polyester. L'objet final efface en quelque sorte son histoire moléculaire.

Cette invisibilité favorise deux erreurs opposées.

La première consiste à sous-estimer la pétrochimie. Parce que nous ne voyons pas les molécules intermédiaires, nous pouvons imaginer qu'elle ne concerne essentiellement que les emballages plastiques. Or les produits pétrochimiques sont présents dans les textiles, les pneus, les détergents, les équipements électroniques et de nombreux autres objets ordinaires. L'AIE souligne précisément cette diffusion dans le tissu matériel des sociétés contemporaines.⁶

La seconde consiste à surestimer son homogénéité. On parle alors de « la pétrochimie » comme si chaque application possédait la même utilité, les mêmes risques et les mêmes possibilités de substitution. Un emballage jetable, une isolation thermique destinée à fonctionner plusieurs décennies, un dispositif médical stérile, une fibre textile et un revêtement anticorrosion ne soulèvent pourtant pas les mêmes problèmes.

Un examen sérieux devra donc résister aux jugements globaux trop rapides.

Dire que la pétrochimie a permis des fonctions extrêmement utiles n'implique pas que tous ses usages soient nécessaires.

Constater l'importance de certains matériaux ne démontre pas que leur mode actuel de production soit durable.

Montrer les coûts environnementaux d'une filière ne permet pas non plus de conclure que toute substitution lui sera automatiquement préférable.

Il faut suivre les chaînes.

Ce que signifie réellement « sortir du pétrole »

Cette méthode devient particulièrement importante lorsque nous abordons la transition écologique.

Imaginons que nous souhaitions supprimer un produit pétrochimique. Plusieurs stratégies deviennent possibles.

Nous pouvons supprimer l'usage lui-même lorsqu'il répond à une demande évitable. Nous pouvons conserver la fonction mais réduire la quantité de matière nécessaire. Nous pouvons réemployer plus longtemps le produit. Nous pouvons recycler le matériau. Nous pouvons remplacer le matériau par un autre. Nous pouvons enfin tenter de produire une molécule identique à partir d'un carbone non fossile.

Ces stratégies ne sont pas équivalentes.

Recycler une molécule carbonée ne supprime pas nécessairement l'énergie nécessaire à sa collecte, son tri et sa transformation. Produire un composé à partir de biomasse déplace la question vers les sols, les rendements, l'eau et les usages concurrents de cette biomasse. Utiliser du dioxyde de carbone comme source de carbone exige de fournir l'énergie et souvent l'hydrogène nécessaires pour reconstruire des molécules énergétiquement plus riches. Remplacer un polymère léger par un matériau plus lourd peut modifier les besoins de transport ou la durée de vie du produit.

Aucune de ces difficultés ne signifie que la transformation serait impossible. Elles signifient que la chimie impose de poser correctement la question.

Il n'existe pas de substitution sans matière, sans énergie et sans procédé.

La véritable alternative au système actuel devra donc agir sur plusieurs niveaux simultanément : les quantités demandées, la durée d'usage, la circularité, l'efficacité des procédés, l'origine de l'énergie et l'origine des atomes de carbone.

Autrement dit, décarboner la pétrochimie ne signifie pas nécessairement éliminer le carbone de ses produits. Dans un polymère organique, le carbone constitue précisément une partie de la matière recherchée. L'enjeu est plutôt de réduire l'extraction de

carbone fossile neuf, d'éviter son accumulation inutile dans des produits rapidement jetés, de limiter les émissions produites au long de la chaîne et de déterminer quelles fonctions justifient réellement une production matérielle.

Cette distinction entre **carbone comme combustible** et **carbone comme matière** accompagnera tout le livre.

Voir les chaînes avant de les juger

Le but des prochains chapitres n'est donc pas d'apprendre une encyclopédie de noms chimiques.

Nous commencerons par regarder les matières premières : pétrole brut, gaz naturel, liquides de gaz naturel, fractions de raffinerie. Nous verrons pourquoi leur composition compte et comment elles sont séparées.

Nous entrerons ensuite dans les grandes machines de transformation : vapocraquage, reformage, séparation des aromatiques et autres routes nécessaires. Nous suivrons alors les molécules plateformes elles-mêmes — éthylène, propylène, benzène, toluène, xylènes et quelques autres — non comme une liste à mémoriser, mais comme des embranchements.

À partir de ces embranchements, nous reconstruirons plusieurs objets. Cette bouteille vient de quelque part. Cette mousse aussi. Cette fibre textile aussi.

À chaque fois, nous remonterons la chaîne : produit, matériau, polymère ou composé fonctionnel, intermédiaires, molécule plateforme, procédé, charge.

Puis nous inverserons le regard et redescendrons la chaîne pour comprendre pourquoi certaines voies industrielles se sont imposées plutôt que d'autres.

Ce n'est qu'après cette reconstruction que nous pourrons examiner correctement les coûts économiques, les risques industriels, les

pollutions, les émissions de gaz à effet de serre, les déchets, le recyclage et les alternatives.

La méthode du livre tient donc dans une règle simple : **comprendre avant de juger, mais ne jamais utiliser la compréhension comme prétexte pour éviter le jugement.**

La pétrochimie est une réussite technique considérable. Elle a donné accès à des propriétés matérielles qui ont transformé la médecine, le bâtiment, les transports, l'habillement, l'agriculture, l'électronique et la vie quotidienne. Elle est aussi devenue une infrastructure gigantesque dépendante de matières fossiles, d'installations énergivores et de volumes de produits dont une partie devient rapidement déchet.

Ces deux propositions ne s'annulent pas. Elles définissent le problème. Nous pouvons maintenant entrer dans la matière elle-même.

Notes

1. International Energy Agency, *Glossary*, entrée « Petrochemical ». L'AIE définit un produit pétrochimique comme provenant de la conversion d'une charge hydrocarbonée, généralement issue du raffinage du pétrole ou des liquides de gaz naturel, et inclut notamment produits chimiques organiques, intermédiaires, plastiques, fibres, solvants et tensioactifs. <https://www.iea.org/glossary>

2. International Energy Agency, *Global Energy Review 2026 — Oil*. L'AIE identifie le naphta, le GPL et l'éthane parmi les principales matières premières associées à la consommation pétrochimique et constate un ralentissement de cette demande en 2025. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/oil>

3. International Energy Agency, *Oil 2025*, résumé exécutif. Le scénario publié en juin 2025 projette que la pétrochimie devient à partir de 2026 la principale source de croissance de la demande

pétrolière mondiale et estime à 18,4 Mb/j la consommation de pétrole associée aux polymères et fibres synthétiques en 2030. Il s'agit d'une projection, non d'un fait futur acquis. <https://www.iea.org/reports/oil-2025/executive-summary>

4. International Energy Agency, *Glossary*, entrée « Chemical feedstock ». L'éthane et le naphta y sont explicitement donnés comme exemples de charges servant à produire de l'éthylène par vapocraquage. <https://www.iea.org/glossary>

5. Article de synthèse sur les technologies de recyclage chimique décrivant le vapocraquage : échauffement de la charge, passage très bref dans une zone d'environ 750–875 °C, mécanismes radicalaires puis refroidissement rapide. Ces paramètres sont donnés ici uniquement pour établir l'ordre de grandeur ; le chapitre consacré au vapocraquage devra documenter les variations selon charge et technologie. Source complète : « Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges », section 2.1.2. <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926223000018>

6. International Energy Agency, *The Future of Petrochemicals*. L'AIE souligne l'usage des produits pétrochimiques dans les vêtements, pneus, équipements numériques, emballages, détergents et de nombreux autres biens. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>

Chapitre 2 — Ce que contiennent réellement le pétrole et le gaz

Le pétrole n'est pas une molécule.

Cette évidence est si importante qu'elle mérite d'être placée au début du chapitre. Une représentation courante imagine le pétrole brut comme une substance homogène dont l'industrie extrairait ensuite différents produits. En réalité, le brut est déjà un mélange extrêmement complexe. Le raffinage commence donc moins par « fabriquer » que par reconnaître une diversité qui existe avant l'usine.

Le gaz naturel pose un problème comparable, mais sous une autre forme. Le méthane en constitue généralement le composant principal, pourtant le gaz qui sort d'un réservoir peut également contenir de l'éthane, du propane, des butanes, des pentanes, de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, de l'azote, du sulfure d'hydrogène et d'autres constituants en proportions variables.¹

Avant la pétrochimie proprement dite, il faut donc apprendre à séparer.

Cette opération pourrait sembler secondaire face aux grands réacteurs qui casseront ou reconstruiront les molécules. Elle ne l'est pas. Une industrie chimique ne peut pas traiter indifféremment « du pétrole » ou « du gaz ». Elle travaille avec des charges définies, dont la composition, les propriétés physiques, la pureté et le coût déterminent en partie ce que les unités suivantes pourront produire.

La première transformation intellectuelle que nous devons accomplir consiste donc à remplacer deux mots familiers — pétrole et gaz — par une vision plus précise de leur contenu.

Le pétrole brut est une population de molécules

L'Energy Information Administration américaine définit le pétrole brut comme un mélange d'hydrocarbures présent à l'état liquide dans des réservoirs souterrains et restant liquide après son arrivée à la surface dans les conditions définies par les installations de séparation. Le brut peut également contenir de petites quantités de composés non hydrocarbonés, notamment soufrés, ainsi que divers métaux.²

Le mot important est mélange.

Un hydrocarbure est une molécule constituée uniquement de carbone et d'hydrogène. Cette définition extrêmement simple permet pourtant une diversité considérable. Deux molécules possédant le même nombre d'atomes de carbone peuvent être organisées différemment ; certaines sont linéaires, certaines ramifiées, certaines cycliques. D'autres contiennent des structures aromatiques dont les électrons et les liaisons possèdent une organisation particulière.

Le pétrole rassemble une immense variété de ces structures.

Pour ne pas se perdre dans les noms de molécules individuelles, la chimie pétrolière regroupe traditionnellement une grande partie des hydrocarbures du brut en quelques familles structurales : les alcanes, longtemps appelés paraffines dans le vocabulaire pétrolier ; les cycloalcanes, également appelés naphthènes ; et les hydrocarbures aromatiques. Des structures mixtes plus complexes apparaissent également, notamment lorsque la masse moléculaire augmente.³

Ces catégories ne sont pas seulement classificatoires. Leur structure modifie leurs propriétés physiques et leur comportement chimique.

Un alcane linéaire est constitué d'une chaîne de carbones reliés par des liaisons simples et saturés en hydrogène. Le méthane est le plus simple :



L'éthane en contient deux :



Puis viennent le propane, le butane, le pentane et des chaînes progressivement plus longues.

Mais une formule brute ne suffit pas toujours à définir une molécule. À partir d'un certain nombre de carbones, plusieurs organisations deviennent possibles. Le butane, par exemple, peut exister sous forme de chaîne droite — le n-butane — ou sous une forme ramifiée, l'isobutane. Les deux molécules ont la même formule brute, C_4H_{10} , mais leur organisation spatiale diffère.

La pétrochimie exploitera constamment ce fait : la propriété d'une matière dépend non seulement des atomes présents, mais de leur organisation.

Les cycloalcanes poussent cette logique plus loin. Une partie de leur chaîne carbonée se referme sur elle-même pour former un ou plusieurs cycles saturés. Les aromatiques possèdent, eux, une structure électronique et cyclique particulière dont le benzène constitue l'exemple le plus célèbre.

Un pétrole brut peut contenir toutes ces familles simultanément.

Il contient en outre des composés plus lourds et plus complexes qui associent cycles, chaînes latérales, hétéroatomes et structures aromatiques condensées. La description complète d'un seul brut peut devenir si complexe qu'en pratique l'industrie utilise plusieurs systèmes de caractérisation selon la question posée : distribution des températures d'ébullition, densité, teneur en soufre, familles moléculaires ou encore répartition entre saturés, aromatiques, résines et asphaltènes.

Cela signifie qu'il n'existe pas un pétrole brut universel.

Il existe des pétroles bruts.

Léger, lourd, doux, soufré : les mots décrivent des contraintes

Deux propriétés reviennent constamment lorsqu'on compare des bruts : leur densité et leur teneur en soufre.

La densité pétrolière est fréquemment exprimée par la gravité API. L'échelle est inverse de ce que l'intuition suggérerait : un pétrole de gravité API élevée est relativement léger, tandis qu'une valeur plus faible correspond à un brut plus dense.

Cette différence importe parce qu'un brut léger contient généralement davantage de molécules appartenant aux fractions légères. Un brut lourd fournit proportionnellement davantage de fractions lourdes et nécessite souvent des transformations supplémentaires si la raffinerie souhaite maximiser la production de produits légers de forte valeur. L'EIA souligne précisément que les propriétés physiques du brut déterminent les choix de traitement de la raffinerie et qu'un brut lourd exige généralement des procédés plus complexes qu'un brut léger pour produire de grandes quantités de produits légers de forte valeur.⁴

La seconde distinction est celle du soufre.

Un pétrole dit sweet, ou doux, contient relativement peu de soufre ; un brut sour, ou soufré, en contient davantage. Les seuils employés pour ces catégories peuvent varier selon les conventions et les marchés. Leur utilité ici n'est donc pas de fixer une frontière numérique universelle, mais de signaler une contrainte industrielle réelle : les composés soufrés affectent les procédés, certains catalyseurs, la qualité des produits et les besoins de traitement.

Les pétroles bruts ne contiennent d'ailleurs pas seulement carbone, hydrogène et soufre. Des composés azotés et oxygénés sont également présents, ainsi que des traces métalliques, notamment de nickel, de vanadium et parfois de fer. Les proportions varient fortement d'un pétrole à l'autre.³

Ces constituants minoritaires deviennent parfois industriellement majeurs.

Un métal présent en quantité infime comparée au carbone peut perturber un catalyseur. Un composé soufré peut devoir être éliminé avant une étape ultérieure. Une concentration accrue de molécules très lourdes peut modifier la viscosité, l'encrassement et les besoins de conversion.

L'importance chimique ne se mesure donc pas toujours à la proportion massique.

Pourquoi la taille des molécules change leurs propriétés

Pour comprendre la séparation du pétrole, il faut maintenant relier structure moléculaire et comportement physique.

Considérons une série très simple : méthane, éthane, propane, butane, pentane, hexane.

Toutes ces molécules appartiennent à la même famille, les alcanes. Pourtant, à température et pression ordinaires, leurs comportements diffèrent fortement. Les plus petites sont très volatiles. Lorsque la chaîne s'allonge, les forces d'interaction entre molécules augmentent généralement, les températures d'ébullition montent et la matière devient progressivement moins volatile.

Cette tendance n'est pas une règle suffisante pour prédire seule le comportement de tous les composants d'un pétrole réel : ramification, cyclicité et aromaticité modifient également les propriétés. Mais elle fournit la clé physique de la première grande opération d'une raffinerie.

Les molécules du brut ne bouillent pas toutes à la même température. On peut donc les séparer approximativement selon leur volatilité. C'est exactement la fonction de la distillation.

Une fraction n'est pas une molécule

Avant d'entrer dans la colonne de distillation, une confusion doit être éliminée.

Quand une raffinerie produit du naphta, du kérosène ou du gazole, elle n'a généralement pas isolé une espèce chimique unique.

Elle a isolé une fraction.

Une fraction pétrolière est un ensemble de molécules dont les propriétés de volatilité leur permettent d'être récupérées dans une certaine plage de distillation. La frontière n'est pas celle d'une formule moléculaire précise mais d'un domaine de comportement physique.

Le naphta n'est donc pas « la molécule de naphta ».

Il n'existe pas de telle molécule.

Il s'agit d'un mélange relativement léger d'hydrocarbures dont la composition dépend du brut, des coupures choisies et des procédés employés.

Cette distinction est fondamentale pour la pétrochimie, parce qu'un vapocraqueur alimenté au naphta reçoit un mélange complexe, tandis qu'un vapocraqueur utilisant de l'éthane travaille avec une charge moléculaire beaucoup plus simple et plus précisément définie.

Nous commençons ainsi à comprendre pourquoi ces deux installations ne produisent pas les mêmes distributions de molécules.

La distillation : séparer avant de transformer

Dans une raffinerie, le pétrole brut est chauffé puis envoyé vers une colonne de distillation atmosphérique. Les composants ne sont pas séparés un par un : ce serait matériellement et économiquement absurde pour la plupart des usages. Ils se répartissent plutôt en grandes fractions selon leurs plages d'ébullition.

Les fractions légères se retrouvent vers le haut de la colonne. Les fractions intermédiaires sont retirées à différents niveaux. Les composants plus lourds descendent vers le bas. Lorsque certaines fractions deviennent trop lourdes pour être distillées efficacement à

pression atmosphérique sans dégradation thermique excessive, une distillation sous vide peut poursuivre la séparation à une température compatible avec leur stabilité.⁵

Cette colonne ne doit pas être imaginée comme une série de tiroirs étanches dans lesquels chaque molécule choisit parfaitement son étage.

La séparation industrielle repose sur des échanges répétés entre phases liquide et vapeur. Aux différents niveaux de la colonne, les composants les plus volatils ont davantage tendance à rejoindre la vapeur et les moins volatils à rester dans le liquide. L'organisation des flux et du gradient thermique permet ainsi d'enrichir progressivement certaines zones en fractions plus légères ou plus lourdes.

Le résultat est une série de coupes dont les appellations varient selon les raffineries et leurs objectifs : gaz légers, naphthas, kérosènes, distillats, gasoils et résidus, notamment.⁵

Cette opération accomplit quelque chose de conceptuellement important.

Elle transforme un mélange incontrôlable en plusieurs mélanges plus spécialisés.

La raffinerie ne possède pas encore nécessairement les molécules que souhaite la pétrochimie. Elle possède désormais des flux dont la composition est suffisamment resserrée pour être orientée vers certaines transformations.

Le naphta : une charge au carrefour du raffinage et de la pétrochimie

Parmi ces fractions, le naphta joue un rôle central dans notre histoire.

Le terme couvre plusieurs coupes pétrolières légères dont la composition et les plages d'ébullition peuvent varier. Elles

contiennent notamment des alcanes, cycloalcanes et aromatiques légers.

Une partie du naphta peut être destinée à la fabrication de composants d'essence. Une autre peut alimenter des procédés pétrochimiques.

Deux grandes directions nous intéressent particulièrement.

La première conduit vers le vapocraquage. Chauffé très rapidement à haute température en présence de vapeur, le naphta produit un mélange riche en molécules plus petites et souvent insaturées, dont éthylène et propylène, mais aussi divers coproduits.

La seconde passe par le reformage catalytique. Ce procédé réorganise certaines molécules du naphta et produit notamment des molécules à indice d'octane élevé ainsi que des aromatiques. Dans une raffinerie, l'objectif dominant peut être l'amélioration des composants d'essence ; dans une chaîne pétrochimique, benzène, toluène et xylènes peuvent devenir des produits recherchés pour eux-mêmes.⁵

Le même flux issu du raffinage peut donc devenir l'entrée de systèmes industriels différents.

C'est l'un des motifs qui rendent artificielle une frontière trop nette entre raffinage et pétrochimie.

Les deux industries restent distinctes par leurs finalités et nombre de leurs procédés, mais elles peuvent partager matières premières, intermédiaires, infrastructures énergétiques et unités de séparation.

La pétrochimie commence souvent dans un flux qui aurait pu suivre une autre destination.

Le gaz naturel n'est pas simplement du méthane

Passons maintenant de l'autre côté du système.

Le gaz naturel commercial distribué dans un réseau est souvent suffisamment riche en méthane pour que l'on finisse par confondre les deux notions.

Le gaz issu du réservoir peut être beaucoup plus complexe.

L'EIA décrit le gaz naturel humide comme un gaz qui contient, avec le méthane, des hydrocarbures récupérables plus lourds tels qu'éthane, propane, butanes et pentanes, ainsi que de la vapeur d'eau. Le gaz de tête de puits peut également contenir des constituants non hydrocarbonés comme le sulfure d'hydrogène, le dioxyde de carbone, l'azote ou l'hélium.⁶

Ces différences conduisent notamment à distinguer gaz humide et gaz sec.

Après traitement et séparation d'une partie des hydrocarbures liquéfiables et des composants non désirés, le flux principalement destiné au réseau est appelé gaz sec ou gaz de qualité pipeline. Tous les gaz de gisement ne nécessitent cependant pas exactement le même traitement : certains satisfont déjà une partie importante des spécifications recherchées.⁶

Pour la pétrochimie, les hydrocarbures récupérés sont particulièrement intéressants.

Le méthane peut lui-même devenir une matière première chimique, notamment vers l'hydrogène, le gaz de synthèse ou le méthanol. Mais les molécules C_2 , C_3 et C_4 — éthane, propane et butanes — ouvrent d'autres routes essentielles vers les oléfines et leurs dérivés.

Avant de les utiliser, il faut cependant les séparer du flux gazeux.

Nettoyer le gaz avant de récupérer ses molécules

Le gaz issu d'un gisement n'est pas automatiquement apte à entrer dans un réseau ou dans une unité pétrochimique.

L'eau doit souvent être réduite pour respecter les spécifications de transport et limiter notamment les risques associés aux hydrates et à la corrosion.

Le sulfure d'hydrogène peut devoir être éliminé en raison de sa toxicité, de son caractère corrosif et des spécifications imposées au gaz.

Le dioxyde de carbone est également retiré lorsque sa concentration est excessive pour les spécifications et les procédés concernés.

Les installations utilisent pour cela plusieurs familles d'opérations. L'EIA mentionne notamment la déshydratation pour éliminer l'eau et les unités de traitement aux amines pour retirer le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de carbone.⁷

Ce traitement introduit une idée qui accompagnera tout le livre : la pureté est une production industrielle.

Une ressource naturelle contient rarement exactement la molécule, dans exactement la proportion et avec exactement la qualité qu'exige la transformation suivante.

Il faut construire la charge avant de construire le produit.

HGL, NGPL, NGL : des mots proches pour des flux qu'il faut distinguer

Le vocabulaire de ces hydrocarbures légers mérite une précision, parce que plusieurs terminologies coexistent.

L'Energy Information Administration utilise aujourd'hui HGL, hydrocarbon gas liquids, comme catégorie générale regroupant des hydrocarbures légers tels qu'éthane, propane, butanes et essence naturelle. Lorsque ces hydrocarbures proviennent spécifiquement des installations de traitement du gaz naturel, elle emploie plus précisément NGPL, natural gas plant liquids.⁸

Le terme NGL, natural gas liquids, reste néanmoins extrêmement courant dans l'industrie et dans une partie importante de la

littérature technique. Il est souvent employé, au sens pratique, pour désigner l'éthane, le propane, les butanes et les fractions plus lourdes récupérés du gaz naturel.

Le livre conservera donc ponctuellement l'abréviation NGL lorsqu'elle correspond au vocabulaire d'une source ou à l'usage industriel, mais distinguera autant que nécessaire la catégorie générale des HGL et les liquides produits par les installations de traitement du gaz.

Cette précision terminologique ne change pas la chimie.

Elle évite simplement de faire passer une convention de vocabulaire pour une catégorie naturelle.

Comment les hydrocarbures légers quittent le gaz

Les composants plus lourds que le méthane doivent ensuite être récupérés.

Il serait trompeur d'imaginer cette opération comme une simple condensation uniforme obtenue en « refroidissant le gaz ». Les technologies de récupération exploitent différents jeux de pression et de température ; elles peuvent utiliser refroidissement, compression, détente et procédés cryogéniques selon la composition du flux, l'installation et le taux de récupération recherché.⁹

Le principe physique reste cependant intuitif : les différents hydrocarbures n'ont pas la même volatilité. En modifiant suffisamment les conditions de température et de pression, une partie des composants plus lourds peut être séparée du flux majoritairement méthanique.

Dans les installations modernes, les procédés cryogéniques permettent notamment de récupérer efficacement des composants légers tels que l'éthane.

Le flux liquide obtenu n'est pas nécessairement constitué immédiatement de produits purs.

Il peut d'abord être un mélange de plusieurs hydrocarbures légers, parfois appelé Y-grade dans l'industrie nord-américaine. L'EIA décrit ce mélange comme pouvant contenir éthane, propane, n-butane, isobutane et essence naturelle.⁹

Il faut encore le fractionner.

Fractionner les liquides : exploiter encore les différences de volatilité

Nous retrouvons ici la même idée physique que dans la raffinerie, mais appliquée à des molécules beaucoup plus légères.

Le mélange peut être envoyé dans une succession de colonnes de fractionnement qui séparent les constituants selon leurs volatilités relatives.

Une colonne destinée principalement à retirer l'éthane est appelée deethanizer.

Une autre sépare principalement le propane : depropanizer.

D'autres étapes permettent ensuite de séparer les butanes et les fractions plus lourdes.

À la sortie, l'industrie dispose de produits beaucoup plus concentrés en une famille particulière d'hydrocarbures. Dans la terminologie de l'EIA, certains flux commercialisés comme produits de pureté contiennent au moins 90 % d'un type de HGL.⁹

L'industrie ne possède donc plus seulement « du gaz naturel ». Elle possède des charges séparées et commercialisables. Et cette séparation modifie radicalement leur fonction économique. L'éthane peut partir vers un vapocraqueur. Le propane peut être utilisé comme combustible ou comme matière première pétrochimique. Les butanes disposent d'autres usages énergétiques, pétroliers et chimiques.

L'essence naturelle et les fractions plus lourdes rejoignent encore d'autres chaînes.

Une seule production de gaz a ainsi donné naissance à plusieurs marchés.

Éthane ou naphta : deux façons d'arriver à l'éthylène

Nous pouvons désormais relier ce chapitre au précédent.

Deux installations peuvent chercher à produire la même molécule — l'éthylène — tout en partant de charges très différentes.

La première utilise de l'éthane récupéré du gaz naturel.

Sa charge est chimiquement relativement simple. Lors du vapocraquage, la route vers l'éthylène est particulièrement favorable. C'est pourquoi l'éthane constitue une matière première très attractive lorsqu'il est abondant et bon marché.

La seconde utilise du naphta.

Cette charge contient déjà de nombreuses molécules. Son craquage produit donc un ensemble beaucoup plus diversifié : éthylène, propylène, hydrocarbures C_4 et diverses fractions plus lourdes selon la composition de la charge et les conditions opératoires.

Ni l'une ni l'autre de ces routes n'est « la bonne » dans l'absolu.

Un vapocraqueur à éthane favorise fortement l'éthylène, mais génère moins de certains coproduits recherchés.

Le naphta permet une palette plus large de produits, mais impose une chaîne de séparation plus complexe et une économie davantage dépendante de la valorisation des coproduits.

La géographie des ressources revient alors dans l'équation.

Aux États-Unis, l'éthane est essentiellement utilisé comme charge pétrochimique pour fabriquer de l'éthylène, tandis que le propane et les butanes possèdent des usages énergétiques et chimiques beaucoup plus diversifiés.¹⁰

Dans les régions où le naphta de raffinerie est davantage disponible ou économiquement compétitif, les chaînes industrielles peuvent s'organiser autrement.

La molécule finale ne raconte donc pas, à elle seule, l'histoire de sa production.

Deux molécules d'éthylène chimiquement identiques peuvent provenir de chaînes industrielles différentes.

Pourquoi la pétrochimie ne commence pas au réacteur

Nous pouvons maintenant corriger l'image laissée volontairement simplifiée par le premier chapitre.

Nous avons représenté le système ainsi :

charges → molécules plateformes → intermédiaires → matériaux → produits.

Mais les charges elles-mêmes sont déjà le résultat d'une infrastructure.

Le naphta a dû être séparé d'un pétrole brut.

L'éthane a dû être récupéré d'un flux gazeux, puis séparé des autres hydrocarbures légers.

Avant le réacteur pétrochimique apparaissent donc extraction, traitement, séparation, purification, distillation ou fractionnement selon la route considérée.

Une représentation plus exacte devient :

ressource géologique → traitement et séparation → charge
pétrochimique → transformation chimique → séparation et
purification → plateforme → nouvelles transformations.

Cette correction compte parce qu'elle révèle où se trouvent réellement les besoins énergétiques, les coûts et les impacts.

Une analyse environnementale qui commencerait uniquement à l'entrée du vapocraqueur oublierait l'extraction et la préparation de la charge.

Une analyse économique qui ignorerait le raffinage ou le traitement du gaz ne comprendrait pas pourquoi certaines régions disposent d'avantages de coût.

Une analyse technologique qui considérerait les charges comme interchangeables manquerait les contraintes moléculaires qui façonnent les installations.

Le système commence avant la réaction.

Une matière première n'est jamais seulement une formule chimique

Nous pouvons aller plus loin.

Supposons deux livraisons d'éthane répondant aux mêmes spécifications chimiques.

Pour le réacteur, leur molécule cible est la même : C_2H_6 .

Pour l'économie industrielle et pour leur empreinte amont, elles peuvent pourtant être différentes.

L'une peut provenir d'une installation voisine et arriver par pipeline.

L'autre peut exiger fractionnement à longue distance, réfrigération, transport maritime puis stockage.

Le coût énergétique et financier de la molécule ne réside donc pas entièrement dans sa formule.

La même observation vaut pour le naphta. Deux naphtas peuvent posséder des compositions différentes en alcanes, cycloalcanes et aromatiques. Ils peuvent provenir de bruts différents ou avoir subi des traitements différents. Leur comportement au craquage ne sera pas nécessairement identique.

Pour l'ingénieur, une charge est ainsi définie par plusieurs niveaux simultanés : sa composition chimique, ses propriétés physiques, ses contaminants, sa stabilité, son origine et sa disponibilité, son coût et les produits qu'elle permet d'obtenir.

Ce point prépare directement le chapitre suivant.

Nous allons bientôt entrer dans les réacteurs. Mais les réactions ne choisissent pas leurs matières premières selon des catégories commerciales. Elles répondent à des structures moléculaires, à des températures, à des pressions, à des temps de séjour et à des cinétiques chimiques.

Le naphta n'entre donc pas dans un vapocraqueur en tant que mot.

Il entre comme population de molécules.

Séparer, convertir, séparer encore

Une dernière idée doit être fixée avant de quitter ce chapitre.

L'image naïve de l'industrie chimique est souvent celle d'une suite de réactions :

A devient B.

B devient C.

C devient un polymère. En pratique, une grande partie de l'installation existe entre ces flèches. Le pétrole brut doit être séparé avant conversion. Les produits du vapocraquage devront être séparés après réaction. Un produit partiellement converti peut être recyclé. Une impureté doit être retirée avant qu'elle n'atteigne un catalyseur.

Un mélange d'aromatiques devra être fractionné ou traité par d'autres techniques de séparation.

Une polymérisation exigera à son tour des monomères suffisamment purs.

À chaque étape, la chimie crée de la diversité que l'ingénierie doit ensuite maîtriser.

C'est pourquoi les grandes tours qui dominent visuellement une raffinerie ou un complexe pétrochimique ne sont pas toujours des réacteurs. Beaucoup sont des colonnes de séparation.

Elles accomplissent une fonction moins spectaculaire mais tout aussi essentielle : transformer un mélange en flux utilisables.

La pétrochimie moderne est donc autant l'art de séparer que celui de réagir.

Cette proposition explique une partie de sa consommation d'énergie, de son investissement industriel et de sa complexité. Plus les molécules à séparer possèdent des propriétés proches, plus l'opération peut devenir exigeante.

Nous rencontrerons bientôt un exemple particulièrement important avec la séparation des produits légers issus du vapocraquage.

Avant cela, nous pouvons résumer le chemin parcouru.

Le pétrole brut n'est pas une matière homogène mais un mélange complexe d'hydrocarbures et de composés minoritaires.

Les pétroles diffèrent entre eux. Le gaz naturel brut ne se réduit pas au méthane. Le naphta est une fraction, pas une molécule. Les hydrocarbures légers du gaz doivent être récupérés puis fractionnés.

L'éthane et le naphta peuvent alimenter des routes pétrochimiques différentes vers certaines molécules communes.

Et les charges qui entreront dans nos réacteurs sont déjà le produit d'une longue histoire industrielle de séparation et de purification.

Nous pouvons maintenant nous demander ce qui arrive lorsque l'industrie cesse de seulement trier les molécules et commence à les casser, les réarranger et en construire de nouvelles.

C'est le passage de la séparation à la transformation.

Notes

1. U.S. Energy Information Administration, Natural Gas Explained et définitions statistiques du gaz naturel humide : composition du gaz à la tête de puits, hydrocarbures légers et constituants non hydrocarbonés. Source :

<https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/index.php>

2. U.S. Energy Information Administration, définitions statistiques du crude oil : pétrole brut comme mélange d'hydrocarbures liquide après les installations de séparation de surface, avec présence possible de composés non hydrocarbonés. Source :

<https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Crude+oil>

3. National Oceanic and Atmospheric Administration, MESA Special Report — Hydrocarbons in the Ocean, section consacrée aux caractéristiques du pétrole : mélange complexe de très nombreux hydrocarbures, familles principales alcanes, cycloalcanes et aromatiques, avec composés soufrés, azotés et oxygénés et traces de métaux. Source :

https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/52141/noaa_52141_DS1.pdf

4. U.S. Energy Information Administration, Refining crude oil — inputs and outputs : relation entre gravité API, densité, proportion de fractions légères et complexité de raffinage. Source :

<https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/refining-crude-oil-inputs-and-outputs.php>

5. U.S. Energy Information Administration, Refining crude oil — the refining process : opérations de séparation, conversion et traitement ; distillation atmosphérique et sous vide ; reformage des coupes naphtha. Source : <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/refining-crude-oil-the-refining-process.php>

6. U.S. Energy Information Administration, Natural Gas Explained : gaz naturel humide, séparation des HGL et définition fonctionnelle

du gaz sec ou de qualité pipeline. Source : <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/index.php>

7. U.S. Energy Information Administration, Natural gas processing plant data now available : déshydratation, traitement aux amines pour H₂S et CO₂, extraction et fractionnement des liquides de gaz. Source : <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=8530>

8. U.S. Energy Information Administration, définitions des hydrocarbon gas liquids et natural gas plant liquids. L'EIA distingue la catégorie générale HGL des produits liquides récupérés spécifiquement dans les usines de traitement du gaz. Source : <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Hydrocarbon+gas+liquids> ; <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Natural+gas+plant+liquids>

9. U.S. Energy Information Administration, Where do hydrocarbon gas liquids come from? : récupération des hydrocarbures lourds du gaz humide, mélange Y-grade et fractionnement en produits concentrés. Source : <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrocarbon-gas-liquids/where-do-hydrocarbon-gas-liquids-come-from.php>

10. U.S. Energy Information Administration, Uses of hydrocarbon gas liquids : éthane comme matière première de l'éthylène ; usages pétrochimiques et énergétiques du propane et des butanes. Source : <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrocarbon-gas-liquids/uses-of-hydrocarbon-gas-liquids.php>

Chapitre 3 — Casser et reconstruire les hydrocarbures

Vapocraquage, reformage, catalyse et logique industrielle des transformations

Jusqu'ici, nous avons surtout séparé.

Nous avons vu qu'un pétrole brut est un mélange, qu'un gaz naturel brut n'est pas seulement du méthane, qu'un naphta est une fraction et qu'une charge pétrochimique doit être préparée avant d'entrer dans un réacteur. Cette logique de séparation était indispensable, mais elle ne suffisait pas encore à expliquer la pétrochimie.

Le basculement commence lorsque l'industrie cesse de demander : « quelles molécules sont déjà présentes ? » et pose une question plus ambitieuse : « quelles molécules voulons-nous fabriquer à partir de celles que nous avons ? »

C'est à ce moment que la structure chimique devient un objet d'ingénierie.

L'éthane peut devenir éthylène. Des molécules du naphta peuvent être cassées en fragments plus petits, puis donner de l'éthylène, du propylène, du butadiène ou des composés aromatiques. D'autres molécules du naphta peuvent, au contraire, être réorganisées par reformage catalytique afin d'accroître leur caractère aromatique ou leur degré de ramification. Dans tous les cas, l'industrie ne se contente plus de trier la matière : elle modifie la manière dont ses atomes sont reliés.

Le vapocraquage est l'une des expressions les plus importantes de cette capacité. Les grands vapocraqueurs industriels traitent des charges comme l'éthane, le propane, le naphta ou d'autres hydrocarbures en présence de vapeur et à des températures typiquement voisines de 800 à 870 °C. Ils produisent un mélange comprenant notamment éthylène, propylène, butadiène, acétylène,

essence de pyrolyse et composés aromatiques, dans des proportions qui dépendent fortement de la charge et des conditions opératoires.¹

Mais le mot « craquage » donne une image trop simple.

Il ne suffit pas de casser une grosse molécule en deux. À haute température, une population immense de réactions concurrentes apparaît presque simultanément. Certaines conduisent aux oléfines recherchées. D'autres reforment des molécules plus lourdes, produisent du méthane, de l'hydrogène ou des aromatiques, et certaines finissent par déposer du coke sur les parois du four.

Le problème industriel n'est donc jamais seulement de provoquer une réaction.

Il faut provoquer les bonnes réactions plus vite que les mauvaises, puis interrompre le système avant qu'il ne continue à évoluer.

C'est pourquoi le vapocraquage peut être compris comme une maîtrise du temps autant que de la température.

Une double liaison qui change tout

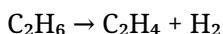
Pour comprendre pourquoi l'éthylène est si recherché, il faut revenir à une différence moléculaire minuscule en apparence.

L'éthane a pour formule C_2H_6 . Ses deux carbones sont reliés par une liaison simple. L'éthylène, ou éthène, a pour formule C_2H_4 . Ses deux carbones sont reliés par une double liaison.

Cette double liaison modifie profondément la réactivité de la molécule.

Dans une polymérisation, elle peut être ouverte de manière contrôlée afin de relier successivement de très nombreuses unités d'éthylène. Une petite molécule gazeuse devient alors la brique d'une macromolécule solide : le polyéthylène.

Le passage de l'éthane à l'éthylène peut être écrit sous une forme globale très simple :



Mais cette équation ne décrit pas le mécanisme réel d'un vapocraqueur.

Elle indique seulement un bilan.

À l'intérieur du tube chauffé, les liaisons ne se réorganisent pas selon une flèche unique et docile. Le craquage thermique met en jeu des mécanismes en chaîne impliquant des radicaux libres. Des centaines d'espèces radicalaires et moléculaires et un très grand nombre de réactions élémentaires peuvent intervenir dans la description cinétique détaillée du système.²

Cette distinction entre équation globale et mécanisme est essentielle.

Une équation globale nous dit ce qui peut entrer et ce qui peut sortir.

Le mécanisme nous aide à comprendre pourquoi la température, la pression, le temps de séjour et la composition de la charge modifient les rendements.

Radicaux : quand une liaison se casse de manière homolytique

Une liaison covalente est formée par une paire d'électrons partagée entre deux atomes. À très haute température, certaines liaisons peuvent se rompre de manière dite homolytique : chaque fragment conserve un électron de la paire.

On obtient alors des radicaux.

Un radical est une espèce chimique qui possède un électron non apparié. Cette configuration le rend généralement très réactif. Il peut arracher un atome d'hydrogène à une autre molécule, se fragmenter, s'additionner à une double liaison ou réagir avec un autre radical.

Les mécanismes de craquage thermique sont ainsi souvent décrits en trois familles d'étapes : initiation, propagation et terminaison.

L'initiation crée les premiers radicaux.

La propagation transforme ces radicaux tout en en générant d'autres, de sorte que la chaîne réactionnelle se poursuit.

La terminaison consomme deux radicaux sans en recréer immédiatement de nouveaux.

Cette logique explique pourquoi une faible variation de conditions peut modifier une distribution de produits entière. On ne règle pas un seul chemin réactionnel ; on déplace l'équilibre dynamique entre un grand nombre de chemins concurrents.

Prenons un radical carboné portant une chaîne suffisamment longue. Une liaison située en position appropriée peut se rompre : c'est une β -scission. Cette réaction produit souvent une oléfine et un nouveau radical plus petit. De nouvelles β -scissions peuvent alors poursuivre le raccourcissement de la chaîne.

Cette famille de mécanismes aide à comprendre pourquoi le craquage d'hydrocarbures plus lourds peut générer des oléfines légères.

Elle aide aussi à comprendre l'importance de la structure initiale.

Un alcane linéaire, un alcane ramifié, un cycloalcane et un aromatique n'offrent pas les mêmes possibilités de fragmentation ni les mêmes stabilités intermédiaires. Le naphta étant un mélange de ces familles, son comportement est nécessairement plus complexe que celui d'une charge presque pure d'éthane.

Le four ne « voit » donc jamais le mot naphta.

Il voit un ensemble de liaisons susceptibles de se rompre selon des vitesses différentes.

Pourquoi ajouter de la vapeur si l'on veut craquer des hydrocarbures ?

Le terme vapocraquage pourrait laisser croire que la vapeur est le réactif principal qui casse les molécules. Ce n'est pas la bonne représentation.

Dans le vapocraquage (steam cracking) conventionnel, le cœur de la conversion des hydrocarbures est essentiellement thermique. La

vapeur sert notamment de diluant : elle réduit la pression partielle des hydrocarbures, aide à limiter certaines réactions secondaires et participe aux conditions qui favorisent la production d'oléfines. Elle contribue aussi au fonctionnement thermique et hydrodynamique du procédé.

Cette fonction de dilution est importante parce que de nombreuses réactions secondaires augmentent lorsque les molécules hydrocarbonées ont davantage d'occasions de se rencontrer et de se recombiner.

Le procédé cherche donc une situation paradoxale.

Il veut une température assez élevée pour casser rapidement certaines liaisons.

Il veut simultanément limiter le temps et les conditions qui permettraient aux produits nouvellement formés de subir des transformations supplémentaires.

La vapeur aide à créer cet environnement, mais elle ne supprime pas les compromis fondamentaux.

Il faut encore choisir une température de sortie du four, un temps de séjour, une pression, un ratio vapeur/charge et une géométrie de tube adaptés à la charge et au portefeuille de produits recherché.

Ces paramètres ne sont pas indépendants. Augmenter la sévérité du craquage peut augmenter la conversion et favoriser certains produits, mais aussi accroître les réactions secondaires, la formation de méthane, l'aromatisation ou le cokage.

Le mot « sévérité » résume donc un ensemble de conditions qui poussent plus ou moins loin le craquage.

Une usine ne cherche pas le craquage maximal.

Elle cherche le compromis le plus rentable et le plus stable entre conversion, sélectivité, énergie, durée de campagne et valeur des produits.

Le four : quelques dixièmes de seconde qui organisent toute l'usine

Le four de vapocraquage comporte typiquement une zone de convection et une zone radiante.

Dans la zone de convection, la charge et la vapeur récupèrent une partie de la chaleur des fumées. La température monte progressivement avant l'entrée dans les tubes de la zone radiante.

Dans cette zone radiante, les tubes reçoivent un flux thermique intense. La température du fluide atteint alors le domaine où les réactions de craquage deviennent extrêmement rapides. Une description récente du procédé situe couramment le passage dans la zone réactionnelle autour de 750 à 875 °C, avec un temps de séjour de l'ordre de 0,1 à 0,5 seconde pour certaines configurations ; les valeurs exactes dépendent cependant fortement de la charge et de la technologie.² Les fournisseurs industriels décrivent de façon plus générale un fonctionnement des vapocraqueurs autour de 800 à 870 °C.¹

Ces ordres de grandeur révèlent le paradoxe de la machine. Le four est immense. L'événement chimique décisif, lui, est très bref. Cette brièveté est voulue.

Une fois formées, les oléfines ne sont pas chimiquement inertes. Si elles restent trop longtemps à très haute température, elles peuvent continuer à réagir. Elles peuvent subir de nouvelles fragmentations, s'additionner entre elles, cycliser ou contribuer à la formation de composés aromatiques et de coke.

Le temps devient donc une variable de sélectivité.

L'ingénieur cherche à fournir suffisamment de chaleur pour faire apparaître rapidement la distribution désirée, puis à extraire le mélange du domaine réactionnel avant que cette distribution ne se dégrade.

Le four ne fonctionne ainsi correctement qu'avec ce qui vient immédiatement après lui.

Un vapocraqueur sans trempe rapide serait un procédé différent.

La trempe : arrêter la chimie avant qu'elle ne continue

À la sortie du four, le gaz craqué est encore extrêmement chaud.

La priorité devient alors presque l'inverse de celle qui dominait quelques millisecondes auparavant : il ne faut plus favoriser les réactions, il faut les ralentir brutalement.

Le mélange est donc refroidi rapidement.

Une première récupération de chaleur peut être réalisée dans des échangeurs de ligne de transfert, souvent désignés par l'abréviation TLE. Cette étape permet de retirer très vite une grande quantité de chaleur au gaz craqué tout en récupérant une partie de cette énergie, notamment sous forme de vapeur à haute pression selon la conception de l'installation. Pour des charges plus lourdes, d'autres systèmes de trempe et de refroidissement interviennent ensuite afin de condenser et séparer certaines fractions lourdes.

La trempe accomplit deux fonctions simultanées.

Elle protège la sélectivité chimique en freinant les réactions secondaires.

Elle récupère une partie de l'énergie qui vient d'être investie dans le chauffage.

Cette dualité est caractéristique du génie chimique moderne : une opération conçue pour contrôler la réaction devient également une opération d'intégration énergétique.

Le refroidissement se poursuit jusqu'à ce que les fractions lourdes, l'eau de procédé et d'autres constituants puissent être séparés du gaz craqué.

À ce stade, pourtant, l'éthylène n'est toujours pas un produit commercial.

Il se trouve dans un mélange.

L'immense difficulté suivante consiste à le purifier.

Le vrai prix de l'éthylène : fabriquer puis séparer

Un vapocraqueur produit simultanément de nombreuses molécules.

Le gaz craqué peut contenir de l'hydrogène, du méthane, de l'éthylène, de l'éthane non transformé, de l'acétylène, du propylène, du propane, des composés C_4 et des fractions plus lourdes. La composition exacte dépend de la charge et de la sévérité.

La réaction crée donc de la valeur et du désordre en même temps.

Pour transformer ce mélange en produits commerciaux, l'usine doit d'abord retirer les fractions condensables les plus lourdes, puis comprimer le gaz. Linde décrit un train industriel typique où le gaz craqué, après trempe et refroidissement, est comprimé en quatre à cinq étages jusqu'à environ 36 bar, puis séché et refroidi avant les grandes séparations entre fractions légères et lourdes.¹

Pourquoi comprimer ?

Parce que la séparation ultérieure de molécules très légères exige des conditions dans lesquelles leurs différences de volatilité peuvent être exploitées industriellement. La compression facilite le refroidissement et la condensation partielle à des températures cryogéniques, tout en rendant possibles les séquences de distillation à haute pression adaptées.

Mais comprimer un gaz chauffe le gaz.

Chaque étage de compression doit donc être associé à des refroidissements intermédiaires et à des séparations de condensats. Le système doit aussi gérer des impuretés qui pourraient devenir problématiques à basse température.

L'unité d'éthylène devient alors une immense machine à préparer les molécules à être séparées.

Le four, pourtant spectaculaire, n'est qu'une partie du coût et de la consommation énergétique. Les analyses de procédé montrent depuis longtemps que la compression et la séparation représentent elles aussi une fraction importante de l'énergie du vapocraquage.³

Cette observation corrige une intuition fréquente.

La chimie industrielle n'est pas coûteuse uniquement parce qu'il faut casser des liaisons.

Elle est également coûteuse parce qu'il faut ensuite trier avec une grande pureté les molécules produites.

Séparer des molécules presque jumelles

Séparer de l'eau et de l'huile paraît intuitif parce que leurs propriétés sont très différentes.

Séparer éthane et éthylène est une autre affaire.

Les deux molécules ont la même charpente de deux carbones et des propriétés physiques suffisamment proches pour rendre leur séparation exigeante. Pourtant, le polymérisateur situé en aval a besoin d'un éthylène respectant des spécifications très strictes. Des traces de certaines impuretés peuvent perturber un catalyseur ou modifier la qualité du polymère.

Le train de séparation d'une usine d'éthylène est donc une succession soigneusement ordonnée d'opérations : séparation des fractions légères, retrait du méthane et de l'hydrogène, fractionnement des C_2 , traitement de l'acétylène, séparation éthylène/éthane, puis opérations analogues sur les fractions C_3 et C_4 selon la configuration.

Il n'existe pas une seule architecture universelle. Les séquences dites front-end demethanizer, front-end deethanizer ou front-end depropanizer organisent différemment certaines étapes, notamment selon la charge et la conception du complexe.

La logique reste cependant la même. Créer une oléfine n'est qu'une demi-réussite. Il faut encore la séparer de molécules chimiquement et physiquement très proches.

Dans certains cas, une impureté n'est pas retirée par simple distillation. L'acétylène, par exemple, peut être converti sélectivement par hydrogénation en éthylène, tandis que des espèces C_3 insaturées indésirables peuvent également être hydrogénées pour rejoindre le propylène ou le propane selon la configuration. Linde décrit explicitement ces hydrogénations sélectives dans les trains modernes de séparation.¹

La purification peut donc elle-même employer une réaction chimique. Le schéma « réaction puis séparation » devient déjà trop simple. L'industrie alterne réaction, séparation, réaction corrective, nouvelle séparation et recyclage.

Recycler ce qui n'a pas fini son histoire

Toute la charge n'est pas convertie lors d'un seul passage.

Dans un vapocraqueur d'éthane, une partie de l'éthane peut ressortir sans avoir réagi. Une fois séparé de l'éthylène, il peut être renvoyé vers les fours.

Le recyclage modifie profondément la manière dont il faut lire les rendements.

Le taux de conversion en un passage n'est pas identique au rendement global de l'installation.

Une usine peut choisir volontairement une conversion par passage qui préserve une meilleure sélectivité, puis recycler le réactif non converti. Ce choix peut être préférable à une recherche de conversion maximale qui augmenterait les sous-produits ou le coke.

Cette logique est générale en génie chimique. Le meilleur réacteur isolé n'est pas nécessairement la meilleure usine. Il faut optimiser l'ensemble réaction + séparation + recyclage.

Les fournisseurs de technologie décrivent d'ailleurs explicitement le retour possible d'éthane, propane ou fractions C₄ vers les fours lorsqu'il améliore les rendements globaux.¹

Nous retrouvons ici une idée déjà rencontrée dans le chapitre précédent : les flux circulent.

Une usine pétrochimique n'est pas une chaîne droite.

C'est un réseau.

Le coke : quand le carbone cesse d'être un produit et devient une obstruction

La température élevée qui rend le craquage possible crée également l'un de ses principaux problèmes opérationnels : le coke.

Sous ce nom sont regroupés des dépôts carbonés riches en carbone qui se forment progressivement sur les surfaces internes des tubes du four et dans certaines zones chaudes du procédé.

Le mécanisme de cokage est complexe et dépend de la charge, de la surface métallique, de la température et de la composition du milieu. Des réactions en phase gazeuse et des phénomènes de surface peuvent tous contribuer à la croissance du dépôt.

Le résultat industriel est plus facile à comprendre. À mesure que le coke s'accumule, le diamètre hydraulique utile diminue. La perte de charge augmente. Le transfert thermique se dégrade.

Pour maintenir la température souhaitée du fluide, il peut devenir nécessaire d'augmenter la température externe des tubes, ce qui accroît les contraintes métallurgiques.

Le phénomène finit par imposer un arrêt du four pour décokage. Les durées exactes de campagne varient fortement selon la charge, la technologie et la sévérité ; les charges lourdes sont généralement plus sujettes au cokage que l'éthane.⁴

Le coke révèle ainsi un conflit entre trois objectifs. On veut une température élevée pour accélérer le craquage. On veut une forte production d'oléfines.

On veut également faire fonctionner le four le plus longtemps possible sans interruption.

Pousser une variable trop loin peut dégrader les deux autres.

L'exploitation industrielle est donc un art du compromis dynamique, pas la poursuite d'un rendement instantané maximal.

La charge décide d'une partie du portefeuille de produits

Le chapitre précédent avait opposé deux grandes charges : l'éthane et le naphta.

Nous pouvons maintenant expliquer chimiquement pourquoi leurs produits diffèrent.

L'éthane est une petite molécule relativement simple. Son craquage est fortement orienté vers l'éthylène, même si d'autres produits apparaissent.

Le naphta est une population de molécules.

Ses alcanes linéaires, alcanes ramifiés, cycloalcanes et aromatiques suivent des réseaux de réactions différents. Les études comparatives montrent que la composition moléculaire du naphta influence sensiblement les rendements en éthylène, propylène, butadiène et aromatiques.⁵

Une charge plus lourde ouvre généralement davantage de chemins.

Cela produit davantage de coproduits, ce qui rend l'usine plus complexe mais peut aussi donner accès à un portefeuille plus diversifié.

Cette différence a une conséquence économique subtile.

Une molécule qui serait un « sous-produit » dans une usine peut être un produit stratégique pour le complexe entier.

Le propylène illustre bien cette situation. Dans beaucoup de vapocraqueurs, il est coproduit avec l'éthylène. Sa valeur peut cependant modifier la manière de choisir la charge ou la sévérité. D'autres technologies, comme la déshydrogénation du propane, peuvent même être construites spécifiquement pour produire du propylène lorsque les équilibres de marché le justifient.

Ainsi, le vapocraquage ne transforme pas seulement des molécules.

Il transforme une matière première en portefeuille de molécules dont les valeurs relatives évoluent.

La chimie fixe des possibilités.

Le marché contribue à choisir lesquelles deviennent désirables.

Craquage thermique et catalyse : deux manières différentes d'orienter les réactions

Le vapocraquage conventionnel est d'abord un procédé thermique.

Cette caractéristique permet de comprendre ce qu'un catalyseur change dans d'autres procédés.

Un catalyseur offre un chemin réactionnel différent, généralement associé à une énergie d'activation plus faible pour certaines étapes. Il accélère des réactions sans être consommé stœchiométriquement comme un réactif ordinaire, même s'il peut se désactiver, s'empoisonner ou devoir être régénéré.

Mais « accélérer une réaction » ne signifie pas seulement gagner du temps.

Dans un réseau comportant plusieurs réactions concurrentes, un catalyseur peut favoriser certaines voies davantage que d'autres.

Il devient donc un instrument de sélectivité.

Le craquage catalytique utilisé dans les raffineries illustre cette différence. Des hydrocarbures lourds peuvent être transformés sur des catalyseurs acides, notamment des zéolithes, selon des mécanismes qui ne sont pas les mêmes que les chaînes radicalaires

dominantes du vapocraquage thermique. Le portefeuille de produits, les conditions et la fonction industrielle diffèrent en conséquence.

Cette distinction empêche de traiter tous les procédés appelés « craquage » comme s'ils étaient équivalents.

Craquer signifie rompre et réorganiser des structures hydrocarbonées.

Le mécanisme qui y conduit peut être radicalaire, ionique ou associé à une surface catalytique selon le procédé.

Et avec le mécanisme changent les produits possibles.

Le reformage catalytique : ne plus raccourcir, mais réorganiser

Le mot reformage décrit une autre logique.

Le vapocraquage cherche largement à produire de petites oléfines en fragmentant des charges. Le reformage catalytique traite au contraire des fractions naphta afin de réorganiser leurs structures moléculaires.

Dans une raffinerie, sa fonction historique majeure est d'augmenter l'indice d'octane de certains composants d'essence. Mais le reformate obtenu est également riche en composés aromatiques, notamment benzène, toluène et xylènes, ce qui fait du reformage une source importante de matières premières pétrochimiques.⁶

Plusieurs familles de réactions interviennent. Des cycloalcanes peuvent perdre de l'hydrogène et devenir aromatiques. Des alcanes peuvent se cycliser puis s'aromatiser. Des chaînes peuvent s'isomériser. D'autres réactions secondaires peuvent craquer certaines molécules plus fortement.

Le procédé produit également de l'hydrogène, qui acquiert une valeur particulière dans une raffinerie parce qu'il peut alimenter des unités d'hydrotraitement et d'hydroconversion.⁶

Le contraste avec le vapocraquage est instructif.

Dans le vapocraqueur, la chaleur déclenche un réseau radicalaire extrêmement rapide dans des tubes sans catalyseur solide conventionnel.

Dans le reformeur, la charge traverse des réacteurs catalytiques où certaines transformations moléculaires sont favorisées par des surfaces actives, souvent contenant des métaux du groupe du platine associés à un support approprié. Le soufre et d'autres impuretés peuvent empoisonner ces catalyseurs, d'où l'importance du prétraitement du naphta.⁷

Le catalyseur ne permet donc pas simplement de faire « la même chose à plus basse température ».

Il change la carte des transformations.

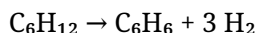
Pourquoi le reformeur produit de l'hydrogène

Une réaction d'aromatisation permet de comprendre l'origine d'une partie de l'hydrogène du reformage.

Considérons un cycloalcane simple comme le cyclohexane, C_6H_{12} .

Le benzène possède les mêmes six carbones mais seulement six hydrogènes : C_6H_6 .

La transformation globale peut être écrite :



La molécule carbonée devient aromatique tandis que de l'hydrogène moléculaire est libéré.

Cette réaction illustre une différence importante entre la pétrochimie et une vision trop simple de la matière comme « carbone plus hydrogène ».

L'hydrogène lui-même devient un flux industriel.

Il peut être récupéré, comprimé, purifié et utilisé ailleurs.

Une raffinerie intégrée met ainsi en relation des unités qui, vues séparément, poursuivent des objectifs différents : le reformeur

produit un flux riche en hydrogène ; l'hydrotraiteur consomme de l'hydrogène pour retirer du soufre ou saturer certaines molécules.

La molécule produite dans une unité devient la condition de fonctionnement d'une autre.

C'est l'une des raisons pour lesquelles l'intégration industrielle est si importante.

La valeur d'un procédé ne réside pas uniquement dans son produit principal.

Catalyseur actif, catalyseur fragile

Un catalyseur industriel n'est pas une surface magique qui fonctionne indéfiniment. Il peut perdre progressivement son activité ou sa sélectivité. Certaines molécules s'adsorbent fortement sur les sites actifs.

Des impuretés comme le soufre peuvent empoisonner les fonctions métalliques de certains catalyseurs.

Du coke peut recouvrir les surfaces.

Des transformations physiques de la phase active ou du support peuvent réduire les performances.

Le procédé doit donc être conçu avec la désactivation à l'esprit.

Dans le reformage catalytique, le prétraitement du naphta retire notamment des composés susceptibles de désactiver le catalyseur. L'EIA décrit le prétraitement par hydrogène et catalyse avant l'entrée dans le reformeur ; des documents du Department of Energy rappellent également la sensibilité historique des catalyseurs au platine au soufre.^{6 7}

Selon la technologie, la régénération du catalyseur peut être périodique ou organisée de manière plus continue.

La catalyse industrielle est donc inséparable de sa maintenance.

Une réaction qui fonctionne parfaitement pendant quelques minutes au laboratoire peut être inutile industriellement si son catalyseur devient inutilisable trop vite.

L'industrie cherche simultanément activité, sélectivité, stabilité, régénérabilité, coût acceptable et résistance aux impuretés.

Cette exigence explique pourquoi le passage d'une nouvelle réaction du laboratoire à une usine peut prendre des années.

Réaction et séparation forment un seul problème industriel

Nous pouvons maintenant relier les deux grandes transformations de ce chapitre.

Le vapocraquage produit rapidement un mélange très complexe qu'il faut refroidir, comprimer et séparer.

Le reformage catalytique produit lui aussi un mélange qu'il faut séparer en gaz riches en hydrogène, fractions légères et reformate liquide, avant d'extraire éventuellement les aromatiques recherchés.

Dans les deux cas, le produit du réacteur n'est pas encore le produit du marché.

Cette distinction paraît banale, mais elle change la manière d'évaluer une technologie.

Une réaction nouvelle peut afficher une excellente conversion en laboratoire tout en produire un mélange impossible à purifier économiquement.

Elle peut nécessiter un solvant coûteux à régénérer.

Elle peut générer un azéotrope ou des molécules aux températures d'ébullition très proches.

Elle peut produire une quantité d'eau ou de sels qui complique la séparation.

Elle peut imposer une compression ou un refroidissement extrêmement énergivore.

La performance chimique ne suffit donc jamais à démontrer la performance industrielle.

Pour comparer des routes pétrochimiques, il faut au minimum considérer ensemble :

la matière première ;

la réaction ;

la sélectivité ;

les conditions de température et de pression ;

les besoins de séparation ;

les recyclages ;

la consommation énergétique ;

les matériaux de construction ;

la durée de fonctionnement entre maintenances ;

et la valeur de tous les produits et sous-produits. Le réacteur n'est qu'un organe. Le procédé est l'organisme entier.

Une usine intégrée cherche à ne pas gaspiller ses flux

Un complexe pétrochimique moderne est parcouru de flux de matière et d'énergie qui ne correspondent pas aux frontières intuitives entre les unités.

Le four consomme du combustible mais produit aussi de la chaleur récupérable. La trempe peut générer de la vapeur à haute pression. Le reformeur produit de l'hydrogène utilisable dans l'hydrotraitement. L'éthane non converti peut retourner vers le vapocraqueur.

Une fraction C_4 peut alimenter une unité de butadiène ou d'autres transformations.

L'essence de pyrolyse peut devenir une source d'aromatiques après traitement.

Cette intégration améliore l'efficacité parce qu'un flux qui serait un déchet ou un combustible de faible valeur dans une installation isolée peut devenir une matière première dans l'installation voisine.

Mais elle crée également une dépendance réciproque.

Arrêter une unité peut perturber plusieurs autres.

Changer de charge dans le vapocraqueur modifie la production de coproduits disponibles en aval.

Réduire fortement un flux de raffinerie dans une transition énergétique peut affecter la disponibilité d'une matière première pétrochimique historiquement couplée à ce raffinage.

Nous retrouverons cette question au chapitre consacré à l'économie du secteur.

Pour l'instant, elle permet de comprendre pourquoi une usine pétrochimique ne doit pas être pensée comme une collection de machines indépendantes.

Elle est un système de bilans.

L'énergie n'est pas un détail extérieur à la chimie

Le vapocraquage est l'un des procédés les plus énergivores de l'industrie chimique. Une étude de référence sur les oléfines estime que la seule section de pyrolyse d'un vapocraqueur de naphta représente environ les deux tiers de l'énergie du procédé étudié, tandis que compression et séparation offrent elles aussi des gisements importants d'amélioration.³

Il ne faut pas transformer ces ordres de grandeur anciens en constantes universelles : les technologies, tailles d'usines, charges, intégrations thermiques et efficacités ont évolué. Ils montrent néanmoins pourquoi la consommation énergétique n'est pas une question périphérique.

Le craquage est fortement endothermique.

Il faut fournir rapidement beaucoup de chaleur à travers la paroi des tubes.

Puis il faut retirer rapidement cette chaleur. Puis il faut comprimer le gaz. Puis il faut produire du froid pour certaines séparations.

Cette succession chauffe-refroidit-comprime-refroidit explique une grande partie de l'intensité énergétique du système.

Elle montre aussi pourquoi la décarbonation du secteur ne se résume pas à remplacer la matière première fossile.

Même si le carbone du produit provenait demain d'une source recyclée ou biogénique, il faudrait encore fournir l'énergie nécessaire aux transformations et aux séparations.

Inversement, électrifier un four réduirait potentiellement une partie des émissions liées à la combustion si l'électricité était suffisamment bas-carbone, mais ne changerait pas automatiquement l'origine fossile du carbone incorporé dans les produits.

Deux problèmes se superposent :

l'origine du carbone ;

et l'origine de l'énergie.

Ils devront être traités séparément avant d'être réunis.

Ce que la chimie impose, ce que l'ingénierie choisit

À ce stade, il serait tentant de présenter chaque procédé comme la conséquence nécessaire de lois chimiques.

Ce serait une erreur. La thermodynamique et la cinétique imposent des contraintes. Mais elles ne dictent pas une seule usine possible. Plusieurs géométries de fours peuvent atteindre des objectifs proches. Plusieurs séquences de séparation peuvent produire de l'éthylène de haute pureté. Plusieurs technologies de reformage existent. Les catalyseurs évoluent. L'intégration thermique peut être améliorée.

Les contraintes économiques peuvent conduire à privilégier un rendement légèrement inférieur si l'investissement, la consommation énergétique ou la disponibilité de l'installation sont meilleurs.

L'ingénierie travaille donc dans un espace défini par la chimie mais non entièrement déterminé par elle.

Cette différence est importante pour juger les innovations.

Dire qu'une réaction est chimiquement possible ne signifie pas qu'elle est industriellement viable.

Dire qu'un procédé industriel actuel est extrêmement optimisé ne signifie pas qu'il est physiquement irremplaçable.

Une technologie devient dominante lorsqu'elle réussit simultanément plusieurs épreuves : rendement, sélectivité, échelle, coût, fiabilité, disponibilité des matières premières, capacité de séparation, sécurité et compatibilité avec les infrastructures existantes.

C'est cette accumulation de fonctions qui crée l'inertie du système.

De la transformation aux grands arbres pétrochimiques

Nous pouvons maintenant reconstruire ce qui se passe entre une charge et une molécule plateforme.

L'éthane arrive au four. La température crée un réseau de réactions radicalaires. De l'éthylène apparaît parmi les produits. Le mélange est immédiatement trempé. La chaleur est partiellement récupérée. Le gaz est refroidi, comprimé, séché et fractionné. Des impuretés réactives sont transformées ou retirées. L'éthane non converti peut être recyclé.

L'éthylène finit par sortir à une pureté permettant son emploi dans les procédés aval.

Le naphta suit la même architecture générale, mais sa diversité moléculaire génère une gamme beaucoup plus large de produits et une séparation plus complexe.

Une autre portion du naphta peut prendre une route différente. Elle est hydrotraitée. Elle entre dans un reformeur catalytique. Ses molécules sont isomérisées, cyclisées ou déshydrogénées.

Le reformat devient plus riche en aromatiques et en molécules à haut indice d'octane.

De l'hydrogène apparaît comme coproduit.

Les aromatiques peuvent ensuite être séparés et entrer dans leurs propres arbres pétrochimiques.

Le chapitre 1 présentait une formule simple :

charges → plateformes → intermédiaires → matériaux → produits.

Nous pouvons maintenant développer la première flèche :

charges → chauffage ou catalyse → réseau de réactions → trempe ou stabilisation → compression éventuelle → purification → séparation → recyclage → molécules plateformes.

Cette flèche contient déjà une usine entière.

Les chapitres suivants pourront donc se concentrer sur ce qui arrive après.

L'éthylène et le propylène cesseront d'être des noms placés au bout d'un vapocraqueur.

Ils deviendront à leur tour les points de départ de nouveaux réseaux de transformations.

Nous passerons alors de l'art de produire quelques molécules plateformes à l'art de construire, à partir d'elles, une diversité presque vertigineuse de matériaux.

C'est là que la pétrochimie devient visible dans les objets.

Notes

1. Linde Engineering, « Steam Cracking Technology ». Le fournisseur décrit le craquage de charges hydrocarbonées en présence de vapeur vers 800–870 °C et la production de produits tels qu'éthylène, propylène, butadiène, acétylène, essence de pyrolyse et BTX. Il décrit également le train aval de trempe, compression, séchage, séparation et hydrogénation sélective.
<https://www.linde-engineering.com/products-and-services/process-plants/petrochemical-technologies/steam-cracking-technology>
2. Article de synthèse « Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges », section 2.1.2. La description du vapocraquage situe le chauffage de la charge dans la zone radiante vers 750–875 °C sur environ 0,1–0,5 s pour la configuration décrite et rappelle que le mécanisme suit des chaînes radicalaires comprenant de très nombreuses espèces et réactions. ScienceDirect, DOI et page de l'article : <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1463926223000018>
3. Ren, T.; Patel, M.; Blok, K., « Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes », Energy, 31(4), 2006, 425–451. L'étude analyse la répartition de l'énergie entre pyrolyse, compression et séparation dans un vapocraqueur de naphta et discute les potentiels d'amélioration.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544205000745>
4. Revue « Coke formation in steam crackers for ethylene production » et littérature de modélisation industrielle du vapocraquage : le coke se forme sur les tubes à haute température, augmente la perte de charge, dégrade le transfert thermique et impose des opérations périodiques de décokage ; la fréquence varie selon charge, sévérité, matériaux et technologie.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270101001350>
5. Liu, J.-c. et al., « Separating group compositions in naphtha by adsorption and solvent extraction to improve olefin yields of steam

cracking process », *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 66, 2009, 156–160. L'étude illustre l'influence des familles moléculaires du naphta sur les rendements en oléfines. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410509000746>

6. U.S. Energy Information Administration, « Catalytic reforming boosts octane for gasoline blending », 9 avril 2013. L'EIA décrit le reformage du naphta, la production d'un reformate riche en benzène, toluène et xylènes, le coproduit hydrogène et le prétraitement de la charge. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=10731>

7. U.S. Department of Energy, documents techniques sur le raffinage et les catalyseurs du groupe du platine. Le reformage catalytique de naphta produit aromatiques, isoparaffines et hydrogène ; les catalyseurs contenant du platine sont sensibles notamment au soufre, ce qui explique l'importance de l'hydrotraitement en amont. Voir notamment : <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/PGM%20catalyst%20supply%20chain%20report%20-%20final%20draft%202.25.22.pdf>

PARTIE II — Quelques molécules, des milliers de produits

Chapitre 4 — Éthylène et propylène : les grands arbres des oléfines

Des molécules plateformes aux polymères, solvants, fibres et intermédiaires

Le chapitre précédent s'achevait à la sortie des unités de production : éthylène, propylène et autres molécules plateformes avaient enfin été séparés avec une pureté suffisante pour devenir des matières premières chimiques.

C'est à ce moment que la pétrochimie change encore de nature.

Jusqu'ici, l'industrie cherchait surtout à obtenir quelques molécules réactives à partir de charges beaucoup plus complexes. À partir de maintenant, elle exploite cette réactivité pour construire des chaînes de produits.

L'éthylène et le propylène ne sont pas des matériaux. Ils ne sont pas non plus, dans la plupart des cas, des produits consommés directement. Ce sont des points de bifurcation.

À partir de l'éthylène, on peut produire directement du polyéthylène ou passer par des intermédiaires comme le dichlorure d'éthylène, l'oxyde d'éthylène, l'éthylbenzène ou l'acétate de vinyle. Le Department of Energy représente explicitement cet arbre vers le PVC, les glycols et polyesters, le styrène et diverses familles de polyéthylènes.¹

À partir du propylène, l'arbre conduit notamment au polypropylène, à l'oxyde de propylène, à l'acrylonitrile, au cumène et aux oxoalcools. L'American Chemistry Council et le Department of Energy identifient ces dérivés comme des branches majeures de la chimie du propylène.²

L'importance de ces deux molécules tient donc moins à ce qu'elles sont qu'à ce qu'elles rendent possible.

Ce chapitre ne cherchera pas à dresser la liste de tous leurs dérivés. Une telle liste deviendrait vite encyclopédique et cacherait le mécanisme principal. Nous suivrons plutôt quelques routes représentatives afin de comprendre comment une double liaison devient polymère, solvant, fibre, mousse ou intermédiaire.

Nous verrons également que les mots « dérivé de l'éthylène » ou « dérivé du propylène » peuvent masquer des chaînes longues où interviennent chlore, oxygène, benzène, ammoniac, hydrogène ou autres réactifs.

Un arbre pétrochimique n'est jamais fait d'un seul élément chimique.

Il est fait de croisements.

Pourquoi les oléfines sont de si bonnes plateformes

L'éthylène et le propylène appartiennent à la famille des oléfines, ou alcènes. Leur caractéristique fondamentale est la présence d'une double liaison carbone-carbone.

Cette double liaison contient une composante plus réactive qu'une liaison simple ordinaire. Elle peut s'ouvrir ou participer à des réactions d'addition dans lesquelles de nouveaux atomes ou groupes viennent se fixer sur les carbones.

Cette propriété permet deux stratégies industrielles très différentes.

La première consiste à faire réagir de nombreuses molécules identiques ou apparentées les unes avec les autres : c'est la polymérisation.

La seconde consiste à utiliser la double liaison comme porte d'entrée vers une nouvelle fonction chimique : alcool, époxyde, halogénure, nitrile ou autre groupe.

Dans le premier cas, la molécule plateforme devient l'unité répétitive d'un matériau.

Dans le second, elle devient un intermédiaire qui ouvre une nouvelle branche.

L'éthylène et le propylène sont donc des plateformes parce qu'ils combinent plusieurs qualités industrielles : production à très grande échelle, réactivité suffisamment élevée pour être transformés efficacement, diversité des routes chimiques accessibles et possibilité de fabriquer des produits correspondant à des marchés massifs.

Leur simplicité apparente est précisément ce qui permet leur diversification.

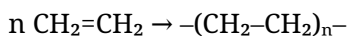
Deux ou trois carbones deviennent la base de chaînes industrielles comprenant parfois plusieurs étapes avant le produit final.

L'éthylène vers le polyéthylène : la route la plus directe

La route la plus intuitive à partir de l'éthylène est sa polymérisation.

L'éthylène a pour formule C_2H_4 . Lorsqu'un grand nombre de molécules sont reliées, la double liaison s'ouvre et les unités carbonées s'enchaînent.

On peut représenter le bilan simplifié ainsi :



Le produit est le polyéthylène.

Cette formule pourrait laisser croire qu'il n'existe qu'un seul polyéthylène. C'est faux.

La manière dont les chaînes sont initiées, propagées et organisées modifie profondément les propriétés du matériau. Le degré de ramification, la masse moléculaire, la distribution des masses et la cristallinité influencent densité, rigidité, résistance mécanique, facilité de mise en forme et transparence.

C'est ainsi que l'on distingue notamment le polyéthylène basse densité — LDPE —, le polyéthylène linéaire basse densité — LLDPE — et le polyéthylène haute densité — HDPE.

Le Department of Energy présente ces trois familles parmi les principales destinations de l'éthylène et rappelle que le polyéthylène constitue son dérivé majeur.¹

Le LDPE possède davantage de ramifications longues et une structure moins compacte. Il est particulièrement adapté aux films souples, revêtements et produits flexibles.

Le HDPE est plus linéaire et peut cristalliser davantage. Il fournit des matériaux plus rigides employés notamment dans bouteilles, bidons, tuyaux et caisses.

Le LLDPE combine une chaîne principale largement linéaire avec des ramifications courtes introduites grâce à des comonomères. Cette structure permet d'ajuster résistance à la déchirure, souplesse et aptitude à la fabrication de films.

Trois matériaux peuvent donc provenir de la même molécule plateforme et posséder des usages très différents.

La variable décisive n'est plus la composition élémentaire.

C'est l'architecture de la macromolécule.

Catalyse et pression : plusieurs histoires pour un même polymère

Le polyéthylène est également un bon exemple de l'histoire technologique de la pétrochimie.

Le LDPE traditionnel est obtenu par polymérisation radicalaire à très haute pression. Cette voie favorise la formation de nombreuses ramifications.

Le HDPE et de nombreux LLDPE sont au contraire obtenus grâce à des catalyseurs qui contrôlent beaucoup plus précisément l'addition des monomères. Les familles de catalyseurs Ziegler-Natta, Phillips et plus récemment métallocènes ou systèmes apparentés ont permis d'ajuster finement la structure des chaînes.

Le catalyseur détermine ainsi une partie de la microstructure du matériau.

Cette évolution a une conséquence intellectuelle importante : parler d'un « plastique issu de l'éthylène » ne suffit pas à prédire ses propriétés.

Il faut connaître la manière dont la chaîne a été construite.

Dans la pétrochimie aval, le procédé n'est donc plus seulement responsable du rendement.

Il devient responsable de la structure même de la matière produite.

Deux usines alimentées par un éthylène chimiquement identique peuvent produire des polyéthylènes différents parce que catalyseurs, comonomères, conditions de réaction et stratégie de contrôle ne sont pas les mêmes.

La molécule plateforme fixe un espace de possibilités.

La polymérisation choisit une architecture à l'intérieur de cet espace.

Le comonomère : modifier le matériau sans changer de famille

Le LLDPE permet d'introduire une notion qui reviendra dans de nombreux polymères : le comonomère.

Une polymérisation n'est pas obligée d'utiliser une seule espèce moléculaire.

L'éthylène peut être copolymérisé avec de petites quantités d'autres alpha-oléfines telles que le 1-butène, le 1-hexène ou le 1-octène. Ces molécules introduisent des ramifications courtes dans la chaîne de polyéthylène.

Le matériau reste majoritairement un polymère d'éthylène, mais ses propriétés changent.

Le choix du comonomère et sa proportion permettent de modifier densité, souplesse, résistance mécanique ou comportement lors de la mise en forme.

Cette stratégie révèle la logique fine de l'industrie des polymères.

Elle ne se contente pas de fabriquer une matière puis de chercher des usages.

Elle ajuste la matière à une fonction.

Les alpha-oléfines elles-mêmes peuvent provenir de chaînes pétrochimiques spécifiques ; le Department of Energy les place d'ailleurs parmi les dérivés directs de l'éthylène.¹

L'arbre devient donc récursif : une oléfine produit une autre famille d'oléfines qui vient ensuite modifier un polymère issu de la première.

Éthylène + chlore : la route vers le PVC

Une autre grande branche de l'éthylène ne conduit pas directement à un polymère.

Elle commence par l'introduction du chlore.

L'éthylène réagit avec du chlore pour former principalement du 1,2-dichloroéthane, souvent désigné EDC pour ethylene dichloride.

L'EDC est ensuite craqué afin de produire du chlorure de vinyle monomère, ou VCM.

Le VCM est enfin polymérisé en PVC.

La chaîne peut être résumée :



Le Department of Energy identifie cette route comme l'une des principales branches de la chaîne de valeur de l'éthylène et souligne l'importance du PVC dans la construction.¹

Ce trajet montre pourquoi le terme « dérivé de l'éthylène » doit être compris avec prudence.

Le PVC n'est pas un simple polymère d'éthylène.

Sa chaîne carbonée provient en partie de l'éthylène, mais le chlore est devenu une composante constitutive majeure du matériau.

Le procédé est donc à l'intersection de deux grandes industries de base : les oléfines et la chimie du chlore.

Cette intersection influence les sites industriels. Une unité de VCM et PVC a besoin d'éthylène, mais aussi d'un approvisionnement fiable en chlore, souvent produit par électrolyse de saumure dans l'industrie chlore-soude.

La localisation d'une usine ne répond donc pas seulement à la proximité du vapocraqueur.

Elle répond à la possibilité de connecter plusieurs chaînes de matières premières.

Pourquoi le PVC est une famille de formulations

Le PVC brut issu de polymérisation n'est encore qu'une résine.

Pour devenir tuyau rigide, gaine de câble, revêtement de sol ou produit souple, il est formulé avec différents additifs : stabilisants, lubrifiants, pigments, charges et, lorsqu'une grande flexibilité est recherchée, plastifiants appropriés.

Cette étape rappelle que le produit commercial final n'est souvent pas identique au polymère pur.

Les propriétés visibles par le consommateur proviennent de la combinaison :

polymère + additifs + procédé de transformation.

Cette distinction sera importante lorsque nous examinerons les déchets et le recyclage.

Recycler une résine théoriquement identifiable ne signifie pas toujours récupérer une matière chimiquement simple. Les additifs, charges, pigments et mélanges de polymères modifient la difficulté de la séparation et de la réutilisation.

L'arbre pétrochimique ne s'arrête donc pas à la polymérisation.
Il se prolonge dans la formulation.

L'éthylène vers l'oxyde d'éthylène : ajouter de l'oxygène sans perdre la plateforme

Une autre route importante consiste à oxyder l'éthylène.

L'oxydation contrôlée produit de l'oxyde d'éthylène, une petite molécule cyclique appartenant à la famille des époxydes.

Son cycle à trois atomes est fortement contraint. Cette tension rend la molécule particulièrement réactive et utile comme intermédiaire.

Une partie importante de l'oxyde d'éthylène est transformée en éthylène glycol.

L'éthylène glycol est utilisé notamment dans les fluides antigels et comme matière première de polyester. Le Department of Energy place explicitement la séquence éthylène → oxyde d'éthylène → glycols → polyesters parmi les grandes branches de la chaîne de valeur de l'éthylène.¹

Nous rencontrons ici une nouvelle logique.

Le polyéthylène est obtenu en reliant directement des molécules d'éthylène.

Le polyester nécessite au contraire de transformer l'éthylène en une molécule oxygénée, puis de la faire réagir avec une autre matière première.

L'éthylène ne fournit donc qu'une partie du polymère final.

Du glycol au polyester : quand deux arbres se rejoignent

L'éthylène glycol issu de l'arbre de l'éthylène rejoint ici une branche aromatique : l'acide téréphtalique purifié, produit à partir du paraxylène. Leur condensation conduit notamment au PET.

À ce stade, le point important n'est pas de détailler le polyester, qui sera repris depuis l'arbre aromatique puis depuis les objets. Il est de constater qu'un arbre d'oléfines ne reste pas isolé : il fournit des intermédiaires qui se combinent à d'autres plateformes.

Le chapitre suivant expliquera cette convergence du côté du paraxylène.

Éthylène + benzène : la route vers le styrène

L'éthylène croise aussi l'arbre du benzène. Par alkylation, le benzène peut former de l'éthylbenzène, ensuite déshydrogéné en styrène. Le Department of Energy place cette séquence parmi les grands débouchés de l'éthylène.¹

Le styrène devient ensuite monomère de plusieurs matériaux et copolymères. Leur détail appartient aux branches aromatiques et aux objets ; ici, la fonction de la route est surtout de montrer qu'une oléfine peut devenir l'un des réactifs d'une plateforme aromatique plutôt que le monomère direct d'un polymère.

L'acétate de vinyle et les branches moins visibles

Toutes les branches de l'éthylène ne conduisent pas aux plastiques les plus célèbres.

L'acétate de vinyle monomère, souvent abrégé VAM, est une autre plateforme aval importante. Il peut être produit à partir d'éthylène, d'acide acétique et d'oxygène, puis polymérisé ou copolymérisé.

Ses dérivés interviennent notamment dans des adhésifs, revêtements, peintures et finitions de papier ou de textile. Le Department of Energy inclut le vinyl acetate parmi les branches significatives de l'éthylène.¹

Cette route rappelle que la pétrochimie n'est pas synonyme de « matières plastiques rigides ».

Une grande partie de sa valeur est cachée dans des couches minces, colles, dispersions, revêtements et additifs que le consommateur ne voit pratiquement jamais.

L'objet final peut contenir quelques grammes d'un matériau pétrochimique qui détermine pourtant son adhérence, sa résistance à l'eau, son aspect de surface ou sa durée de vie.

La masse n'est donc pas toujours un bon indicateur de fonction.

Le propylène : même famille, autre arbre

Le propylène, C_3H_6 , possède lui aussi une double liaison.

Sa différence avec l'éthylène paraît minime : un carbone supplémentaire et un groupe méthyle attaché à la double liaison.

Cette différence suffit pourtant à modifier profondément les produits accessibles et les propriétés des polymères.

Le propylène est lui aussi presque entièrement utilisé comme intermédiaire chimique. L'American Chemistry Council identifie parmi ses grandes destinations le polypropylène, l'oxyde de propylène, l'acrylonitrile, les oxo-chemicals et l'acide acrylique.²

Le propylène peut être coproduit dans les vapocraqueurs, récupéré dans les raffineries ou fabriqué par des procédés dédiés comme la déshydrogénation du propane.

Cette diversité des sources modifie son économie.

L'éthylène issu d'un vapovapocraqueur d'éthane est intimement lié à cette charge.

Le propylène peut être davantage « découplé » lorsque des unités dédiées sont construites pour répondre spécifiquement à sa demande.

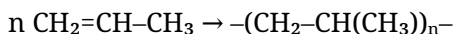
La matière plateforme reste identique.

La logique d'approvisionnement change.

Le polypropylène : une petite asymétrie qui change le matériau

Le polypropylène est obtenu par polymérisation du propylène.

Le bilan simplifié ressemble à celui du polyéthylène :



Mais chaque unité répétitive porte désormais un groupe méthyle latéral.

Cette présence crée une question nouvelle : comment ces groupes sont-ils orientés le long de la chaîne ?

Ils peuvent être disposés de manière régulière du même côté, alterner selon une organisation régulière ou être distribués sans ordre stéréochimique strict.

Ces arrangements sont décrits par la tacticité : isotactique, syndiotactique ou atactique.

Pour de nombreuses applications, la capacité de produire industriellement du polypropylène fortement isotactique a été décisive.

Elle permet une structure suffisamment régulière pour cristalliser et donner un matériau thermoplastique doté d'un bon compromis entre rigidité, masse, résistance chimique et facilité de transformation.

Le catalyseur devient alors encore plus clairement un architecte moléculaire. Il ne décide pas seulement si les monomères se relient. Il influence la manière dont chaque nouvelle unité est orientée.

À cette échelle, une propriété macroscopique comme la rigidité d'une pièce découle d'une séquence répétée de choix stéréochimiques invisibles.

Pourquoi le polypropylène apparaît partout

Le polypropylène est utilisé dans des emballages, fibres, pièces automobiles, objets moulés, dispositifs médicaux, éléments

d'électroménager et de nombreux autres produits. L'EIA cite par exemple les intérieurs automobiles, les emballages et les équipements de protection parmi les débouchés associés à la demande de propylène et de polypropylène.³

Cette diversité vient de plusieurs caractéristiques combinées. Le matériau possède une faible densité. Il peut offrir une bonne rigidité. Il résiste à de nombreux agents chimiques. Il peut être transformé par injection, extrusion ou filage.

Sa formulation et sa copolymérisation permettent d'ajuster résistance aux chocs, transparence ou comportement thermique.

Comme pour le polyéthylène, il n'existe donc pas un seul « PP ».

L'industrie produit des grades différents.

Des copolymères contenant une fraction d'éthylène peuvent par exemple améliorer certaines propriétés mécaniques.

Les arbres de l'éthylène et du propylène se croisent ici directement au sein du même polymère.

Propylène vers oxyde de propylène : ouvrir la voie aux polyuréthanes

L'oxyde de propylène est un dérivé majeur du propylène. Son cycle époxyde réactif permet notamment de produire des polyéther-polyols, l'une des familles de matières premières utilisées dans les polyuréthanes.⁴

La chaîne utile à retenir ici est donc propylène → oxyde de propylène → polyols. Les polyuréthanes eux-mêmes résultent ensuite de la rencontre de ces polyols avec des isocyanates issus d'autres branches. Le chapitre consacré aux objets reviendra sur cette convergence du point de vue de la mousse et de sa formulation.

Toutes les routes vers l'oxyde de propylène n'ont pas les mêmes coproduits

La fabrication de l'oxyde de propylène est également un bon exemple de la manière dont une même molécule peut provenir de procédés différents.

Certaines routes historiques produisent l'oxyde de propylène avec des coproduits importants, par exemple le styrène ou l'alcool tertiaire butylique selon la technologie.

D'autres technologies utilisent du peroxyde d'hydrogène et cherchent à produire principalement oxyde de propylène et eau.

Le choix de procédé modifie donc l'économie entière de l'installation.

Une usine dont la viabilité dépend de la vente d'un coproduit n'a pas le même comportement qu'une usine dont le procédé est orienté presque exclusivement vers le produit principal.

Cette différence devient particulièrement importante lorsque les marchés des deux produits évoluent de manière divergente.

La notion de coproduit rencontrée dans le vapocraquage réapparaît donc en aval.

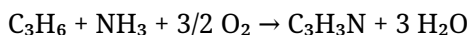
L'industrie chimique est remplie de procédés où deux marchés apparemment distincts sont reliés par la stoechiométrie d'une même réaction.

Propylène vers acrylonitrile : introduire l'azote

L'acrylonitrile montre encore une autre manière de transformer le propylène.

Dans le procédé industriel dominant, le propylène réagit avec ammoniac et oxygène : c'est l'ammoxydation.

Le bilan global simplifié peut être écrit :



Le produit, l'acrylonitrile, contient désormais de l'azote sous forme de groupe nitrile.

Le Department of Energy décrit le procédé SOHIO d'ammoxydation du propylène comme une technologie industrielle de référence pour l'acrylonitrile.⁵

L'acrylonitrile sert notamment à produire fibres acryliques, résines ABS et caoutchoucs nitrile, ainsi que d'autres intermédiaires.

Cette route illustre magnifiquement le passage d'une oléfine simple à une fonctionnalité chimique très différente.

Le squelette carboné du propylène est conservé.

Mais l'introduction d'azote crée une molécule dont les propriétés et les usages n'ont presque plus rien à voir avec ceux du propylène initial.

Une plateforme pétrochimique est donc moins une matière qu'un squelette disponible pour transformation.

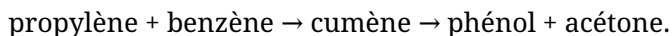
Cumène, phénol et acétone : quand propylène et benzène se rencontrent

Le propylène peut également réagir avec le benzène pour produire du cumène, ou isopropylbenzène.

Le cumène est ensuite oxydé en hydroperoxyde de cumène, puis clivé pour produire principalement phénol et acétone.

Le Department of Energy retient cette route comme procédé conventionnel de production du phénol.⁵

Cette chaîne est capitale parce qu'elle relie directement les oléfines aux aromatiques.



Le phénol sert ensuite à de nombreuses synthèses, notamment vers bisphénol A, résines phénoliques, caprolactame par certaines routes ou autres intermédiaires.

L'acétone possède elle-même de nombreux usages comme solvant et matière première. Une seule consommation de propylène crée donc simultanément deux produits importants. La stœchiométrie du procédé lie leurs marchés.

Si la demande de phénol croît fortement alors que celle d'acétone stagne, l'équilibre économique se complique. D'autres routes peuvent alors gagner de l'intérêt.

Une réaction industrielle transporte toujours avec elle un portefeuille de conséquences.

Oxo-alcools : allonger la chaîne de carbone

Le propylène peut également subir une hydroformylation, souvent appelée procédé oxo.

Cette réaction ajoute simultanément monoxyde de carbone et hydrogène à la double liaison. Le squelette C_3 devient alors un aldéhyde C_4 .

Selon la sélectivité, on obtient principalement du butyraldéhyde normal ou ramifié.

Ces aldéhydes peuvent être hydrogénés en alcools, notamment n-butanol et isobutanol, ou prolongés vers des alcools plus lourds comme le 2-éthylhexanol.

Ces produits alimentent ensuite solvants, plastifiants, revêtements et autres chaînes. Cette route montre un nouveau type de construction. Le craquage cassait les chaînes. La polymérisation les allongeait par répétition d'un monomère.

L'hydroformylation ajoute un carbone provenant du monoxyde de carbone à une oléfine.

La pétrochimie utilise donc plusieurs manières de modifier le squelette carboné : casser, coupler, polymériser, cycliser ou insérer de nouveaux atomes de carbone.

Acide acrylique : oxyder le propylène vers une nouvelle famille

Une autre branche importante conduit à l'acide acrylique.

Le propylène peut être oxydé catalytiquement en deux étapes principales, généralement via l'acroléine, pour donner l'acide acrylique.

Celui-ci devient ensuite la base d'acrylates et de polymères utilisés dans peintures, adhésifs, revêtements, superabsorbants et nombreuses formulations.

L'American Chemistry Council classe l'acide acrylique parmi les dérivés industriels significatifs du propylène.²

Cette branche est intéressante parce qu'elle éloigne encore davantage le produit final de l'image du « plastique ».

Un polymère superabsorbant présent dans une couche, un liant de peinture ou un adhésif sensible à la pression peuvent tous dépendre d'un arbre dont l'une des racines est le propylène.

La pétrochimie devient alors presque invisible. Elle n'est plus l'objet. Elle est la propriété fonctionnelle de l'objet.

Pourquoi l'éthylène et le propylène n'ont pas les mêmes marchés

Les deux molécules sont des oléfines légères, mais leurs portefeuilles aval ne sont pas identiques.

L'éthylène est fortement dominé par les polyéthylènes et par quelques grandes chaînes comme EDC/VCM/PVC, oxyde d'éthylène/glycols et éthylbenzène/styrène. Le Department of Energy souligne que le polyéthylène est le dérivé le plus important de l'éthylène.¹

Le propylène possède lui aussi un polymère dominant — le polypropylène — mais une part significative de son arbre se distribue entre oxyde de propylène, acrylonitrile, cumène, oxo-alcools, acide acrylique et autres intermédiaires.²

Cette différence influence le fonctionnement des marchés.

Une variation de demande dans l'emballage peut affecter simultanément polyéthylène et polypropylène, mais une variation de construction, de fibre, d'automobile ou de mousse ne se transmet pas de manière identique aux deux plateformes.

Les deux arbres partagent donc certaines dépendances macroéconomiques tout en conservant des structures propres.

La notion de « marché des oléfines » est utile.

Elle ne doit pas effacer les différences entre les arbres.

Pureté polymère : quand quelques parties par million comptent

La fabrication des polymères impose des niveaux de pureté élevés aux monomères.

Le chapitre précédent avait déjà montré combien la séparation éthylène/éthane ou propylène/propane peut être exigeante.

Nous pouvons maintenant comprendre pourquoi l'industrie accepte ce coût.

Un catalyseur de polymérisation peut être extrêmement sensible à certaines impuretés.

De petites quantités d'eau, d'oxygène, de soufre, d'acétylènes ou d'autres composés peuvent réduire l'activité, modifier la masse moléculaire ou perturber la régularité du polymère.

La pureté n'est donc pas un luxe analytique.

Elle garantit que des milliards de molécules répètent la réaction souhaitée de manière suffisamment contrôlée.

Une différence microscopique dans la charge peut se propager jusqu'à une propriété macroscopique du matériau.

C'est pourquoi les grandes chaînes pétrochimiques sont structurées autour de spécifications et de contrôles analytiques continus.

La chimie de commodité est une chimie de masse.

Elle est aussi une chimie de précision.

Pourquoi on transporte souvent les dérivés plutôt que l'oléfine

L'éthylène et le propylène sont des gaz ou liquides très volatils dans les conditions ordinaires de manutention et nécessitent des infrastructures spécialisées pour être stockés et transportés à grande distance.

Les dérivés solides ou liquides plus stables sont souvent beaucoup plus simples à expédier.

L'EIA souligne par exemple que les dérivés de l'éthylène comme les polyéthylènes peuvent être exportés par des infrastructures conventionnelles, alors que l'éthane et l'éthylène nécessitent des conditions particulières de réfrigération ou de manutention pour le transport maritime.⁶

Cette différence explique une partie de l'intégration géographique des complexes.

Il peut être économiquement préférable de transformer l'éthylène près du vapocraqueur, puis d'exporter du polyéthylène sous forme de granulés.

Le produit chimique change alors non seulement de valeur.

Il change de logistique.

Une réaction peut donc être justifiée en partie parce qu'elle rend la matière plus facile à transporter.

Granulés : le point où la molécule devient marchandise

Après polymérisation, un matériau thermoplastique est souvent fondu, homogénéisé avec certains additifs de base, puis découpé sous forme de petits granulés.

Ces granulés constituent une interface remarquable entre pétrochimie et industrie manufacturière.

En amont, leur structure dépend de catalyseurs, réacteurs et contrôles moléculaires complexes.

En aval, ils deviennent une matière standardisée que des milliers d'entreprises peuvent fondre à nouveau pour extrusion, injection, soufflage, thermoformage ou filage.

La pétrochimie concentre ainsi la complexité chimique dans un produit intermédiaire relativement facile à stocker et à transporter.

Le transformateur n'a pas besoin de posséder un vapocraqueur. Il achète une architecture moléculaire déjà construite. Cette division du travail explique l'extension mondiale des polymères.

Une grande installation produit des centaines de milliers ou millions de tonnes de résine.

Une multitude d'installations beaucoup plus petites transforme ensuite ces granulés en objets.

Un même monomère, des milliers de grades

Même à l'intérieur d'une famille comme le polyéthylène ou le polypropylène, le mot « matériau » reste trop général.

Les producteurs commercialisent des grades spécifiés par leurs propriétés : indice de fluidité, densité, distribution de masse moléculaire, rigidité, résistance au choc, transparence, aptitude au soudage, comportement en extrusion ou autres critères.

Une résine destinée à une bouteille soufflée ne possède pas nécessairement le même profil qu'une résine destinée à un film très mince.

Une fibre de polypropylène ne demande pas exactement la même combinaison qu'une charnière moulée.

Les formulations aval ajoutent encore pigments, stabilisants, charges minérales, retardateurs de flamme ou autres additifs selon l'application.

Cette diversité est une raison fondamentale de la difficulté des substitutions. Remplacer « le polypropylène » n'est pas une opération unique. Il faut remplacer un grade particulier dans une fonction particulière.

La question écologique devra donc descendre jusqu'à ce niveau lorsqu'elle veut être techniquement sérieuse.

Ce que l'arbre révèle sur le recyclage

Les deux arbres de ce chapitre permettent déjà d'anticiper le problème du recyclage.

Lorsque l'éthylène devient polyéthylène, la structure reste relativement simple : une chaîne carbonée saturée.

Lorsque l'éthylène passe par EDC puis VCM, le PVC contient du chlore.

Lorsqu'il passe par oxyde d'éthylène puis glycol et rencontre l'acide téréphtalique, il devient PET, un polyester comportant oxygène et cycles aromatiques.

Lorsque le propylène devient polypropylène, la chaîne reste un hydrocarbure.

Lorsqu'il devient acrylonitrile, polyuréthane ou acrylate, d'autres éléments et fonctions chimiques entrent dans la matière.

La catégorie « plastique » rassemble donc des matériaux qui se comportent différemment lors d'un chauffage, d'une dissolution, d'une dépolymérisation ou d'une combustion.

Cette diversité rend impossible une technologie unique de recyclage parfaitement adaptée à tous.

La difficulté ne provient pas d'un accident extérieur au système.

Elle est en partie la conséquence directe de la diversité moléculaire qui avait rendu les matériaux utiles.

Ce que l'arbre révèle sur la transition

L'arbre révèle également pourquoi remplacer l'origine fossile des molécules est un problème différent du remplacement des molécules elles-mêmes.

Un éthylène biosourcé ou produit à partir de carbone recyclé est chimiquement identique à un éthylène fossile s'il atteint la même pureté.

Il peut donc entrer dans les mêmes polymérisations et, en principe, produire les mêmes polyéthylènes.

La même logique vaut pour du propylène produit par une route alternative.

Cette compatibilité constitue un avantage majeur des approches dites drop-in : elles remplacent l'origine de la plateforme sans obliger à reconstruire toutes les chaînes aval.

Mais elle possède aussi une limite.

Si l'usage final reste jetable et mal collecté, changer l'origine du carbone ne résout pas le problème de la fin de vie.

Inversement, réduire l'usage d'un polymère évitable ne décarbonera pas automatiquement les applications restantes.

La transition doit donc distinguer au moins quatre questions :

combien de matière produire ;

quelle molécule utiliser ;

d'où provient son carbone ;

et que devient la matière après usage.

Les arbres de valeur permettent de poser chacune séparément.

Deux arbres qui annoncent le reste du livre

L'éthylène et le propylène montrent comment la pétrochimie transforme quelques plateformes en une variété immense de fonctions.

À partir de l'éthylène, nous avons suivi la route directe vers les polyéthylènes, la route chlorée vers le PVC, la route oxygénée vers les glycols et polyesters, la rencontre avec le benzène vers le styrène et des branches moins visibles comme l'acétate de vinyle.

À partir du propylène, nous avons suivi le polypropylène, l'oxyde de propylène et les polyuréthanes, l'acrylonitrile, le cumène, les oxoalcools et l'acide acrylique.

À chaque fois, la même logique réapparaît. Une molécule plateforme possède une double liaison réactive. Une transformation choisit une fonction. Un catalyseur et un procédé contrôlent la sélectivité. Une séparation fournit un intermédiaire suffisamment pur. D'autres arbres peuvent rejoindre la chaîne. La polymérisation ou la formulation crée finalement une propriété matérielle. Le produit quotidien arrive tout au bout.

Nous pouvons maintenant comprendre pourquoi une cartographie pétrochimique complète ressemble moins à une ligne qu'à un réseau routier.

Il reste cependant un autre grand ensemble de carrefours à explorer.

Le benzène, le toluène et les xylènes ne se comportent pas comme les oléfines.

Leur cycle aromatique ouvre d'autres réactions, d'autres polymères et d'autres usages.

Nous allons donc quitter momentanément les doubles liaisons aliphatiques pour entrer dans l'univers des aromatiques.

C'est là que nous retrouverons le PET, le styrène, les polyuréthanes et plusieurs chaînes que ce chapitre n'a fait qu'effleurer.

Notes

1. U.S. Department of Energy, U.S. Ethane: Market Issues & Opportunities, September 2022, section « Ethylene Derivatives Demand and End-Uses » et Figure II-16. La chaîne de valeur présentée relie l'éthylène aux polyéthylènes, EDC/VCM/PVC, oxyde d'éthylène/glycols/polyesters, éthylbenzène/styrène, vinyl acetate et alpha-oléfines.

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-06/U.S.Ethane-Market-Issues-and-Opportunities.pdf>

2. American Chemistry Council, Olefins — Uses & Benefits ; et Department of Energy, cartographies industrielles des chaînes de base. L'ACC identifie le polypropylène, l'oxyde de propylène, l'acrylonitrile, les oxo-chemicals et l'acide acrylique parmi les usages majeurs du propylène.

<https://www.americanchemistry.com/industry-groups/olefins/uses-benefits>

3. U.S. Energy Information Administration, « Heating and petrochemical demand in Asia contribute to more U.S. propane exports », 9 février 2021. L'EIA décrit le propylène comme matière première du polypropylène et cite notamment intérieurs automobiles, emballages et équipements de protection parmi les usages associés. <https://www.eia.gov/Todayinenergy/detail.php?id=46696>

4. U.S. Department of Energy, Pathways to Commercial Liftoff: Industrial Decarbonization, 2024, schéma des building blocks et advanced intermediates : propylène → propylene oxide → polyurethane ; propylène → acrylonitrile ; propylène → polypropylene ; propylène → cumene. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/itiac-march2024-goldman-liftoff-reports.pdf>

5. U.S. Department of Energy, Chemical Bandwidth Study, tableau des technologies sélectionnées : procédé SOHIO/BP d'ammoxydation du propylène vers acrylonitrile ; procédé cumène vers phénol et

acétone.

https://www.energy.gov/sites/default/files/2013/11/f4/chemical_bandwidth_report.pdf

6. U.S. Energy Information Administration, « U.S. exports of ethane and ethane-based petrochemicals rose 135% from 2014 to 2023 », 4 novembre 2024, corrigé le 11 décembre 2024. L'EIA compare la manutention de l'éthane et de l'éthylène avec l'export de dérivés tels que les polyéthylènes. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=63604>

Chapitre 5 — Benzène, toluène et xylènes : l'univers des aromatiques

Dans les chapitres précédents, les oléfines étaient au premier plan. Elles semblaient presque définir la pétrochimie : petites molécules très réactives, produites à grande échelle, transformées en polymères et en intermédiaires.

Les aromatiques introduisent une logique différente.

Le benzène, le toluène et les xylènes — souvent regroupés sous l'acronyme BTX — sont eux aussi des molécules plateformes, mais leur intérêt vient d'un anneau carboné particulièrement stable : le noyau aromatique. L'Energy Information Administration classe précisément benzène, toluène et xylènes parmi les principaux aromatiques commerciaux, et rappelle que le reformage catalytique du naphta produit un reformate riche en ces composés.¹

Cette stabilité ne signifie pas inertie.

Elle signifie que les réactions typiques ne cherchent pas toujours à détruire l'anneau. Elles lui ajoutent ou lui substituent des groupes chimiques, l'hydrogène, l'oxydant ou construisent à partir de lui des intermédiaires dont les propriétés dépendent justement du maintien de cette structure cyclique.

Le benzène peut ainsi devenir éthylbenzène puis styrène ; cumène puis phénol et acétone ; cyclohexane puis précurseurs du nylon ; nitrobenzène puis aniline.

Le paraxylène peut devenir acide téréphtalique puis polyester PET.

L'ortho-xylène ouvre la voie à l'anhydride phtalique.

Le toluène peut être vendu comme solvant ou intermédiaire, mais il peut aussi être transformé en benzène et xylènes lorsque les besoins du complexe pétrochimique l'exigent.

Nous allons donc rencontrer un système moins arborescent qu'il n'y paraît.

Les BTX peuvent être produits ensemble. Ils peuvent être séparés. Ils peuvent parfois être convertis les uns dans les autres.

Et leur valeur dépend autant de ce qui se passe en aval que de leur production elle-même.

Pourquoi les aromatiques sont différents

Le benzène a pour formule C_6H_6 .

Six carbones forment un cycle. Les électrons associés aux liaisons π ne sont pas localisés comme dans une simple succession de doubles liaisons indépendantes : ils sont délocalisés sur l'anneau.

Cette délocalisation stabilise la molécule.

C'est pourquoi il serait trompeur d'imaginer le benzène comme un cyclohexatriène ordinaire qui réagirait exactement comme trois doubles liaisons isolées. Beaucoup de réactions caractéristiques des aromatiques conservent l'anneau et remplacent un hydrogène par un autre groupe.

Cette stabilité devient une fonction industrielle.

Le noyau aromatique apporte rigidité, stabilité thermique, interactions moléculaires particulières et possibilités de fonctionnalisation. On le retrouve donc dans de nombreux polymères, résines, fibres, mousses et molécules fonctionnelles.

Le toluène est un benzène portant un groupe méthyle.

Les xylènes sont des benzènes portant deux groupes méthyle.

Ils existent sous trois isomères : ortho-xylène, méta-xylène et paraxylène. Même formule brute, même noyau aromatique, mais positions différentes des deux groupes méthyle.

Une différence de position suffit alors à créer des chaînes industrielles différentes. Le paraxylène devient surtout un

précurseur des polyesters. L'ortho-xylène mène notamment à l'anhydride phtalique. Le méta-xylène peut conduire à l'acide isophtalique. Une fois encore, la formule brute ne suffit pas. L'organisation des atomes décide de la fonction.

Deux grandes portes d'entrée : reformate et essence de pyrolyse

Les aromatiques pétrochimiques proviennent de plusieurs flux.

Le premier est le reformate produit par reformage catalytique du naphta. Comme nous l'avons vu au chapitre 3, ce procédé augmente la proportion de molécules aromatiques tout en produisant de l'hydrogène. L'EIA souligne que le reformate contient des quantités significatives de benzène, toluène et xylènes et constitue donc une source importante de matières premières pétrochimiques.²

Le second est l'essence de pyrolyse, ou pyrolysis gasoline, issue du vapocraquage de charges plus lourdes comme le naphta.

Dans un vapocraqueur d'éthane, les coproduits aromatiques sont limités.

Dans un vapocraqueur de naphta, la diversité des réactions produit au contraire une fraction liquide riche en hydrocarbures aromatiques et insaturés. Après hydrogénation et traitement appropriés, cette essence de pyrolyse peut devenir une source de benzène et d'autres aromatiques.

Un document historique du Department of Energy décrivait déjà ces deux grandes origines industrielles du benzène : extraction à partir du reformate et récupération à partir de l'essence de pyrolyse, complétées par des transformations du toluène.³ Les proportions exactes ont évolué avec les régions, les charges et les investissements ; ce qui importe ici est la logique.

Les aromatiques ne proviennent donc pas d'une seule machine.

Ils apparaissent à l'interface du raffinage et de la pétrochimie.

Extraire les aromatiques d'un mélange

Produire un reformat riche en aromatiques ne signifie pas posséder immédiatement du benzène, du toluène et du paraxylène purs.

Le reformat reste un mélange.

Il contient aromatiques et non-aromatiques dont les plages d'ébullition peuvent se recouvrir. Une simple distillation ne suffit donc pas toujours à effectuer proprement la première séparation.

L'industrie utilise alors des procédés d'extraction sélective.

Des solvants comme le sulfolane ou certains glycols peuvent présenter une affinité différente pour les composés aromatiques et non aromatiques. Un document du Department of Energy consacré à l'industrie chimique décrit précisément l'extraction au solvant du mélange aromatique, suivie de la récupération du solvant et de la séparation des produits.³

Cette opération rappelle une leçon du chapitre 3.

Une molécule peut être chimiquement facile à produire et physiquement difficile à isoler.

L'extraction ne fabrique pas le benzène.

Elle rend exploitable la différence entre deux familles présentes dans le même flux.

Après cette première étape, benzène et toluène peuvent être séparés par distillation avec une relative efficacité industrielle.

Les xylènes poseront un problème plus difficile.

Le benzène : un carrefour plus qu'un produit final

Le benzène est rarement intéressant parce qu'un consommateur souhaite du benzène.

Sa valeur vient de ses dérivés.

L'American Chemistry Council représente quatre grandes branches du benzène : éthylbenzène, cumène, nitrobenzène et cyclohexane.⁴ Cette carte n'épuise pas toute la chimie du benzène, mais elle suffit à montrer pourquoi il fonctionne comme plateforme.

Chaque branche combine le noyau aromatique avec une transformation différente. Avec l'éthylène, le benzène devient éthylbenzène puis styrène. Avec le propylène, il devient cumène puis phénol et acétone. Par nitration puis réduction, il devient nitrobenzène puis aniline. Par hydrogénation, il perd temporairement son aromaticité pour devenir cyclohexane.

À partir d'une même molécule, l'industrie accède ainsi à des familles de matériaux très différentes.

Le benzène relie donc plusieurs chapitres du livre. Il relie les oléfines aux aromatiques. Il relie la chimie des plateformes à celle des polymères.

Il relie également des filières qui, dans l'objet final, semblent n'avoir aucun rapport : emballage en polystyrène, mousse polyuréthane, résine époxy ou fibre nylon.

Benzène + éthylène : de l'éthylbenzène au styrène

Le benzène peut être alkylé par l'éthylène pour produire de l'éthylbenzène, ensuite déshydrogéné en styrène. La route a déjà été annoncée depuis l'arbre de l'éthylène ; vue depuis le benzène, elle montre surtout comment une plateforme aromatique rejoint une oléfine pour créer un monomère commun aux deux réseaux.⁴

Le styrène alimente notamment polystyrène, copolymères styrène-butadiène et ABS. Ces matériaux ne sont pas détaillés ici : leur intérêt est de montrer la recombinaison de plateformes que le chapitre 6 observera depuis les objets.

Benzène + propylène : le détour par le cumène

La deuxième grande branche associe benzène et propylène.

Le produit est le cumène, ou isopropylbenzène.

Le cumène est ensuite oxydé puis transformé selon le procédé cumène pour produire simultanément phénol et acétone. L'American Chemistry Council le décrit comme un intermédiaire largement utilisé pour la fabrication du phénol et de l'acétone.⁵

Cette coproduction est essentielle.

Le procédé ne fabrique pas librement du phénol sans fabriquer aussi de l'acétone selon la stœchiométrie de la voie.

L'économie de la filière dépend donc des marchés des deux produits.

Le phénol ouvre ensuite plusieurs chaînes.

Avec l'acétone, il peut former le bisphénol A, précurseur notamment de polycarbonates et de résines époxy.

Il peut servir à des résines phénoliques.

Il peut aussi rejoindre d'autres transformations spécialisées.

L'acétone, de son côté, est un solvant important et une matière première pour d'autres intermédiaires.

Ce cas révèle une propriété fondamentale de la pétrochimie.

Un procédé économiquement robuste doit parfois trouver un débouché non seulement pour son produit principal, mais pour un coproduit imposé par la chimie.

La demande d'un seul marché ne suffit donc pas toujours à expliquer l'équilibre d'une chaîne.

Du nitrobenzène à l'aniline : une branche vers les polyuréthanes

La nitration du benzène produit du nitrobenzène, qui peut être hydrogéné en aniline. L'aniline devient ensuite un précurseur de plusieurs molécules, parmi lesquelles le MDI utilisé dans de nombreux polyuréthanes.⁴

Cette branche suffit à établir l'origine aromatique d'une partie de ces matériaux. La chaîne détaillée jusqu'à la mousse et sa formulation appartient au chapitre 6, où elle sera croisée avec la branche des polyols.

Hydrogéner l'aromatique pour fabriquer du nylon

Le benzène peut également prendre une route qui semble paradoxale.

L'industrie a dépensé de l'énergie pour créer ou isoler une molécule aromatique stable.

Elle peut ensuite l'hydrogéner pour supprimer cette aromaticité et produire du cyclohexane.

Pourquoi ?

Parce que le cyclohexane ouvre une autre famille de transformations.

Après oxydation, il peut conduire à des intermédiaires permettant de produire acide adipique ou caprolactame selon les routes industrielles. Ces molécules sont des précurseurs de différentes familles de nylon.

L'American Chemistry Council relie explicitement benzène, cyclohexane/cyclohexène, caprolactame et fibres nylon dans sa carte de chaîne.⁴

Ce chemin rappelle une règle déjà rencontrée.

Une propriété utile à une étape n'est pas nécessairement conservée jusqu'au produit final.

Le benzène est utile parce qu'il constitue une plateforme disponible et réactive selon des transformations industrielles maîtrisées.

Son anneau peut ensuite être modifié ou détruit si une autre structure devient plus utile.

La pétrochimie ne protège pas les molécules.

Elle protège les fonctions.

Le toluène : produit, solvant ou réserve de carbone aromatique

Le toluène est structurellement proche du benzène : un noyau aromatique portant un groupe méthyle.

Il possède ses propres usages comme solvant et intermédiaire.

Mais sa fonction industrielle va plus loin.

Le complexe pétrochimique peut parfois le considérer comme une réserve de carbone aromatique convertible en molécules plus demandées.

La hydrodealkylation retire son groupe méthyle pour produire du benzène.

D'autres procédés de disproportionation peuvent convertir deux molécules de toluène en benzène et xylènes.

Des technologies de transalkylation permettent également de redistribuer des groupes alkyle entre différents aromatiques.

L'ancien profil énergétique du Department of Energy décrit explicitement l'hydrodésalkylation du toluène comme une des routes de production du benzène.³

Cette possibilité change la manière de penser une raffinerie aromatique.

Benzène, toluène et xylènes ne sont pas seulement trois produits séparés.

Ils forment un système de molécules apparentées dont les proportions peuvent, dans certaines limites, être ajustées par conversion.

La valeur relative des marchés peut donc influencer non seulement la quantité séparée, mais les réactions utilisées pour rééquilibrer le portefeuille.

Les xylènes : trois isomères, trois destins

Les xylènes possèdent tous la formule C_8H_{10} .

La différence réside dans la position des deux groupes méthyle sur le noyau benzénique.

Dans l'ortho-xylène, ils sont voisins. Dans le méta-xylène, un carbone les sépare. Dans le paraxylène, ils sont opposés. Ces différences géométriques déterminent leurs transformations et leurs marchés.

Le paraxylène est oxydé en acide téréphtalique, généralement purifié sous forme de PTA, matière première majeure du PET et d'autres polyesters. Le Department of Energy rappelle explicitement que l'acide téréphtalique purifié est une charge de production du PET.⁶

L'ortho-xylène est principalement associé à la production d'anhydride phtalique, lui-même utilisé dans diverses résines et plastifiants.

Le méta-xylène peut être oxydé vers l'acide isophtalique, utilisé notamment pour modifier certaines propriétés de polyesters et de résines.

Une seule formule brute donne donc trois économies chimiques différentes.

Cela explique pourquoi la séparation des isomères devient une étape déterminante.

Pourquoi le paraxylène est difficile à séparer

Benzène et toluène peuvent être séparés par distillation parce que leurs températures d'ébullition diffèrent suffisamment pour qu'une séparation industrielle soit réalisable.

Les isomères du xylène sont beaucoup plus proches.

Leurs températures d'ébullition sont voisines.

Une distillation classique devient donc très coûteuse lorsqu'elle cherche à produire un paraxylène de haute pureté à partir d'un mélange d'isomères.

L'industrie s'appuie alors sur d'autres différences physiques.

Le paraxylène possède notamment un point de fusion nettement supérieur à ceux de l'ortho- et du méta-xylène, ce qui rend possible sa séparation par cristallisation. Les isomères du xylène ayant des températures d'ébullition très proches, la distillation classique est peu adaptée à une purification poussée ; l'industrie utilise surtout l'adsorption sélective et, selon les configurations, la cristallisation.⁸

Les procédés d'adsorption sélective à lit mobile simulé constituent aujourd'hui une voie commerciale majeure de séparation du paraxylène. Ils exploitent des différences d'affinité des isomères pour des adsorbants, tandis que la cristallisation exploite principalement leurs différences de température de fusion.⁸

Le principe est général : lorsque la volatilité ne fournit plus une séparation économiquement suffisante, il faut exploiter une autre propriété.

Cette contrainte explique pourquoi la production de paraxylène n'est pas seulement une question de réaction.

Une unité peut générer un mélange riche en xylènes sans générer automatiquement un flux de paraxylène utilisable pour fabriquer du PTA.

La séparation devient ici presque aussi stratégique que la formation chimique.

Isomériser pour récupérer davantage de paraxylène

Une séparation parfaite du paraxylène laisserait derrière elle un mélange enrichi en ortho- et méta-xylène.

Jeter ce mélange serait économiquement absurde.

L'industrie cherche donc à rétablir un équilibre entre les isomères.

Une unité d'isomérisation peut convertir une partie des xylènes restants en paraxylène.

Le nouveau mélange retourne ensuite vers l'étape de séparation.

On obtient une boucle :

mélange de xylènes → séparation du paraxylène → isomérisation du résidu → nouvelle séparation.

Cette architecture ressemble au recyclage d'éthane non converti dans un vapocraqueur.

Une conversion par passage limitée peut devenir un rendement global élevé si l'on sait séparer le produit recherché et recycler ce qui reste.

Une fois encore, le meilleur procédé ne se comprend pas au niveau d'un seul réacteur.

Il faut suivre la boucle entière.

Du paraxylène au polyester

Par oxydation catalytique, le paraxylène conduit à l'acide téréphtalique puis, après purification, au PTA. Celui-ci rejoint l'éthylène glycol issu de l'arbre de l'éthylène pour former notamment le PET.

C'est ici que la convergence annoncée au chapitre 4 devient intelligible du côté aromatique : le paraxylène fournit la partie téréphtalate, l'éthylène fournit le glycol. Le chapitre suivant ne répétera pas cette synthèse ; il partira directement de la bouteille et du textile pour étudier mise en forme, assemblage et fin de vie.

Une chaîne matérielle peut traverser plusieurs complexes industriels

Il est tentant d'imaginer que le pétrole entre dans une usine et qu'une bouteille en ressort.

En réalité, chaque grande étape peut se produire sur un site différent. Le naphta peut être produit dans une raffinerie. Le paraxylène dans un complexe aromatique. Le PTA dans une usine dédiée. L'éthylène glycol dans un autre complexe issu de l'éthylène. Le PET dans une unité de polymérisation. La préforme et la bouteille encore ailleurs.

Chaque étape peut appartenir à une entreprise différente et être située dans un pays différent.

La chaîne pétrochimique est donc aussi une chaîne logistique.

Une molécule intermédiaire possède de la valeur parce qu'elle peut être transportée, stockée et échangée entre unités spécialisées.

L'intégration sur un même site réduit certains coûts de transport et permet des synergies énergétiques ou matérielles.

La spécialisation internationale permet en revanche de concentrer certains investissements là où matières premières, énergie, ports ou marchés rendent la production avantageuse.

Nous retrouverons cette tension au chapitre économique.

Pour l'instant, elle rappelle que la carte moléculaire n'est pas encore la carte géographique.

Le benzène oblige aussi à parler de danger

Les chapitres précédents ont volontairement différé l'analyse détaillée des risques.

Le benzène rend cependant impossible une omission complète.

C'est une matière première industrielle majeure et un agent cancérogène pour l'être humain classé dans le groupe 1 par le Centre international de recherche sur le cancer (IARC).⁹ Les expositions professionnelles et environnementales au benzène sont donc un enjeu majeur de prévention et de contrôle.

Il faut distinguer deux propositions. La première concerne le danger intrinsèque d'une molécule. La seconde concerne le risque réel d'exposition dans une situation donnée.

Dire que le benzène est dangereux ne signifie pas qu'un objet fabriqué à partir d'une chaîne ayant utilisé du benzène contient nécessairement du benzène libre en quantité significative.

Inversement, la disparition du benzène dans la structure d'un polymère final ne supprime pas les risques qui ont existé lors de sa production, son stockage et son transport.

Cette distinction sera essentielle lorsque nous traiterons systématiquement santé, accidents et pollution.

Pour le moment, elle évite une confusion fréquente : les propriétés toxicologiques d'un intermédiaire ne se transmettent pas automatiquement au matériau final, mais elles comptent pleinement dans l'évaluation de la chaîne industrielle.

Des molécules interchangeables seulement jusqu'à un certain point

Les technologies de disproportionation, transalkylation et isomérisation donnent l'impression que les aromatiques pourraient être librement transformés les uns dans les autres.

Ce n'est pas le cas.

Chaque conversion impose des équilibres thermodynamiques, des catalyseurs, de l'hydrogène éventuel, des séparations et des pertes.

Transformer du toluène en benzène ou en xylènes ne crée pas gratuitement la structure désirée.

Isomériser des xylènes n'extrait pas automatiquement le paraxylène.

Augmenter la production d'un produit peut réduire la disponibilité d'un autre.

La flexibilité existe, mais elle a un coût.

Cette idée deviendra centrale pour comprendre l'économie du secteur.

Une usine pétrochimique ne répond pas instantanément à la demande comme un logiciel qui modifierait une variable.

Elle possède des capacités installées, des catalyseurs, des colonnes, des adsorbeurs et des contrats de matières premières conçus pour un certain portefeuille.

La chimie autorise des ajustements.

L'infrastructure en limite la vitesse et l'ampleur.

Les aromatiques comme deuxième grand réseau de la pétrochimie

Nous pouvons maintenant replacer les BTX dans l'ensemble du livre.

Le vapocraquage nous avait donné les oléfines.

Le reformage et les fractions aromatiques du vapocraquage nous donnent une seconde grande famille de plateformes.

Benzène, toluène et xylènes ne sont pas seulement trois molécules de plus. Ils organisent un réseau entier. Le benzène rejoint l'éthylène pour produire du styrène. Il rejoint le propylène pour produire du cumène. Il mène à l'aniline, au MDI et aux polyuréthanes. Il mène au cyclohexane et au nylon.

Le toluène peut devenir produit final, intermédiaire ou source de benzène et xylènes.

Le paraxylène rejoint l'éthylène glycol pour produire le PET. L'ortho-xylène ouvre une autre branche de résines et plastifiants. Le méta-xylène en ouvre encore une autre.

Le Department of Energy classe d'ailleurs les BTX avec l'éthylène et le propylène parmi les grands « building block chemicals » qui structurent une part considérable de l'industrie chimique.⁷

Nous disposons maintenant des deux grands ensembles nécessaires pour comprendre la pétrochimie organique de base :

les oléfines ;

les aromatiques.

Le chapitre suivant fera exactement l'inverse de ce que nous avons fait jusqu'ici.

Nous ne partirons plus des molécules pour descendre vers leurs dérivés. Nous partirons d'objets ordinaires et remonterons leurs chaînes. Une bouteille. Un textile. Un pneu. Une mousse. Un détergent.

L'objectif sera de voir combien de procédés, de plateformes et d'intermédiaires peuvent se cacher derrière un objet qui paraît simple.

La pétrochimie cessera alors d'être une carte de molécules.

Elle deviendra une généalogie de la matière quotidienne.

Notes

1. U.S. Energy Information Administration, définitions des aromatiques : les aromatiques commerciaux issus du pétrole comprennent notamment benzène, toluène et xylènes (BTX). https://www.eia.gov/dnav/pet/TblDefs/pet_pnp_capprod_tbldef2.asp

2. U.S. Energy Information Administration, « Catalytic reforming boosts octane for gasoline blending », 9 avril 2013 : le reformate est une source importante de benzène, toluène et xylènes pour la pétrochimie. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=10731>

3. U.S. Department of Energy, Energy and Environmental Profile of the U.S. Chemical Industry, chapitre sur les aromatiques : production de BTX à partir du reformate, de l'essence de pyrolyse et du toluène ; extraction au solvant et fractionnement.

https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/chemicals/pdfs/profile_chap4.pdf

4. American Chemistry Council, Chemical Chains — Benzene : cartographie des principales branches benzène → éthylbenzène/styrène, cumène/phénol, nitrobenzène/aniline/MDI et cyclohexane/nylon.

<https://www.americanchemistry.com/content/download/17500/file/Chemical-Chains-Interactive.pdf>

5. American Chemistry Council, « Cumene » : le cumène est largement utilisé comme intermédiaire pour produire phénol et acétone.

<https://www.americanchemistry.com/industry-groups/cumene>

6. U.S. Department of Energy / CEMAC, présentation sur l'acide téréphtalique purifié : le PTA est une matière première pour la production de PET.

https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/analysis_and_sustainability_biddy_6.3.0.5.pdf

7. U.S. Department of Energy, « Chemicals Value Chain Decarbonization » : les BTX, avec l'éthylène, le propylène, le méthanol et l'ammoniac, font partie des grandes molécules plateformes qui dominent le volume et les émissions du secteur chimique américain.

<https://www.energy.gov/cmei/ito/articles/chemicals-value-chain-decarbonization-integrated-solutions-complex-challenge>

8. ACS Omega, « Process Optimization of Para-xylene Crystallization Separation Process », 2023, et Industrial & Engineering Chemistry Research, « Techno-Economic Analysis of a Carbon Molecular Sieve-Based Xylene Isomer Purification Process », 2024. Ces travaux rappellent que les isomères du xylène ont des températures d'ébullition très proches, ce qui rend la distillation peu adaptée, et que les séparations commerciales reposent principalement sur adsorption et cristallisation.

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.3c00069> ;
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11503610/>

9. International Agency for Research on Cancer (IARC), Monographs Volume 120, Benzene, 2018. Le benzène est classé cancérigène pour l'homme (groupe 1). <https://publications.iarc.who.int/576>

Chapitre 6 — Du complexe pétrochimique à l'objet quotidien

Remonter les chaînes d'une bouteille, d'un textile, d'un pneu, d'une mousse et d'un détergent

Jusqu'ici, nous avons suivi la matière dans le sens de l'usine.

Du pétrole et du gaz vers les charges. Des charges vers les molécules plateformes. Des plateformes vers leurs grandes branches de transformation.

Ce mouvement était nécessaire parce qu'il révélait la logique du système. Mais il ne correspond pas à la manière dont nous rencontrons réellement la pétrochimie.

Nous ne croisons pas de l'éthylène dans une cuisine. Nous croisons une bouteille. Nous ne portons pas du paraxylène. Nous portons une chemise.

Nous ne roulons pas sur du styrène, du butadiène et du noir de carbone séparés.

Nous roulons sur un pneu.

Le consommateur voit donc le dernier niveau d'une chaîne dont presque toutes les étapes intermédiaires ont disparu.

Ce chapitre va faire le chemin inverse.

Nous partirons de cinq objets ou familles d'objets ordinaires. À chaque fois, nous remonterons autant que possible vers les matériaux, les intermédiaires, les molécules plateformes et les matières premières. L'objectif n'est pas de retrouver « le pétrole » derrière tout ce qui existe. Ce serait faux et intellectuellement pauvre. Un pneu contient de l'acier et du caoutchouc naturel. Un détergent peut employer des tensioactifs d'origine pétrochimique ou oléochimique. Une bouteille comprend aussi bouchon, pigments, étiquette, adhésifs et traitements dont les filières peuvent différer.

La question sera plus précise :

quelles fonctions de l'objet sont assurées par quelles matières, et quelle architecture industrielle a rendu ces matières disponibles ?

Cette méthode permet de comprendre pourquoi un objet simple peut dépendre de plusieurs branches pétrochimiques simultanément.

Une bouteille en PET : deux arbres moléculaires qui convergent

Prenons une bouteille transparente destinée à une boisson. Sa paroi peut être faite de polyéthylène téréphtalate, PET.

Sa généalogie moléculaire est désormais acquise : le PTA vient du paraxylène, l'éthylène glycol de l'éthylène, et leur condensation forme le polymère.^{1 2} Nous n'avons donc pas besoin de refaire ici les chapitres 4 et 5.

La question propre à l'objet commence après cette convergence : pourquoi ce polymère convient-il à une bouteille, comment le transforme-t-on en récipient, quels autres matériaux lui sont assemblés et que devient cet assemblage en fin de vie ?

Pourquoi le PET est utile pour une bouteille

Le choix du PET ne s'explique pas par sa seule disponibilité. Une bouteille doit satisfaire plusieurs fonctions en même temps. Elle doit être suffisamment légère pour être transportée à faible coût.

Elle doit être assez résistante pour supporter manutention, empilage et pression interne lorsqu'elle contient une boisson gazeuse.

Elle doit présenter une transparence acceptable pour de nombreux usages.

Elle doit limiter suffisamment les échanges de gaz ou de vapeur d'eau pour préserver le contenu pendant la durée prévue.

Elle doit pouvoir être transformée très rapidement sur des lignes industrielles.

Et son coût doit rester compatible avec un emballage produit à des volumes immenses.

Le PET satisfait un compromis particulier entre ces propriétés.

Cela explique pourquoi remplacer le matériau exige davantage que trouver « quelque chose de biodégradable » ou « quelque chose sans pétrole ».

Le substitut doit remplir la fonction d'emballage avec des performances comparables ou conduire à changer le système lui-même : réemploi, consigne, autre format, réduction de durée de stockage, modification de la logistique.

La matière et l'organisation de l'usage sont donc liées.

De la résine à la bouteille : le polymère doit encore être mis en forme

Même lorsque la résine PET existe, la bouteille n'existe pas encore.

La résine est transformée en préformes, petits objets épais dont la forme rappelle un tube à essai avec un col déjà fini.

Ces préformes sont ensuite réchauffées puis étirées et soufflées dans un moule.

Le matériau subit alors une orientation moléculaire qui contribue à ses propriétés mécaniques et barrières.

L'objet final est donc le résultat de trois niveaux successifs :

produire les monomères ;

produire le polymère ;

organiser physiquement ce polymère par le procédé de mise en forme.

Cette troisième étape est souvent oubliée lorsque l'on parle de substitution.

Deux matériaux chimiquement capables de former un récipient ne sont pas nécessairement compatibles avec les mêmes équipements, cadences, températures et géométries.

Changer de matière peut donc obliger à changer aussi les machines.

Le bouchon n'est pas la bouteille

Une bouteille PET illustre aussi le danger du langage courant.

Nous disons « une bouteille en plastique », comme si un seul polymère constituait tout l'objet.

Le bouchon est fréquemment réalisé en polyéthylène haute densité ou en polypropylène. L'étiquette peut utiliser un autre polymère ou du papier. Les encres, adhésifs et revêtements suivent encore d'autres filières. Ainsi, même un emballage apparemment homogène peut combiner plusieurs arbres pétrochimiques. Cette hétérogénéité influence directement le recyclage.

Recycler le PET exige d'identifier, collecter, trier, laver et préparer une matière dont les autres composants ne doivent pas compromettre la qualité du flux.

L'objet a été conçu comme assemblage.

Sa fin de vie doit le désassembler matériellement ou accepter une certaine contamination.

Le recyclage commence donc par un problème de conception.

Le même PET devient un textile

Quittons la bouteille et prenons une veste en polyester.

La surprise est que nous retrouvons la même grande famille chimique.

Le polyester commercial le plus important est le PET. Le Department of Energy rappelle que le PET peut être utilisé sous différentes formes, notamment comme fibre, film ou résine, et qu'il est produit à

partir d'éthylène glycol et d'acide téréphtalique ou de son ester diméthylrique.²

La généalogie moléculaire du textile et de la bouteille peut donc être très proche.

Ce qui change est largement la manière dont le polymère est préparé et mis en forme.

Pour fabriquer une fibre, le polymère fondu peut être extrudé à travers de minuscules orifices formant des filaments.

Ces filaments sont refroidis, étirés et orientés.

Ils peuvent ensuite être texturés, assemblés en fils, tissés ou tricotés.

Le matériau final acquiert des propriétés que sa seule formule chimique ne permettait pas de déduire.

Une bouteille et un textile peuvent donc partager un polymère sans partager une fonction.

La structure chimique compte.

L'organisation physique compte aussi.

Une fibre n'est jamais seulement une molécule longue

Dans une fibre textile, la résistance dépend notamment de la longueur des chaînes, de leur orientation, de leur cristallinité et des traitements subis.

Le procédé d'étirage aligne davantage les macromolécules dans la direction de la fibre.

Cette orientation modifie les propriétés mécaniques.

Les opérations suivantes ajoutent encore d'autres fonctions : couleur, toucher, résistance aux UV, antistatique, hydrophilie ou facilité d'entretien selon les formulations.

Le textile final peut également mélanger plusieurs fibres. Un tissu polyester-coton associe une fibre synthétique à une fibre

cellulosique. Un vêtement extensible peut ajouter un faible pourcentage d'élasthanne. Une membrane ou un enduit peuvent encore introduire d'autres polymères. La pétrochimie ne produit donc pas « le vêtement ».

Elle produit certaines briques matérielles dont l'industrie textile organise ensuite les propriétés.

Bouteille et textile : même polymère, fin de vie différente

Cette comparaison devient particulièrement importante lorsqu'on parle de circularité.

Une bouteille en PET est un objet relativement massif, souvent composé d'un corps principal identifiable, et elle entre dans des systèmes de collecte spécialement conçus dans certains pays.

Une fibre textile est dispersée dans un objet souple, parfois mélangée à d'autres fibres, teintée, enduite et assemblée avec des accessoires.

Le même polymère peut donc être beaucoup plus simple à récupérer dans une application que dans une autre.

La recyclabilité n'est pas seulement une propriété chimique.

Elle dépend de la forme de l'objet, de sa composition, de la possibilité de le collecter, de le trier et de séparer ses constituants.

Le mot « PET recyclable » ne décrit donc pas entièrement la réalité.

Il faut demander : recyclable sous quelle forme, dans quel système, avec quel niveau de contamination et pour quel débouché ?

Le pneu : l'objet qui détruit l'idée d'un matériau unique

Un pneu paraît être en caoutchouc.

C'est à peu près aussi précis que de dire qu'un ordinateur est en métal.

Un pneu moderne est un assemblage complexe de matériaux conçus pour fournir simultanément adhérence, résistance à l'abrasion,

souplesse, rigidité locale, résistance à la fatigue, maintien de la pression et cohésion structurelle.

Un document technique de la NHTSA donne, pour des formulations représentatives, des mélanges comprenant caoutchouc naturel, copolymère styrène-butadiène, polybutadiène, noir de carbone, soufre, oxyde de zinc, huiles de procédé, accélérateurs et antioxydants.³ L'industrie du pneu rappelle également que les pneumatiques combinent caoutchouc naturel et synthétique, acier, textiles, noir de carbone, silice et divers additifs.⁴

Le pneu ne possède donc pas une généalogie.

Il en possède plusieurs.

Le caoutchouc styrène-butadiène relie deux branches pétrochimiques

L'un des élastomères synthétiques majeurs des pneumatiques est le SBR, caoutchouc styrène-butadiène. Il réunit deux lignées déjà connues : le styrène, à l'intersection benzène-éthylène, et le butadiène, récupérable notamment dans la fraction C₄ du vapocraquage de charges lourdes.

La NHTSA donne, dans une formulation représentative de bande de roulement, un SBR d'environ 25 % de styrène et 75 % de butadiène associé à du polybutadiène.³ La valeur de cet exemple n'est pas de fixer une recette universelle, mais de montrer que le pneu utilise la copolymérisation et le mélange d'élastomères pour ajuster plusieurs propriétés simultanément.

Le polybutadiène : un autre enfant des C4

Le butadiène peut également être polymérisé sans styrène pour produire du polybutadiène.

Ce matériau possède une très bonne résilience et une faible génération de chaleur, ce qui le rend utile dans certaines parties des pneumatiques.

Les formulations de la NHTSA illustrent justement l'association possible du SBR et du cis-polybutadiène dans des bandes de roulement ou flancs.³

Le choix ne se fait pas entre deux matières dont l'une serait « meilleure ».

Les formulateurs combinent plusieurs élastomères parce que chaque propriété optimale peut entrer en conflit avec une autre.

Améliorer l'adhérence peut affecter l'usure. Modifier la rigidité peut affecter le confort. Réduire la résistance au roulement peut influencer d'autres performances. Le pneu est ainsi un compromis multivariable solidifié.

Le noir de carbone : une matière pétrochimique sans être un polymère

Une grande partie du pneu est constituée de charges.

Le noir de carbone en est l'exemple classique.

Il est produit industriellement à partir de matières hydrocarbonées par décomposition thermique ou combustion incomplète contrôlée. Un rapport technique de l'industrie du pneu décrit l'emploi d'huiles hydrocarbonées comme charges de procédés de type fourneaux noirs et souligne le rôle du noir de carbone dans le renforcement des mélanges de caoutchouc.⁵

Le noir de carbone n'est pas un monomère. Il ne devient pas une chaîne polymère. Il est incorporé comme particules solides dans la matrice élastomère.

Son rôle révèle une autre dimension de la pétrochimie : l'objet final dépend non seulement des polymères mais de leur formulation.

Un élastomère pur peut être inutilisable tel quel.

Les charges renforçantes, huiles, antioxydants, agents de vulcanisation et promoteurs d'adhésion transforment ses performances.

La chimie du matériau final est donc celle d'un composite.

Le soufre crée le réseau élastique

Le caoutchouc non vulcanisé n'a pas encore toutes les propriétés attendues d'un pneu.

Lors de la vulcanisation, des ponts sont créés entre certaines chaînes polymères, historiquement et très souvent à l'aide de soufre et d'un système d'accélérateurs.

La NHTSA décrit des formulations comportant soufre, oxyde de zinc, acide stéarique et accélérateurs, puis une vulcanisation en moule chauffé.³

Le matériau passe alors d'un ensemble de chaînes capables de glisser largement les unes par rapport aux autres à un réseau réticulé.

Cette réticulation permet au pneu de se déformer puis de retrouver sa forme.

Elle complique aussi sa fin de vie.

Un thermoplastique comme le PET peut être fondu dans certaines conditions.

Un caoutchouc vulcanisé ne se comporte pas de la même manière : les ponts chimiques empêchent une simple refusion vers son état initial.

Une propriété essentielle en usage devient une contrainte au recyclage.

C'est l'un des conflits fondamentaux de l'ingénierie des matériaux.

La mousse polyuréthane : fabriquer un matériau en fabriquant aussi du vide

Prenons maintenant un coussin de canapé ou un panneau d'isolation.

Nous entrons dans l'univers des polyuréthanes.

Un polyuréthane est produit par réaction entre un polyol et un diisocyanate ou polyisocyanate, avec des catalyseurs et d'autres additifs adaptés à la formulation. L'American Chemistry Council décrit cette réaction comme la base commune permettant de produire un très large éventail de polyuréthanes.⁶

Deux grandes familles de diisocyanates apparaissent fréquemment :

TDI, toluène diisocyanate ;

MDI, méthylène diphényl diisocyanate.

Le TDI est particulièrement associé aux mousses souples de literie et de mobilier.

Le MDI est très utilisé dans les mousses rigides d'isolation, mais également dans divers revêtements, adhésifs, élastomères et autres polyuréthanes.⁷

Une mousse possède pourtant une propriété qui ne vient pas seulement de sa chimie.

Une grande partie de son volume est du gaz.

D'où vient le MDI ?

Le MDI illustre la contribution aromatique à certaines mousses : sa filière conventionnelle remonte au benzène par nitrobenzène puis aniline, avant les étapes menant au MDA puis au MDI.⁸

Cette généalogie a déjà été préparée au chapitre 5. Ce qui importe ici est sa fonction dans l'objet : le diisocyanate apporte une moitié du système réactif qui formera le réseau polyuréthane.

D'où vient le polyol ?

L'autre moitié vient des polyols. Beaucoup de polyéther-polyols conventionnels utilisent des oxydes d'alkylène, notamment l'oxyde de propylène et, selon les formulations, l'oxyde d'éthylène.

La mousse réunit donc des lignées aromatiques et oléfiniques déjà établies. Sa spécificité n'est pas cette généalogie elle-même, mais ce

qui se passe lors de la formulation, réaction et génération de cellules gazeuses construisent un matériau dont une grande partie du volume est du gaz.

Pourquoi une mousse est légère

Pour former une mousse, il faut créer des cellules gazeuses dans la matière en cours de polymérisation.

Selon la formulation, cela peut impliquer des agents gonflants physiques ou des réactions générant un gaz.

Dans les mousses de polyuréthane, la réaction de certains isocyanates avec l'eau peut produire du dioxyde de carbone, contribuant au gonflement. D'autres agents gonflants peuvent être employés selon les applications.

Le matériau se solidifie autour de ces cellules.

Une mousse rigide destinée à l'isolation cherche à emprisonner un gaz dans une structure qui résiste à l'effondrement et limite les transferts thermiques.

Une mousse souple de coussin doit au contraire se comprimer et retrouver sa forme de manière répétée.

Le même mot « mousse » recouvre donc des architectures cellulaires et des formulations très différentes.

Une propriété macroscopique — légèreté, souplesse, isolation — naît de la combinaison entre chimie du polymère et structure des cellules.

Le détergent : quand la fonction n'est plus de faire un solide

Le dernier objet de notre enquête semble encore plus éloigné des polymères. Prenons une lessive ou un liquide vaisselle. Sa fonction principale n'est pas de former une structure durable. Elle est de modifier les interactions entre eau, surfaces et salissures.

Un détergent fini associe généralement plusieurs familles d'ingrédients : tensioactifs, agents de formulation, séquestrants, enzymes, parfums et autres composants selon le produit.

La fonction centrale du tensioactif vient d'une architecture moléculaire particulière : une partie de la molécule interagit favorablement avec l'eau tandis qu'une autre interagit davantage avec les huiles et matières hydrophobes.

La molécule peut ainsi réduire la tension interfaciale, mouiller les surfaces et participer à la dispersion des graisses.

Ici, la pétrochimie ne fabrique plus un objet solide.

Elle fabrique une fonction interfaciale.

Le linear alkylbenzene : benzène plus longue chaîne carbonée

L'une des grandes familles historiques et actuelles de tensioactifs anioniques est celle des linear alkylbenzene sulfonates, LAS.

Le précurseur est le linear alkylbenzene, LAB.

L'EPA décrit le LAB comme une matière première majeure pour la production des LAS utilisés dans les détergents. Le procédé industriel associe un noyau benzénique à une chaîne alkyle linéaire, historiquement et industriellement issue de paraffines ou d'oléfines à chaîne relativement longue.⁹

La structure combine donc deux caractères. Le noyau benzénique fournit une plateforme aromatique. La longue chaîne hydrocarbonée apporte une forte partie hydrophobe. Après sulfonation puis neutralisation, un groupe fortement hydrophile est ajouté. La molécule devient amphiphile.

La chaîne peut être résumée ainsi :

benzène + chaîne alkyle linéaire → LAB → sulfonation → LAS

Nous retrouvons le benzène, mais dans une fonction totalement différente de celle du styrène ou du nylon.

Pourquoi la chaîne doit être linéaire

L'histoire des alkylbenzènes montre que la structure moléculaire peut avoir des conséquences environnementales directement observables.

Les premiers alkylbenzène sulfonates largement utilisés possédaient des chaînes fortement ramifiées.

Ces structures étaient beaucoup moins facilement biodégradées dans les systèmes de traitement des eaux de l'époque.

Le développement de linear alkylbenzene sulfonates a amélioré fortement la biodégradabilité par rapport à ces anciens tensioactifs ramifiés. L'EPA documente cette transition historique et l'usage étendu du LAS dans les produits de lessive.^{9 10}

La différence n'est pas « pétrochimique contre naturel ».

Elle se situe ici entre deux architectures moléculaires issues de chimies proches.

La forme de la chaîne influence la manière dont les microorganismes peuvent dégrader la molécule.

Cette histoire constitue un exemple important de correction technologique réelle : une propriété problématique a été reliée à une structure chimique, puis la structure a été modifiée.

Cela ne rend pas tout impact nul.

Cela montre qu'une catégorie générale comme « détergent pétrochimique » est trop grossière pour expliquer le comportement environnemental.

Le détergent montre aussi que la pétrochimie n'a pas le monopole

Tous les tensioactifs ne sont pas produits à partir de matières premières fossiles.

Des chaînes grasses issues d'huiles végétales ou de graisses peuvent fournir des alcools et autres intermédiaires utilisés dans des tensioactifs.

Une revue d'inventaire environnemental référencée par l'EPA compare précisément des tensioactifs de qualité détergente provenant de filières pétrochimiques et oléochimiques.¹¹

Cette coexistence nous oblige à abandonner une fausse opposition.

Une même fonction chimique peut parfois être obtenue à partir de sources de carbone différentes.

Mais changer la source ne suffit pas à comparer les impacts.

Il faut examiner énergie, cultures, usage des sols, rendement, transport, toxicité des procédés, biodégradabilité et performance à l'usage.

Le chapitre sur la transition reviendra sur cette question.

Pour le moment, le détergent nous montre qu'une molécule fonctionnelle peut être plus facilement dissociée de l'origine fossile de son carbone qu'un système industriel entier ne peut être transformé d'un seul geste.

Cinq objets, cinq manières différentes d'être pétrochimiques

Les cinq cas examinés ne racontent pas la même histoire.

La bouteille en PET est dominée par un polymère identifiable issu de deux grandes branches.

Le textile polyester utilise souvent la même chimie, mais sous une organisation physique et une fin de vie différentes.

Le pneu est un composite multimatériel dans lequel polymères, charges, acier, textile et agents de vulcanisation coopèrent.

La mousse polyuréthane se forme par réaction entre deux familles de précurseurs et tire une partie essentielle de sa fonction de sa structure cellulaire.

Le détergent peut ne contenir aucun grand polymère structural : sa fonction vient de molécules tensioactives conçues pour agir aux interfaces.

Il serait donc faux de demander : « quelle est la matière de la pétrochimie ? »

Il n'y en a pas une.

La pétrochimie fournit des monomères, polymères, élastomères, solvants, tensioactifs, charges, adhésifs, résines et intermédiaires.

Elle est moins une matière qu'un ensemble de capacités de transformation.

L'objet final cache la géographie industrielle

Aucun de ces objets n'exige que toute sa chaîne soit située au même endroit.

Le paraxylène peut être produit près d'une raffinerie ou d'un complexe aromatique.

Le PTA peut être fabriqué dans une autre région.

L'éthylène glycol peut provenir d'un autre complexe encore.

La résine PET peut être polymérisée près d'un marché textile ou d'emballage.

La bouteille peut être soufflée près du lieu de remplissage.

Le pneu combine des matières provenant de plusieurs continents : caoutchouc naturel, caoutchoucs synthétiques, acier, noir de carbone, silice, textiles et additifs.

La chaîne moléculaire devient donc une chaîne logistique mondiale.

Ce déplacement est essentiel pour comprendre les risques de rupture, les avantages géographiques et l'économie du secteur.

Une molécule chimiquement banale peut devenir stratégique si seules quelques régions disposent des capacités nécessaires pour la produire à grande échelle.

L'objet final cache aussi l'énergie incorporée

Lorsque nous tenons une bouteille ou touchons une mousse, nous ne voyons pas les températures et pressions qui ont précédé l'objet.

Nous ne voyons pas le four de vapocraquage. Nous ne voyons pas la compression cryogénique. Nous ne voyons pas l'oxydation du paraxylène. Nous ne voyons pas la polymérisation. Nous ne voyons pas les séchages, distillations, pompages et transports.

Une partie de l'énergie consommée dans la chaîne n'est donc pas présente comme énergie utilisable dans l'objet.

Elle a servi à construire sa structure, purifier ses intermédiaires et organiser sa matière.

C'est ce que l'on cherche à capturer, avec différentes conventions, lorsque l'on parle d'énergie incorporée ou d'empreinte de production.

Cette invisibilité explique pourquoi remplacer un produit par un autre exige une analyse de chaîne.

L'objet le plus léger dans la main n'est pas nécessairement celui qui a demandé le moins d'énergie à produire.

L'objet biosourcé n'est pas automatiquement celui qui a la plus faible empreinte globale.

L'objet recyclable n'est pas nécessairement recyclé.

La propriété visible ne suffit pas à établir le bilan.

Remonter la chaîne transforme la question de la nécessité

Une fois les généalogies reconstruites, une question normative peut être posée avec davantage de précision.

Avons-nous besoin du matériau ? Ou avons-nous besoin de la fonction ? Nous n'avons pas besoin de PET en soi.

Nous avons besoin, selon les cas, de transporter une boisson, contenir un liquide, fabriquer une fibre ou protéger un produit.

Nous n'avons pas besoin de polyuréthane en soi.

Nous avons besoin d'isolation, de confort, d'adhésion, d'amortissement ou de résistance mécanique.

Nous n'avons pas besoin de SBR en soi.

Nous avons besoin d'un pneu capable de transmettre des forces, adhérer, résister à l'usure et fonctionner sur une large plage de conditions.

Cette distinction ne rend pas les matériaux interchangeables. Elle permet simplement d'ouvrir correctement le problème. Si une fonction peut être supprimée, la matière disparaît avec elle.

Si la fonction reste nécessaire mais peut être fournie avec moins de matière, l'optimisation change.

Si un autre matériau remplit mieux l'ensemble des fonctions, une substitution devient possible.

Si aucune alternative ne reproduit le compromis de propriétés sans créer de coûts supérieurs ailleurs, la réduction de l'usage peut être plus réaliste que le remplacement complet.

La généalogie moléculaire devient alors un outil de décision.

De l'objet au complexe, puis du complexe à la société

Les cinq enquêtes de ce chapitre permettent maintenant de franchir une étape.

Nous savons comment un objet ordinaire peut condenser plusieurs branches pétrochimiques.

Mais nous n'avons pas encore expliqué pourquoi certaines régions produisent ces molécules à très grande échelle, pourquoi les

installations sont regroupées en complexes, pourquoi les capacités se comptent en centaines de milliers ou millions de tonnes, ni pourquoi un écart relativement faible de coût de matière première ou d'énergie peut déplacer les investissements entre continents.

C'est la fonction du chapitre suivant.

Nous passerons de la généalogie de l'objet à l'économie de l'infrastructure.

Nous verrons comment circulent les flux entre raffinerie, vapocraqueur, unités d'aromatiques et polymérisation.

Nous examinerons les économies d'échelle, les matières premières, l'énergie, les pipelines, les ports, la logistique et les cycles de marché.

La question ne sera plus seulement :

comment cette matière est-elle fabriquée ?

Elle deviendra :

pourquoi est-elle fabriquée ici, à cette échelle, et pourquoi ce système est-il si difficile à déplacer ?

Notes

1. NAPCOR, « Polyethylene Terephthalate (PET) Melt and Solid Phase Resin Production », analyse de cycle de vie : la résine PET étudiée est fabriquée par estérification du PTA avec l'éthylène glycol, suivie des étapes de polymérisation.
<https://napcor.com/wp-content/uploads/2020/05/Final-Revised-Virgin-PET-Resin-LCA.pdf>

2. U.S. Department of Energy, Energy and Environmental Profile of the U.S. Chemical Industry, chapitre consacré notamment aux polyesters : le PET est produit à partir d'éthylène glycol et d'acide téréphtalique ou DMT, et peut être utilisé comme fibre, film ou résine.

https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/chemicals/pdfs/profile_chap2.pdf

3. National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 810 561, The Pneumatic Tire : exemples de formulations de pneus comprenant caoutchouc naturel, SBR, polybutadiène, noir de carbone, soufre, oxyde de zinc, huiles et additifs ; exemple de SBR à environ 25/75 styrène/butadiène dans une formulation représentative.

https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/pneumatictire_hs-810-561.pdf

4. U.S. Tire Manufacturers Association, documents techniques sur la composition des pneus : présence de caoutchoucs naturels et synthétiques, acier, textiles, noir de carbone, silice et autres constituants selon les formulations.
https://www.ustires.org/sites/default/files/PRO-011_Assessment_of_Markets_for_Fiber_and_Steel_Produced_From_Recycling_Waste_Tires.pdf

5. U.S. Tire Manufacturers Association, « Scrap Tire — A Resource and Technology Evaluation » : description historique et technique de la production de noir de carbone à partir de charges hydrocarbonées et de son rôle de renforcement dans les composés de pneus.
https://www.ustires.org/sites/default/files/GEN-037_-_Scrap_Tires_A_Resource_And_Technology_Evaluation_of_Tire_Pyrolysis_and_Other_Selected_Alternate_Technologies.pdf

6. American Chemistry Council, Center for the Polyurethanes Industry, « Applications & Benefits » : les polyuréthanes sont formés par réaction d'un polyol avec un diisocyanate ou polyisocyanate en présence de catalyseurs et additifs.
<https://www.americanchemistry.com/industry-groups/center-for-the-polyurethanes-industry-cpi/applications-benefits>

7. American Chemistry Council, « Diisocyanates Overview » : TDI associé notamment aux mousses souples ; MDI associé notamment aux mousses rigides d'isolation et à diverses applications CASE.

<https://www.americanchemistry.com/industry-groups/diisocyanates-dii/diisocyanates-overview>

8. American Chemistry Council, « Cradle-to-Gate Life-Cycle Analysis of Methylene Diphenyl Diisocyanate Resin Precursor », annexe sur la fabrication du MDI : chaîne benzène → nitrobenzène → aniline → MDA/MDI, avec formaldéhyde et phosgène parmi les intermédiaires/intrants du procédé conventionnel. <https://www.americanchemistry.com/content/download/11831/file/Cradle-to-Gate-Life-Cycle-Analysis-of-Methylene-Diphenyl-Diisocyanate-Resin-Precursor.pdf>

9. U.S. Environmental Protection Agency, LOCATING AND ESTIMATING AIR EMISSIONS FROM SOURCES OF BENZENE, section « Linear Alkylbenzene Production » : le LAB est destiné principalement à la production de LAS pour les détergents ; le procédé associe chaînes C10-C14 et benzène par alkylation. https://www3.epa.gov/ttnchie1/le/benzene_pt1.pdf

10. U.S. Environmental Protection Agency, rapport sur les dérivés d'alkylbenzène : transition des alkylbenzènes ramifiés vers les linear alkylbenzene sulfonates en raison de leur meilleure biodégradabilité. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100J6HI.TXT>

11. U.S. Environmental Protection Agency HERO, Pittinger et al., « Environmental life-cycle inventory of detergent-grade surfactant sourcing and production », Journal of the American Oil Chemists' Society, 1993 : comparaison de filières de tensioactifs pétrochimiques et oléochimiques. <https://hero.epa.gov/reference/2076819/>

PARTIE III — Une industrie puissante sous contraintes

Chapitre 7 — Comment fonctionne et survit l'industrie pétrochimique

Complexes intégrés, économies d'échelle, matières premières, énergie, logistique et cycles de marché

Nous savons maintenant suivre la matière.

Nous savons d'où viennent les charges, comment elles sont transformées en molécules plateformes, comment ces plateformes deviennent polymères ou molécules fonctionnelles, et comment plusieurs branches se rejoignent dans des objets ordinaires.

Une question reste pourtant ouverte. Pourquoi cette industrie prend-elle la forme qu'elle prend ? Pourquoi les vapocraqueurs sont-ils gigantesques ?

Pourquoi sont-ils souvent entourés d'unités de polyéthylène, d'oxyde d'éthylène, de styrène ou de butadiène ?

Pourquoi les complexes pétrochimiques s'installent-ils près de raffineries, de bassins gaziers, de ports ou de grands réseaux de pipelines ?

Pourquoi une région peut-elle fermer des unités techniquement fonctionnelles alors qu'une autre construit simultanément de nouvelles capacités ?

La réponse ne tient pas à une seule loi économique.

Elle vient de l'interaction entre la chimie, la géographie, l'énergie, la logistique, les marchés et l'échelle des investissements.

L'industrie pétrochimique ne survit pas parce qu'elle sait fabriquer des molécules.

Elle survit parce qu'elle sait fabriquer certaines molécules au bon coût, en continu, à très grande échelle, avec des débouchés suffisamment profonds pour absorber sa production.

C'est cette architecture économique que nous allons reconstruire.

Le complexe pétrochimique : un réseau de flux plutôt qu'une usine unique

Un complexe pétrochimique n'est pas simplement une grande usine.

C'est un ensemble d'unités reliées par des flux de matière, d'énergie et parfois de services communs.

Une raffinerie peut fournir du naphtha. Un vapocraqueur peut fournir éthylène, propylène, fractions C4 et essence de pyrolyse. Une unité d'aromatiques peut extraire benzène, toluène et xylènes. Une unité de polyéthylène consomme l'éthylène. Une unité de styrène peut consommer benzène et éthylène. Une unité d'oxyde de propylène consomme du propylène. Une unité de butadiène récupère une fraction issue du craquage.

Ces liens réduisent les besoins de transport intermédiaire et permettent parfois de valoriser des flux qui auraient moins de valeur pris isolément.

L'intégration existe aussi pour l'énergie. La chaleur récupérée dans une unité peut produire de la vapeur. L'hydrogène produit par le reformage peut alimenter des unités d'hydrotraitement.

Des réseaux communs distribuent vapeur, eau industrielle, électricité, air comprimé, azote et parfois oxygène.

Le complexe devient donc un métabolisme industriel.

Sa performance dépend autant des échanges entre organes que des performances individuelles de chaque organe.

Pourquoi regrouper les unités

Le regroupement réduit plusieurs coûts en même temps.

Le premier est logistique.

L'éthylène est une molécule légère dont le transport exige des conditions adaptées. Le produire à côté d'une unité de polyéthylène

ou d'oxyde d'éthylène évite de déplacer de grands volumes sur de longues distances.

Le deuxième est énergétique.

La vapeur et la chaleur ont une valeur locale forte mais voyagent mal sur de très longues distances. Une implantation concentrée permet de mutualiser certaines utilités et de récupérer des flux thermiques.

Le troisième est le coût des infrastructures.

Un port, un terminal, un réseau de stockage ou un pipeline peuvent desservir plusieurs unités.

Le quatrième est la flexibilité de valorisation.

Un coproduit peut trouver un utilisateur voisin au lieu d'être vendu sur un marché lointain ou brûlé comme combustible.

Cette proximité ne supprime pas tous les risques.

Elle peut au contraire créer des dépendances.

Une panne dans une unité amont peut priver plusieurs usines aval de matière première.

Un arrêt de maintenance dans un vapocraqueur peut affecter tout le complexe.

L'intégration économise donc des coûts tout en augmentant l'interdépendance.

L'échelle : pourquoi construire si grand

Les installations pétrochimiques exigent des équipements lourds : fours, compresseurs, colonnes de distillation, échangeurs, réacteurs, réservoirs, systèmes de sécurité et infrastructures de traitement.

Beaucoup de ces coûts n'augmentent pas proportionnellement à la capacité.

Un compresseur deux fois plus puissant ne coûte pas nécessairement deux fois plus cher.

Une colonne plus grande peut traiter beaucoup plus de matière sans que chaque mètre supplémentaire reproduise tout l'investissement initial.

Cette relation crée des économies d'échelle.

Lorsque la capacité augmente, le coût d'investissement par tonne produite peut diminuer jusqu'à certaines limites.

Les coûts fixes d'exploitation — contrôle, laboratoire, maintenance, services généraux — sont eux aussi répartis sur davantage de tonnes.

Cette logique pousse l'industrie vers de grandes unités.

Mais elle crée aussi un risque.

Une grande unité doit être alimentée en continu et vendre un volume immense.

Les économies d'échelle n'ont de valeur que si le marché absorbe la production.

Une usine gigantesque sous-utilisée peut devenir moins compétitive qu'une unité plus petite fonctionnant proche de sa capacité nominale.

Le taux d'utilisation : l'indicateur silencieux

Une unité pétrochimique est conçue pour fonctionner longtemps et de manière continue.

Ses coûts fixes restent élevés même lorsqu'elle réduit sa production.

Lorsque le taux d'utilisation baisse, ces coûts doivent être répartis sur moins de tonnes.

Les marges se contractent donc rapidement lorsque de nombreuses capacités fonctionnent très en dessous de leur niveau normal.

En Europe, S&P Global estimait en 2024 que les vapocraqueurs d'éthylène fonctionnaient autour de 70 à 75 % de leur capacité alors que le secteur cherchait historiquement plutôt des taux dans les 80 à 90 % ou davantage.¹

Ce type d'écart peut paraître faible.

Il ne l'est pas.

Quelques points de taux d'utilisation peuvent faire la différence entre une installation qui couvre ses coûts et une installation structurellement déficitaire.

Le taux d'utilisation devient donc un signal synthétique de l'équilibre entre capacité installée et demande réelle.

La matière première décide d'une grande partie du coût

Dans les procédés de commodités pétrochimiques, la charge représente souvent une part majeure du coût de production.

Pour l'éthylène, l'éthane et le naphta offrent un exemple particulièrement clair.

L'Energy Information Administration compare explicitement les coûts nets de ces deux charges dans ses hypothèses de modélisation industrielle : elle tient compte de la quantité de charge nécessaire pour produire une tonne d'éthylène et retranche la valeur des coproduits.²

Cette correction est essentielle.

Un vapocraqueur de naphta consomme une charge plus coûteuse par tonne d'éthylène, mais il produit davantage de propylène, C4, essence de pyrolyse et autres coproduits commercialisables.

Un vapocraqueur d'éthane produit beaucoup moins de ces coproduits, mais peut bénéficier d'un coût de charge plus faible et d'une forte sélectivité vers l'éthylène.

Comparer seulement le prix de l'éthane et du naphta serait donc incomplet.

Il faut comparer le coût net du portefeuille obtenu.

L'avantage de l'éthane américain

L'essor du gaz de schiste aux États-Unis a profondément modifié la géographie de l'éthylène.

L'augmentation de la production d'éthane a donné aux producteurs américains accès à une charge abondante et, pendant de longues périodes, relativement bon marché.

L'EIA souligne que les rendements élevés en éthylène de l'éthane et ses avantages de coût face au naphta ont soutenu la hausse des exportations américaines d'éthane et de pétrochimiques dérivés.³

En 2024, la consommation américaine d'éthane a atteint un record, l'éthane étant utilisé presque exclusivement comme charge pétrochimique pour fabriquer de l'éthylène.⁴

Cette situation crée un avantage géographique.

Une usine américaine et une usine européenne peuvent produire exactement la même molécule d'éthylène.

Mais elles ne partent pas nécessairement de la même charge ni du même coût.

La formule chimique du produit final ne supprime donc pas la géographie économique de sa production.

Le naphta européen et asiatique : plus de coproduits, plus de vulnérabilité au pétrole

Les vapocraqueurs européens et asiatiques utilisent historiquement beaucoup de naphta. Cette charge donne accès à un portefeuille plus riche de coproduits. Mais son prix est fortement lié au marché pétrolier.

Lorsque le prix du naphta augmente alors que les prix des polymères ou des dérivés aval restent faibles, la marge du vapocraqueur peut se contracter brutalement.

S&P Global a documenté à plusieurs reprises ce mécanisme en Asie et en Europe : des hausses du coût du naphta ont conduit des opérateurs à réduire leurs taux d'utilisation lorsque les marges aval ne permettaient plus d'absorber le choc.⁵

La compétitivité d'un vapocraqueur n'est donc pas stable.

Elle dépend de relations de prix qui peuvent changer rapidement.

Un actif très performant technologiquement peut devenir temporairement non rentable si sa charge augmente plus vite que ses produits.

L'énergie : deuxième géographie cachée

La matière première ne suffit pas à expliquer les écarts de compétitivité. La pétrochimie consomme aussi beaucoup d'énergie. Il faut chauffer les fours. Comprimer les gaz. Produire du froid. Faire fonctionner les pompes. Produire de la vapeur. Séparer, distiller, sécher et parfois hydrogéner.

L'Agence internationale de l'énergie souligne que les coûts énergétiques restent déterminants pour la compétitivité des industries amont comme la chimie et que l'accès à une énergie bon marché peut modifier fortement la localisation de la production.⁶

La crise énergétique européenne de 2022 a rendu ce mécanisme très visible.

Lorsque gaz et électricité deviennent durablement plus chers dans une région que dans une autre, les coûts de production de nombreux intermédiaires chimiques augmentent.

L'écart peut alors se transformer en avantage structurel pour les régions disposant de charges et d'énergie moins coûteuses.

Le pipeline : une infrastructure économique avant d'être un tube

Les molécules pétrochimiques circulent entre unités. Certaines peuvent voyager par navire, rail ou camion. D'autres sont particulièrement bien adaptées aux pipelines. Un pipeline réduit les coûts de manutention et permet un approvisionnement continu.

Il rend possible un réseau d'unités qui fonctionnent presque comme une seule installation répartie sur un territoire.

Le Gulf Coast américain illustre fortement cette logique.

Les capacités d'éthane, d'éthylène et d'autres liquides y sont reliées par un tissu dense de pipelines, de cavernes de stockage et de terminaux.

La valeur d'un site ne vient donc pas seulement de son terrain ou de sa proximité avec une ressource.

Elle vient du réseau auquel il est connecté.

Un nouvel entrant installé dans un cluster mature peut accéder à des services et à des marchés intermédiaires qu'il serait extrêmement coûteux de recréer seul.

L'infrastructure crée ainsi un avantage cumulatif.

Le stockage : acheter du temps

Une industrie en continu a besoin de découpler partiellement la production et la consommation.

Le stockage remplit cette fonction.

Un vapocraqueur peut continuer à produire même si une unité aval connaît un arrêt temporaire, à condition qu'un stockage intermédiaire suffisant existe.

Inversement, une usine aval peut continuer à fonctionner pendant une interruption courte d'un fournisseur amont.

Les hydrocarbures légers peuvent être stockés sous pression, réfrigérés ou, dans certaines régions, dans des cavernes souterraines adaptées.

Les liquides aromatiques sont plus simples à stocker en réservoirs conventionnels, avec les exigences de sécurité correspondantes.

Le stockage n'élimine pas les déséquilibres.

Il les retarde.

Il donne du temps pour absorber les fluctuations de production, les maintenances, les variations logistiques et les changements de marché.

Dans un système fortement intégré, cette capacité à acheter du temps peut avoir une valeur économique majeure.

Le port : connecter le complexe au monde

Les complexes côtiers disposent d'un autre avantage. Ils peuvent importer des charges et exporter des produits à grande échelle. Un terminal maritime transforme une installation locale en nœud du commerce mondial. L'éthane américain en fournit un exemple.

Les exportations ont fortement augmenté à partir de 2014, soutenues par la disponibilité domestique et par le développement de terminaux et de navires capables de transporter cette matière première vers des craqueurs étrangers.³

Les polymères voyagent eux aussi.

Des granulés de polyéthylène ou de polypropylène peuvent être exportés dans des conteneurs ou des flux en vrac adaptés.

Les aromatiques et autres intermédiaires peuvent circuler par navires chimiques.

La proximité portuaire permet donc de dissocier partiellement le lieu de production du lieu de consommation.

Une usine peut être construite là où la charge et l'énergie sont compétitives, puis servir des marchés éloignés.

Pourquoi les clusters attirent encore de nouvelles usines

Lorsqu'un cluster existe déjà, il attire de nouveaux investissements. Le mécanisme ressemble à une boucle. Les premiers producteurs justifient des pipelines, terminaux, stockages et services. Ces infrastructures réduisent ensuite le coût d'entrée pour les producteurs suivants.

La présence de fournisseurs spécialisés, de sociétés de maintenance, de laboratoires, d'ingénieries et de personnel expérimenté réduit encore certains coûts.

Les débouchés locaux pour les coproduits deviennent plus nombreux. Le cluster gagne donc en densité. Cette logique explique pourquoi certaines régions restent dominantes pendant des décennies. Une ressource naturelle peut lancer un cluster. Mais l'infrastructure accumulée peut ensuite devenir un avantage autonome.

La distance économique n'est pas la distance géographique

Une usine éloignée physiquement peut être économiquement proche si elle dispose d'un port performant et de flux maritimes réguliers.

À l'inverse, deux usines situées à quelques dizaines de kilomètres peuvent être économiquement éloignées si aucun pipeline, terminal ou contrat ne relie leurs flux.

La géographie industrielle n'est donc pas une simple carte de distances. Elle est une carte de coûts de connexion. Un pipeline réduit la distance économique. Un port réduit la distance économique. Un stockage réduit la dépendance temporelle. Un accord de fourniture à long terme réduit l'incertitude commerciale. Ces infrastructures invisibles déterminent souvent la compétitivité autant que le réacteur lui-même.

Les cycles : pourquoi une industrie peut construire trop

La pétrochimie est une industrie cyclique. Le mécanisme de base est simple. Lorsque les marges sont fortes, les producteurs investissent. Mais construire un grand vapocraqueur ou un complexe intégré prend des années. Pendant ce temps, d'autres entreprises prennent la même décision.

Lorsque plusieurs projets arrivent simultanément sur le marché, la capacité peut augmenter plus vite que la demande.

Les taux d'utilisation baissent. Les marges se contractent. Les investissements ralentissent.

Puis, avec le temps, la croissance de la demande et les fermetures d'unités anciennes peuvent rétablir l'équilibre.

Ce cycle est amplifié par la taille des projets.

Une seule nouvelle unité peut ajouter une capacité très importante à un marché régional.

L'investissement est donc discontinu alors que la demande évolue plus progressivement.

La surcapacité : lorsque la bonne usine devient la mauvaise usine

Une usine peut être technologiquement moderne et néanmoins devenir économiquement fragile.

C'est ce qui arrive lorsque la capacité régionale dépasse durablement la demande rentable.

L'Europe a connu depuis 2024 et 2025 une vague de fermetures ou d'annonces de fermeture de vapocraqueurs et d'unités aval.

S&P Global relie explicitement ces décisions à plusieurs facteurs : coûts élevés de matières premières et d'énergie, concurrence de régions moins chères, surcapacité mondiale et demande faible.⁷

Le problème n'est donc pas toujours qu'une usine soit obsolète.

Elle peut simplement être située au mauvais endroit dans le nouvel ordre des coûts.

Cette distinction est cruciale.

La fermeture d'un actif ne prouve pas l'échec de sa technologie.

Elle peut prouver l'échec de son économie relative.

Le produit aval décide parfois du sort de l'amont

Un vapocraqueur vend rarement seulement de l'éthylène à un marché abstrait.

Une grande partie de sa production alimente des unités aval : polyéthylène, oxyde d'éthylène, styrène et autres dérivés.

Si les polymères sont en surproduction et que leurs prix chutent, les producteurs aval réduisent leurs achats d'éthylène.

La demande du vapocraqueur baisse.

Le vapocraqueur peut alors réduire son taux d'utilisation, même si sa propre marge apparente sur l'éthylène reste acceptable.

S&P Global a décrit ce mécanisme en Asie : les mauvaises marges du polyéthylène, du styrène et de l'éthylène glycol ont conduit à limiter les taux de fonctionnement des craqueurs.⁸

Le marché amont et le marché aval sont donc couplés.

La molécule plateforme n'a de valeur que si quelqu'un peut vendre ce qu'elle permet de produire.

Les coproduits : richesse ou contrainte

Le naphta produit davantage de coproduits que l'éthane.

Cette diversité peut être une force.

Le propylène, les C4, le benzène contenu dans l'essence de pyrolyse et d'autres flux possèdent une valeur.

Mais elle peut devenir une faiblesse si leurs marchés sont saturés.

Un vapocraqueur ne peut pas choisir librement de produire beaucoup d'éthylène sans produire les autres molécules imposées par sa charge et sa sévérité.

La valeur nette du craquage dépend donc d'un panier de prix. Lorsque certains coproduits sont chers, le naphta devient plus compétitif. Lorsqu'ils sont faibles, son avantage se réduit. La chimie impose un portefeuille. Le marché en fixe la valeur.

Les contrats : réduire l'incertitude dans une industrie lourde

Les investissements pétrochimiques se comptent en milliards et sont conçus pour fonctionner pendant plusieurs décennies.

Une telle durée est incompatible avec une dépendance complète au marché spot.

Les producteurs cherchent donc souvent à sécuriser une partie de leurs flux par des contrats à long terme.

Un fournisseur d'éthane peut garantir des volumes.

Un producteur d'éthylène peut avoir des contrats de fourniture avec des unités aval.

Des mécanismes de prix indexés peuvent répartir le risque entre vendeur et acheteur.

Ces contrats ne suppriment pas la volatilité.

Ils la redistribuent.

Ils peuvent protéger une usine contre une rupture de matière première ou un effondrement temporaire de liquidité sur le marché.

Mais ils peuvent aussi enfermer un acteur dans une formule de prix défavorable si les conditions de marché changent.

La finance du complexe est donc une autre forme d'intégration.

Le coût marginal et le prix : pourquoi les producteurs ne gagnent pas tous la même chose

Dans un marché de commodité, le prix est fortement influencé par le coût des producteurs nécessaires pour satisfaire la demande.

Les producteurs les moins chers peuvent alors dégager une marge plus élevée. Les producteurs situés près du coût marginal du marché gagnent peu. Les producteurs plus chers peuvent réduire leurs taux ou fermer.

Cette logique explique pourquoi un avantage de charge peut devenir une rente économique importante.

Si l'éthane américain est nettement moins cher que le naphta européen, l'usine américaine peut continuer à être rentable à un prix d'éthylène qui met l'usine européenne sous pression.

La technologie n'a pas besoin d'être supérieure.

Le coût d'entrée suffit parfois.

C'est aussi pourquoi un changement du prix du gaz, du pétrole ou du fret peut déplacer rapidement l'avantage relatif.

Le commerce mondial aplatit les marchés sans les rendre identiques

Le commerce permet aux régions excédentaires d'exporter. Mais il ne supprime pas toutes les différences de prix. Le transport coûte de l'argent. Certains produits sont plus faciles à déplacer que d'autres. Les polymères solides sont relativement simples à exporter. L'éthylène liquide nécessite une logistique cryogénique spécialisée. L'éthane nécessite lui aussi des navires et terminaux adaptés.

Les marchés peuvent donc être mondiaux pour certaines molécules et beaucoup plus régionaux pour d'autres.

Cette différence affecte la vitesse à laquelle une surcapacité dans une région se transmet aux autres.

Un excédent de polyéthylène peut rapidement chercher des débouchés à l'export.

Un excédent local d'éthylène sans infrastructure adaptée est plus difficile à déplacer.

La mondialisation pétrochimique n'efface pas la physique.

La Chine : croissance, intégration et changement d'échelle

Une grande partie de la nouvelle capacité pétrochimique mondiale des dernières années a été construite en Chine.

Le mouvement ne consiste pas seulement à ajouter des vapocraqueurs.

Il comprend des complexes intégrés raffinage-pétrochimie capables de transformer une part importante du brut directement vers des molécules chimiques plutôt que vers des carburants.

Cette intégration modifie la concurrence mondiale. Elle ajoute des volumes importants de paraxylène, oléfines et polymères. Elle réduit certaines dépendances aux importations chinoises.

Elle augmente simultanément la pression exportatrice lorsque la capacité dépasse la demande domestique.

L'Agence internationale de l'énergie souligne que la croissance récente de la demande pétrochimique mondiale est très concentrée en Chine et que les matières premières pétrochimiques restent l'un des principaux moteurs de la demande pétrolière.⁹

La géographie de la pétrochimie suit donc désormais autant la demande asiatique que les anciennes régions productrices de pétrole.

Le Moyen-Orient : transformer une ressource en industrie

Le Moyen-Orient offre une autre logique.

Les pays producteurs d'hydrocarbures ont longtemps exporté du pétrole et du gaz bruts ou raffinés.

Le développement pétrochimique permet de transformer une partie de ces ressources en produits à plus forte valeur ajoutée.

Une charge compétitive, notamment l'éthane dans certains pays, peut soutenir des complexes d'éthylène et de polyéthylène tournés vers l'export.

Le port devient alors aussi important que le gisement. L'objectif n'est plus seulement d'extraire une ressource. Il est de conserver davantage d'étapes de transformation sur le territoire. La pétrochimie devient ainsi une politique industrielle.

L'Europe : l'héritage industriel face à un nouvel ordre des coûts

L'Europe possède des clusters pétrochimiques anciens, techniquement sophistiqués et fortement intégrés. Leur problème n'est donc pas l'absence de savoir-faire. Il est de plus en plus celui du coût relatif. Une partie du parc est dépendante du naphta.

L'énergie y a été durablement plus chère qu'aux États-Unis après la crise du gaz.

Les sites peuvent être plus anciens et parfois plus petits que les nouveaux complexes construits ailleurs.

La concurrence de polymères importés ou de nouvelles capacités asiatiques et américaines exerce une pression supplémentaire.

S&P Global décrit précisément cette combinaison de coûts élevés, faibles marges et surcapacité comme moteur des rationalisations européennes depuis 2024-2025.⁷

L'Europe illustre donc une vérité inconfortable.

Une région peut posséder les compétences, les infrastructures et les marchés, mais perdre une partie de sa production si ses coûts structurels deviennent trop élevés.

L'usine survit si elle appartient à un système viable

Nous pouvons maintenant répondre à la question du titre. Une usine pétrochimique ne survit pas seulement parce que son réacteur fonctionne. Elle survit si plusieurs conditions restent simultanément vraies. Sa charge doit être disponible à un coût acceptable. L'énergie doit rester compétitive. Ses unités doivent fonctionner à un taux d'utilisation suffisant. Ses coproduits doivent trouver des débouchés. Ses infrastructures doivent permettre stockage et transport. Ses clients aval doivent rester solvables. Ses équipements doivent rester fiables. Son coût du capital doit être supportable.

Et son environnement réglementaire doit rester compatible avec l'exploitation ou la transformation du site.

La compétitivité est donc systémique. Une faiblesse dans un seul élément peut parfois être compensée. Plusieurs faiblesses simultanées peuvent condamner un actif.

Pourquoi cette économie rend la transition difficile

Le caractère systémique de la pétrochimie explique une partie de son inertie. Remplacer une molécule n'est jamais seulement remplacer une réaction. Une nouvelle route doit disposer d'une matière première. Elle doit être énergétiquement viable. Elle doit être construite à une échelle suffisante. Elle doit se connecter aux unités aval. Elle doit disposer de stockage et de transport. Elle doit trouver des clients.

Et elle doit rivaliser avec une infrastructure fossile dont une grande partie de l'investissement a déjà été amortie.

Cette dernière différence est décisive.

Une usine nouvelle supporte le coût complet de son capital.

Une usine ancienne peut continuer à fonctionner même si elle ne justifierait plus aujourd'hui un investissement neuf.

La transition oppose donc parfois une technologie propre à construire à une technologie fossile déjà payée.

La comparaison des coûts n'est pas symétrique.

Le prochain problème : transformer sans déplacer les dommages

La logique économique ne suffit pourtant pas à décider ce qui doit être maintenu.

Une industrie peut être rentable et produire des dommages importants.

Elle peut aussi être socialement utile tout en ayant une empreinte qu'il faut réduire.

Le dernier chapitre devra donc réunir les deux dimensions que nous avons jusqu'ici volontairement séparées.

D'un côté :

la fonction technique et économique de la pétrochimie.

De l'autre :

ses risques, ses émissions, ses déchets et les limites physiques des stratégies proposées pour les réduire.

Nous examinerons accidents, toxicité, pollution locale, climat, recyclage, circularité, électrification, biomasse, carbone recyclé et substitution.

La question ne sera pas :

La question ne sera pas de savoir comment sauver l'industrie pétrochimique telle qu'elle existe.

Elle ne sera pas non plus de savoir comment la supprimer abstraitement.

Elle sera plus exigeante :

quelles fonctions doivent être conservées, lesquelles peuvent être réduites, et quelles transformations diminuent réellement les dommages sans simplement les déplacer ailleurs ?

Notes

1. S&P Global Commodity Insights, « European petrochemical margins face grim outlook amid overcapacity », 20 mai 2024 : taux d'utilisation des vapocraqueurs européens autour de 70–75 % contre des niveaux historiquement plus proches de 80–90 % ou davantage. <https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/crud-e-oil/052024-european-petrochemical-margins-face-grim-outlook-amid-overcapacity>
2. U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2025, Industrial Demand Module Assumptions : comparaison des coûts nets de charge éthane/naphta pour produire l'éthylène en retranchant la valeur des coproduits. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/IDM_Assumptions.pdf
3. U.S. Energy Information Administration, « U.S. exports of ethane and ethane-based petrochemicals rose 135% from 2014 to 2023 », 2024 : avantage de coût de l'éthane, exportations et développement de nouvelles infrastructures. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=63604>
4. U.S. Energy Information Administration, « U.S. ethane production, consumption, and exports set new records in 2024 », 2025 : consommation américaine record d'éthane et usage presque exclusif comme charge pétrochimique vers l'éthylène. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=64785>
5. S&P Global Commodity Insights, « High costs, lower margins to weigh on Japan's steam cracker operations », 29 mars 2022 : impact du coût du naphta et des marges aval sur les taux de fonctionnement des craqueurs asiatiques. <https://www.spglobal.com/energy/en/news->

research/latest-news/chemicals/032922-high-costs-lower-margins-to-weigh-on-japans-steam-cracker-operations-in-april

6. International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2026, Executive Summary : importance critique des coûts énergétiques dans la compétitivité des industries amont, notamment chimiques, et avantage procuré par l'accès à des ressources énergétiques moins coûteuses. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2026/executive-summary>

7. S&P Global Commodity Insights, « A Perfect Storm? Europe's steam cracker closures highlight continent's struggles with competitiveness », 7 juillet 2025 : fermetures européennes attribuées aux coûts de charge et d'énergie, aux importations compétitives, à la surcapacité et à la faiblesse de la demande. <https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/chemicals/070725-a-perfect-storm-europes-steam-cracker-closures-highlight-continents-struggles-with-competitiveness>

8. S&P Global Commodity Insights, « Naphtha-fed steam cracker runs remain curbed despite high ethylene margins », 6 septembre 2022 : les faibles marges du polyéthylène, du styrène et de l'éthylène glycol peuvent limiter les taux de fonctionnement des craqueurs. <https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/chemicals/090622-naphtha-fed-steam-cracker-runs-remain-curbed-despite-high-ethylene-margins>

9. International Energy Agency, Global Energy Review 2025 et Oil Market Report 2026 : croissance de la demande pétrochimique concentrée en Chine et rôle croissant des matières premières pétrochimiques dans la demande pétrolière mondiale. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/oil> ; <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-february-2026>

Chapitre 8 — Peut-on transformer la pétrochimie ?

Risques, pollution, climat, déchets, circularité et voies de transition

Nous arrivons au point où une connaissance technique devient insuffisante.

Nous savons désormais ce que la pétrochimie fait, comment elle le fait, pourquoi ses complexes sont gigantesques et pourquoi leurs coûts dépendent de la géographie des charges, de l'énergie et des infrastructures.

Mais une industrie ne se juge pas seulement à sa capacité à fonctionner.

Il faut aussi demander ce qu'elle détruit, ce qu'elle expose, ce qu'elle émet, ce qu'elle abandonne comme déchets et ce qu'il serait réellement possible de transformer.

La difficulté est que plusieurs problèmes sont souvent empilés sous un seul mot.

« Pollution » peut désigner une fuite chronique de molécules toxiques autour d'un site, un accident majeur, un rejet de microplastiques, des émissions de gaz à effet de serre ou un déchet abandonné dans un cours d'eau.

« Décarboner » peut désigner électrifier un four, remplacer le gaz par de l'hydrogène, capter du CO₂ ou modifier l'origine du carbone incorporé dans le produit.

« Recycler » peut désigner broyer et refondre un polymère, le dissoudre, le dépolymériser en monomères ou le pyrolyser en mélange d'hydrocarbures.

Ces opérations ne remplissent pas la même fonction.

Le premier devoir de ce chapitre est donc de séparer les problèmes avant de comparer les solutions.

Danger, exposition, risque : trois mots qu'il faut dissocier

Une molécule peut posséder un danger intrinsèque sans que toute situation où elle intervient produise le même risque.

Le benzène est cancérogène pour l'être humain. L'oxyde d'éthylène est également un agent cancérogène reconnu. Cette qualification porte sur le danger de la substance.

Le risque réel dépend ensuite de la dose, de la voie d'exposition, de la durée, de la fréquence et des dispositifs qui séparent les personnes de la source.

Cette distinction permet d'éviter deux erreurs.

La première consisterait à banaliser le danger sous prétexte que l'industrie contrôle l'exposition.

La seconde consisterait à supposer qu'un produit final hérite automatiquement du danger de tous les intermédiaires qui ont servi à le fabriquer.

Une bouteille PET ne devient pas cancérogène simplement parce que sa chaîne amont utilise des intermédiaires dangereux.

Mais les travailleurs, riverains et écosystèmes peuvent subir des risques réels si ces intermédiaires sont mal contenus, mal transportés ou mal traités.

L'évaluation doit donc suivre le cycle de production, pas seulement l'objet final.

Le site pétrochimique comme concentration de dangers

Un complexe pétrochimique concentre de grandes quantités de substances inflammables, réactives, corrosives ou toxiques.

Cette concentration crée un risque d'accident majeur.

Une perte de confinement peut conduire à un incendie, une explosion, un nuage toxique ou plusieurs de ces phénomènes successivement.

La prévention ne repose donc pas uniquement sur les équipements visibles.

Elle repose sur plusieurs couches : choix des matériaux, systèmes instrumentés de sécurité, soupapes, détection, procédures opératoires, formation, maintenance, inspections, gestion des changements et préparation d'urgence.

La sécurité de procédé est une propriété du système.

Une installation bien conçue peut devenir dangereuse si sa maintenance est dégradée.

Une procédure rigoureuse peut devenir inutile si un capteur critique ne fonctionne plus.

Une réduction des accidents exige donc une discipline organisationnelle continue, pas un équipement miracle.

Pollution locale : ce qui ne se voit pas dans le bilan carbone

Les émissions climatiques ne doivent pas effacer les pollutions locales.

Une installation pétrochimique peut émettre des composés organiques volatils, des oxydes d'azote, des particules et d'autres polluants selon ses procédés.

Les fuites fugitives provenant de vannes, pompes, brides, compresseurs ou réservoirs peuvent devenir significatives lorsqu'elles sont multipliées par des milliers de composants.

L'EPA a renforcé en 2024 des exigences visant des installations produisant notamment éthylène, oxyde d'éthylène et autres produits chimiques organiques, avec l'objectif de réduire l'exposition à plusieurs polluants atmosphériques dangereux.¹

Cette situation rappelle une règle générale.

Une industrie peut réduire ses émissions de CO₂ tout en maintenant un problème de toxicité locale.

Électrifier un four ne supprime pas automatiquement les fuites de benzène.

Capter du CO₂ ne retire pas nécessairement les composés organiques volatils.

Il faut donc conserver plusieurs indicateurs.

Le climat : énergie fossile et carbone fossile

La pétrochimie contribue au changement climatique par deux grandes voies.

La première est énergétique.

Les fours, chaudières, compresseurs, pompes et séparations consomment de grandes quantités d'énergie, encore largement fournie par des combustibles fossiles dans de nombreux sites.

La seconde est matérielle.

Le carbone fossile incorporé dans les produits peut finir par retourner vers l'atmosphère lors de l'incinération, de la combustion accidentelle, de certains traitements ou de la dégradation de certains flux.

Le Department of Energy souligne précisément que l'industrie chimique dépend fortement des ressources fossiles à la fois comme matières premières et comme énergie.²

Ces deux dépendances doivent être distinguées.

Une usine peut utiliser de l'électricité bas-carbone tout en incorporant du carbone fossile dans ses polymères.

Une usine peut utiliser une matière première biogénique tout en brûlant du gaz fossile pour chauffer ses fours.

La transformation complète exige donc de traiter l'énergie et le carbone matière.

Électrifier le chauffage : une solution réelle, mais ciblée

Le vapocraquage exige un apport thermique très intense.

Traditionnellement, cette chaleur provient de brûleurs alimentés par gaz ou combustibles issus du complexe.

Une voie de décarbonation consiste à fournir cette énergie par électricité.

L'électrification peut prendre plusieurs formes : résistive, induction, chauffage direct adapté, pompes à chaleur pour les niveaux de température compatibles, ou stockage thermique couplé à l'électricité.

Le Department of Energy finance déjà des projets visant l'électrification de la production de vapeur et du chauffage industriel dans le secteur chimique.³

Le bénéfice climatique dépend cependant du mix électrique.

Électrifier avec une électricité très carbonée peut déplacer les émissions plutôt que les supprimer.

L'électrification exige aussi un réseau électrique capable d'alimenter des puissances industrielles considérables avec une disponibilité élevée.

La bonne question n'est donc pas « peut-on électrifier ? »

Elle est : quelles opérations peuvent être électrifiées, avec quelle technologie, quelle électricité et quelle infrastructure réseau ?

L'hydrogène : combustible, matière première ou détour

L'hydrogène apparaît souvent dans les scénarios de transition industrielle.

Il peut être brûlé dans certains équipements pour remplacer un combustible fossile.

Il peut aussi être une matière première, notamment dans les procédés de raffinage, d'hydrogénation ou de synthèse.

Mais l'hydrogène n'est pas une source primaire d'énergie.

Il doit être produit.

Si sa production repose sur du gaz naturel sans captage, une partie importante des émissions reste en amont.

Si elle repose sur électrolyse, son avantage climatique dépend de l'électricité consommée.

Le Department of Energy traite d'ailleurs l'hydrogène avec gestion du carbone comme une voie distincte au sein de sa stratégie de carbon management.⁴

L'hydrogène peut donc être utile.

Il ne doit pas être traité comme un synonyme de décarbonation.

Capter le CO₂ : réduire une émission sans changer toute la chaîne

Le captage du carbone vise à empêcher une partie du CO₂ formé dans un procédé ou une combustion d'atteindre l'atmosphère.

Cette stratégie peut être pertinente pour certaines sources concentrées.

Elle peut aussi compléter l'hydrogène produit à partir de gaz naturel ou certains procédés où une émission de CO₂ est difficile à éviter.

Mais le captage ne modifie pas automatiquement l'origine du carbone incorporé dans le produit.

Il ne corrige pas non plus la pollution plastique en fin de vie.

Le Department of Energy présente explicitement le carbon management comme un complément, non comme un remplacement des efforts d'efficacité, d'électrification et de déploiement d'autres technologies bas-carbone.⁴

Cela fournit un bon critère.

Une technologie doit être évaluée sur la fonction exacte qu'elle remplit.

Le captage peut réduire une émission de CO₂.

Il ne rend pas circulaire un polymère jetable.

Le plastique : un problème de flux matériel, pas seulement de matériau

La pollution plastique ne vient pas uniquement de la chimie du polymère.

Elle vient aussi des volumes, des durées d'usage et des systèmes de collecte.

L'OCDE estimait qu'en 2019 seuls 9 % des déchets plastiques mondiaux avaient été effectivement recyclés après prise en compte des pertes, tandis qu'environ 19 % étaient incinérés, près de 50 % mis en décharge et 22 % mal gérés ou rejetés dans l'environnement.⁵

Le problème est donc systémique.

Une bouteille théoriquement recyclable peut devenir un déchet si aucun système ne la collecte.

Un emballage techniquement difficile à recycler peut rester circulaire s'il est réutilisé de nombreuses fois dans un système fermé.

Une matière très durable peut être utile dans un bâtiment pendant cinquante ans et problématique dans un emballage jeté après dix minutes.

La durée de vie change le jugement.

Les microplastiques : quand le déchet n'a pas besoin d'être un objet entier

La fuite plastique ne se limite pas aux bouteilles abandonnées.

Des particules peuvent être libérées par abrasion de pneus, lavage de textiles synthétiques, usure de peintures et fragmentation progressive des déchets.

L'OCDE estimait qu'en 2019 les microplastiques représentaient environ 12 % des fuites plastiques mondiales, avec des sources telles que l'usure des pneus et le lavage des textiles.⁶

Cette forme de pollution pose un problème particulier.

Elle ne peut pas être résolue uniquement par le recyclage en fin de vie.

Une partie du matériau est perdue pendant l'usage.

La réduction exige alors d'agir sur la formulation, la durabilité, les systèmes de capture, les modes d'usage ou la substitution de certaines fonctions.

Les additifs : le polymère n'est pas toute la matière

Un plastique commercial contient souvent autre chose que son polymère principal.

Des pigments, plastifiants, stabilisants, retardateurs de flamme, charges, agents antistatiques ou autres additifs peuvent être nécessaires à la fonction.

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement souligne que des substances préoccupantes peuvent être libérées tout au long du cycle de vie des plastiques, depuis la production jusqu'à l'usage et la fin de vie.⁷

Cette complexité affecte aussi la circularité.

Un flux de polymère théoriquement recyclable peut devenir difficile à recycler lorsqu'il contient des additifs incompatibles ou des substances qui ne doivent pas être réintroduites dans certains usages.

Recycler la masse ne suffit donc pas.

Il faut aussi connaître sa composition chimique.

Réduire avant de recycler

La hiérarchie la plus robuste commence par une question simple.

La fonction doit-elle exister sous cette forme ?

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement recommande précisément de commencer par réduire les usages plastiques problématiques ou inutiles, puis de développer réemploi, réorientation et recyclage.⁸

Cette priorité est logique.

Un produit non fabriqué ne nécessite ni matière première, ni polymérisation, ni collecte, ni recyclage.

La réduction ne signifie cependant pas supprimer aveuglément tous les usages.

Un emballage peut éviter une perte alimentaire importante.

Une isolation peut économiser davantage d'énergie pendant sa durée de vie qu'elle n'en a exigé à la production.

La réduction doit donc viser les usages dont la fonction peut être supprimée, condensée ou fournie avec moins de matière sans déplacer davantage de dommages ailleurs.

Réemploi : conserver l'objet plutôt que reconstruire la matière

Le réemploi agit à un autre niveau.

Au lieu de détruire l'objet pour récupérer sa matière, il cherche à conserver l'objet ou une partie majeure de sa fonction.

Une bouteille réemployée plusieurs fois évite plusieurs cycles de fabrication.

Un conteneur industriel consigné peut circuler entre producteurs et clients.

Cette stratégie est souvent plus efficace matériellement que le recyclage, mais elle exige une logistique différente : collecte, lavage, inspection, standardisation et retour.

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement place le réemploi parmi les changements majeurs nécessaires à une économie plus circulaire des plastiques.⁸

Le réemploi n'est donc pas une propriété du matériau.

C'est une propriété du système de distribution.

Recyclage mécanique : la voie la plus directe quand elle fonctionne

Le recyclage mécanique conserve essentiellement la structure chimique du polymère.

Les déchets sont collectés, triés, nettoyés, broyés, fondus et transformés en granulés ou produits nouveaux.

Le Joint Research Centre rappelle que cette voie constitue aujourd'hui la majorité du recyclage des plastiques.⁹

Son principal avantage est de ne pas devoir reconstruire chimiquement le polymère à partir de petites molécules.

Lorsqu'un flux est propre, bien trié et compatible, l'énergie nécessaire peut être nettement inférieure à celle d'une dépolymérisation complète puis d'une repolymérisation.

Mais le procédé a des limites. La contamination dégrade la qualité. Certains polymères se dégradent thermiquement ou mécaniquement au fil des cycles. Les mélanges incompatibles peuvent produire des matériaux médiocres. Les pigments et additifs limitent certains débouchés.

Le recyclage mécanique est donc particulièrement performant lorsque l'objet a été conçu pour produire un flux propre.

Le cas PET : pourquoi certaines boucles sont plus faciles

Les bouteilles PET transparentes représentent l'un des exemples les plus favorables. Le polymère est identifiable. La collecte peut être ciblée. Les systèmes de consigne peuvent produire un flux relativement propre.

La réglementation européenne reconnaît d'ailleurs le recyclage mécanique du PET comme une technologie établie pour certains matériaux destinés au contact alimentaire, sous des exigences de collecte, tri et décontamination.¹⁰

Cette réussite ne doit pas être généralisée à tous les plastiques.

Un emballage multicouche, un textile mélangé ou un composite thermodurcissable pose des problèmes très différents.

Le mot « plastique » masque donc aussi les écarts de recyclabilité.

Recyclage chimique : une famille de procédés, pas une technologie unique

Le recyclage chimique peut désigner plusieurs opérations.

La dépolymérisation cherche à revenir vers des monomères ou intermédiaires relativement définis.

La solvolysé utilise un solvant ou réactif pour casser certaines liaisons du polymère.

La pyrolyse chauffe des déchets en absence d'oxygène pour produire un mélange d'hydrocarbures.

La gazéification pousse plus loin la conversion vers des gaz de synthèse.

Le JRC définit précisément le recyclage chimique comme une famille de voies incluant dépolymérisation, procédés solvants, pyrolyse et gazéification.¹¹

Ces procédés ne sont pas interchangeables.

Dépolymériser du PET peut retrouver des intermédiaires relativement proches du polymère d'origine.

Pyrolyser un mélange de polyoléfines produit un mélange qui doit être raffiné et purifié avant de redevenir une charge pétrochimique.

Le niveau de reconstruction chimique diffère donc fortement.

Pourquoi le recyclage chimique n'est pas automatiquement supérieur

Le recyclage chimique attire parce qu'il semble capable de traiter des flux que le recyclage mécanique refuse.

Mais il consomme davantage d'énergie et produit souvent des rendements matière plus faibles.

La Commission européenne rappelle que le recyclage mécanique est généralement préféré lorsqu'il est possible parce qu'il est moins polluant et plus économe en énergie, tandis que le recyclage chimique peut devenir utile lorsque le mécanique n'est pas faisable ou que des exigences de qualité plus élevées l'imposent.¹²

Le JRC conclut également qu'aucune hiérarchie unique ne peut être établie entre toutes les voies de recyclage : la performance dépend du flux, de la technologie, de l'énergie et du produit substitué.¹³

Le bon critère n'est donc pas « chimique contre mécanique ».

Il est : quelle voie conserve le plus de valeur matérielle avec le moins d'impacts pour ce flux précis ?

Pyrolyser n'est pas refermer automatiquement la boucle

La pyrolyse transforme des polymères en un mélange d'hydrocarbures plus petits. Ce mélange peut être utilisé comme combustible. Il peut aussi, après traitement, devenir une charge chimique. Ces deux destinations ne sont pas équivalentes.

Si le produit est brûlé, le carbone retourne rapidement vers l'atmosphère et la boucle matérielle n'est pas refermée.

Si le produit est purifié puis réintroduit dans un vapocraqueur pour fabriquer de nouvelles molécules, une partie du carbone peut revenir vers de nouveaux polymères.

Mais chaque étape comporte des pertes.

Le rendement global matière doit donc être suivi jusqu'au nouveau produit, pas seulement jusqu'à l'huile de pyrolyse.

Appeler un procédé « recyclage » ne suffit pas à démontrer sa circularité réelle.

Matière biosourcée : remplacer l'origine du carbone

Une autre stratégie consiste à conserver certaines molécules mais changer l'origine de leur carbone.

L'éthanol fermentaire peut être déshydraté en éthylène.

Des huiles végétales, sucres, résidus lignocellulosiques ou autres ressources biologiques peuvent devenir des intermédiaires chimiques.

Cette voie peut réduire l'usage de carbone fossile. Mais elle ouvre d'autres contraintes. Les terres agricoles sont limitées. La biomasse peut avoir des usages alimentaires, énergétiques ou écologiques concurrents. La culture peut utiliser engrais, eau et énergie.

Les résidus ne sont pas entièrement disponibles sans fonction dans les sols ou les écosystèmes.

Le JRC estimait encore en 2022 que les plastiques biosourcés ne couvriraient qu'une très faible part des besoins plastiques de l'Union européenne.¹⁴

Le biosourcé peut contribuer.

Il ne constitue pas une matière première infinie.

Le CO₂ comme matière première : remonter une pente énergétique

Le dioxyde de carbone contient du carbone.

Il est donc tentant de l'imaginer comme une ressource universelle.

Mais le CO₂ est une molécule très oxydée et stable.

Transformer son carbone en méthanol, hydrocarbures ou polymères exige de lui fournir de l'énergie et généralement de l'hydrogène.

La question devient alors : d'où viennent cette énergie et cet hydrogène ?

Si l'électricité est bas-carbone et l'hydrogène produit avec de faibles émissions, certaines routes peuvent avoir un intérêt climatique.

Si l'énergie reste fossile, la conversion risque de déplacer ou même augmenter les émissions.

Utiliser le CO₂ comme matière première est donc une question de système énergétique, pas seulement de chimie.

Carbone recyclé et carbone circulaire : compter les atomes jusqu'au bout

Une économie circulaire du carbone cherche à réduire l'entrée de carbone fossile neuf en réutilisant davantage le carbone déjà mobilisé.

Ce carbone peut venir de déchets plastiques, de biomasse, de CO₂ capté ou d'autres flux.

Mais toute boucle comporte des pertes. Les déchets sont contaminés. Les procédés ne convertissent pas 100 % de la matière. Certains produits sont dispersés ou incinérés. Une partie du carbone finit inévitablement hors de la boucle.

La circularité totale est donc une limite idéale, pas une situation industrielle réaliste.

Une politique sérieuse doit mesurer le taux de retour réel du carbone vers des produits utiles.

Elle doit aussi éviter qu'un crédit comptable fasse passer une petite fraction recyclée pour une boucle complète.

Concevoir pour le recyclage : agir avant que le déchet existe

La fin de vie se décide souvent au moment de la conception.

Un emballage mono-matériau est généralement plus simple à trier qu'un assemblage multicouche indissociable.

Une étiquette compatible peut faciliter le recyclage d'une bouteille. Des pigments très sombres peuvent perturber certaines technologies de tri optique. Des additifs peuvent limiter les débouchés.

Le JRC travaille précisément sur des critères de design-for-recycling pour rendre les emballages plus compatibles avec des systèmes réels de collecte et de recyclage.¹⁵

Cette stratégie a un avantage conceptuel.

Elle ne demande pas au système de déchets de réparer une complexité créée en amont.

Elle réduit cette complexité à la source.

Réduire les substances préoccupantes pour rendre la circularité crédible

Une boucle circulaire peut concentrer un problème si elle recycle des substances que l'on souhaiterait éliminer.

C'est particulièrement important pour les additifs persistants ou toxiques.

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement souligne que la présence de substances préoccupantes dans les plastiques peut nuire à la santé, à l'environnement et à la circularité elle-même.⁷

Une politique de circularité doit donc être aussi une politique chimique.

Le but n'est pas de faire circuler éternellement n'importe quelle matière.

Il est de faire circuler des matières suffisamment sûres et traçables pour leurs usages futurs.

Substituer un matériau : comparer la fonction complète

Le remplacement d'un plastique par du verre, du métal, du papier ou un matériau biosourcé peut être pertinent.

Mais aucune substitution n'est universellement meilleure.

Le verre est lourd.

L'aluminium demande beaucoup d'énergie primaire mais se recycle efficacement lorsqu'il est récupéré.

Le papier possède d'autres contraintes de barrières, d'eau et de fibres.

Les polymères biosourcés peuvent réduire certaines pressions et en augmenter d'autres. La comparaison doit donc porter sur l'unité fonctionnelle. Pas « un kilogramme de matériau contre un kilogramme de matériau ».

Mais, par exemple :

contenir un litre de boisson pendant une durée donnée ;

isoler un mètre carré de bâtiment pendant cinquante ans ;

transporter une charge sur un certain nombre de kilomètres.

Sans cette unité fonctionnelle, l'analyse compare des objets qui ne rendent pas le même service.

Toutes les fonctions ne méritent pas la même priorité

Une seringue stérile à usage unique et un gadget promotionnel jetable peuvent tous deux être en plastique.

Cela ne signifie pas que leur nécessité soit équivalente.

Une politique de transition doit hiérarchiser.

Certains usages médicaux ou de sécurité peuvent être difficiles à substituer sans risques supérieurs.

Certains emballages peuvent prévenir des pertes alimentaires importantes.

D'autres usages existent surtout parce que la matière vierge est bon marché et que leur coût de fin de vie est externalisé.

Réduire intelligemment signifie donc distinguer les fonctions essentielles, les fonctions utiles mais optimisables et les usages évitables.

La chimie ne peut pas faire cette hiérarchie seule.

Elle devient une décision sociale.

Le paradoxe des installations déjà construites

Même lorsqu'une nouvelle technologie est meilleure, l'industrie existante ne disparaît pas instantanément.

Les complexes actuels représentent des investissements gigantesques.

Beaucoup sont déjà amortis.

Leur coût marginal peut rester faible même si leur remplacement par une nouvelle installation serait souhaitable à long terme.

Cette asymétrie explique une partie de l'inertie.

Une technologie bas-carbone neuve doit financer son capital.

Une technologie ancienne peut continuer à produire tant que ses revenus couvrent ses coûts d'exploitation et les dépenses nécessaires à sa maintenance.

Les politiques climatiques modifient précisément cet équilibre en donnant un coût aux émissions, en soutenant l'investissement ou en imposant des normes.

La transition est donc aussi une question de rythme de renouvellement du capital industriel.

Une transition crédible doit combiner plusieurs leviers

Aucun levier unique ne résout tous les problèmes du secteur.

L'électrification peut réduire les émissions énergétiques.

Le captage peut traiter certaines sources de CO₂.

Le recyclage mécanique peut préserver efficacement des polymères bien triés. Le recyclage chimique peut traiter certains flux plus complexes. Le réemploi peut supprimer des cycles de production entiers. Le design-for-recycling peut améliorer la qualité des flux. La substitution peut réduire certains usages fossiles.

La réduction de la demande peut supprimer les usages à faible valeur sociale.

La biomasse ou le CO₂ peuvent fournir du carbone non fossile dans certains cas.

La sécurité de procédé et le contrôle des émissions locales restent nécessaires quelle que soit l'origine du carbone.

Une stratégie crédible doit donc assembler ces leviers selon leur fonction.

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement insiste précisément sur cette approche de cycle de vie : le recyclage seul ne peut pas résoudre la pollution plastique.¹⁶

Ce qui peut être transformé rapidement, ce qui demande des décennies

Certaines améliorations peuvent être relativement rapides. Réduire une fuite. Changer un additif. Améliorer le tri. Standardiser un

emballage réemployable. Augmenter le contenu recyclé d'une application compatible. D'autres transformations sont beaucoup plus lentes. Remplacer un vapocraqueur. Construire des réseaux électriques industriels. Déployer une nouvelle chaîne de matière première. Modifier un cluster pétrochimique entier. Développer des capacités de recyclage chimique à grande échelle. La temporalité doit donc être intégrée à la stratégie. Une mesure de court terme ne doit pas bloquer une transformation structurelle.

Une vision de long terme ne doit pas servir d'excuse pour reporter des réductions disponibles immédiatement.

Ce que la pétrochimie doit encore prouver

La pétrochimie a démontré une chose sans ambiguïté.

Elle sait transformer un petit nombre de charges en une diversité extraordinaire de fonctions matérielles.

Ce qu'elle doit désormais démontrer est différent.

Elle doit prouver qu'elle peut maintenir les fonctions réellement utiles avec beaucoup moins de dépendance aux ressources fossiles vierges, moins d'émissions, moins de pollution toxique et moins de pertes de matière.

Cette preuve ne pourra pas être déclarée sur la base d'un projet pilote ou d'une promesse technologique.

Elle devra être mesurée à l'échelle des flux réels. Combien de matière vierge évitée ? Combien de carbone fossile remplacé ? Combien d'émissions nettes évitées ? Quel taux de recyclage réellement obtenu après pertes ? Quelle réduction des substances préoccupantes ? Quelle réduction des fuites dans l'environnement ?

Quelle fonction reste fournie au lecteur, au patient, au bâtiment ou à l'industrie ?

La transition devient ainsi un problème de comptabilité physique autant qu'un problème d'innovation.

Conclusion — De la molécule à la responsabilité

Au début de ce livre, nous avons changé notre regard sur le pétrole.

Nous avons cessé de le voir seulement comme un combustible pour le considérer comme une source de structures moléculaires.

Puis nous avons suivi ces structures.

Nous avons appris à distinguer pétrole brut, fractions, charges et plateformes.

Nous avons traversé les fours de vapocraquage, les colonnes de séparation et les reformeurs catalytiques.

Nous avons suivi l'éthylène, le propylène, le benzène, le toluène et les xylènes.

Nous avons retrouvé ces molécules dans une bouteille, un textile, un pneu, une mousse et un détergent.

Nous avons enfin compris pourquoi ces chaînes se concentrent dans de gigantesques complexes industriels.

Le dernier déplacement est celui de la responsabilité.

Comprendre une industrie ne conduit ni à l'absoudre ni à la condamner en bloc.

Cela permet de localiser les décisions. Certaines fonctions peuvent être supprimées. Certaines doivent être maintenues avec moins de matière. Certaines peuvent être réemployées. Certaines matières peuvent être recyclées efficacement. D'autres exigeront des technologies nouvelles. Certaines émissions peuvent être électrifiées ou captées. Certaines substances doivent être éliminées de la boucle plutôt que recyclées. Et certaines dépendances fossiles resteront difficiles à supprimer rapidement.

La pétrochimie n'est donc pas un bloc que l'on garde ou que l'on détruit.

C'est un système que l'on peut décomposer en fonctions, flux et contraintes.

C'est seulement à ce niveau qu'une transformation devient mesurable. Le pétrole avait d'abord été une source d'énergie. La pétrochimie en a fait une architecture de matière.

La prochaine étape consiste à apprendre à conserver les fonctions sans conserver nécessairement toute l'architecture qui les a produites.

Notes

1. U.S. Environmental Protection Agency, Final Amendments to the National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for the Synthetic Organic Chemical Manufacturing Industry and Polymers and Resins I, 2024 : nouvelles exigences visant notamment les émissions d'oxyde d'éthylène, chloroprène, benzène et autres polluants atmosphériques dangereux.
<https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/synthetic-organic-chemical-manufacturing-industry-and-group-i>

2. U.S. Department of Energy, « Chemicals Value Chain Decarbonization: Integrated Solutions for a Complex Challenge », 2024 : dépendance de l'industrie chimique aux ressources fossiles comme matière première et comme énergie.
<https://www.energy.gov/cmei/ito/articles/chemicals-value-chain-decarbonization-integrated-solutions-complex-challenge>

3. U.S. Department of Energy, projet de décarbonation de la production de vapeur par électrification et stockage thermochimique dans une usine chimique, 2024.
<https://www.energy.gov/nepa/articles/cx-031193-decarbonization-steam-generation-chemical-process-heating-through>

4. U.S. Department of Energy, « Carbon Management » : le carbon management est présenté comme complément à l'efficacité, aux renouvelables, au nucléaire, à l'hydrogène propre et aux autres technologies industrielles, non comme substitut.
<https://www.energy.gov/topics/carbon-management>

5. OCDE, Global Plastics Outlook, 2022 : en 2019, environ 9 % des déchets plastiques mondiaux ont été effectivement recyclés après pertes, 19 % incinérés, près de 50 % mis en décharge et 22 % mal gérés ou rejetés. https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html

6. OCDE, Global Plastics Outlook, 2022 : environ 22 Mt de plastiques ont fui dans l'environnement en 2019 ; les microplastiques représentaient environ 12 % des fuites, provenant notamment de l'abrasion des pneus et du lavage des textiles. https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html

7. Programme des Nations Unies pour l'environnement, Chemicals in Plastics: A Technical Report, 2023 : substances préoccupantes présentes ou associées aux plastiques, impacts potentiels sur santé, environnement et circularité tout au long du cycle de vie. <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report>

8. Programme des Nations Unies pour l'environnement, Turning off the Tap, 2023 : réduction des usages problématiques et inutiles, réemploi, réorientation/diversification et recyclage comme leviers complémentaires d'une transformation systémique. <https://www.unep.org/resources/turning-off-tap-end-plastic-pollution-create-circular-economy>

9. Joint Research Centre, « Plastics recycling », 2023 : le recyclage mécanique représente la majorité du recyclage des plastiques et comprend collecte, tri, broyage, nettoyage, fusion et production de nouveaux granulés. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC134499/JRC134499_01.pdf

10. Commission européenne, Plastic Recycling - Food Safety : le recyclage mécanique du PET est une technologie établie pour certaines applications de contact alimentaire sous conditions de prétraitement, décontamination et contrôle.

https://food.ec.europa.eu/food-safety/chemical-safety/food-contact-materials/plastic-recycling_en

11. Joint Research Centre, Plastics materials flows in the EU-27 and their environmental impacts, 2025 : définition des voies de recyclage chimique incluant dépolymérisation, procédés solvants, pyrolyse et gazéification.

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC142860>

12. Commission européenne, consultation sur les règles de contenu recyclé chimique, 2025 : recyclage mécanique généralement préféré pour son efficacité énergétique et son moindre impact ; recyclage chimique utile lorsque le mécanique n'est pas faisable ou que des exigences de qualité l'imposent.

https://environment.ec.europa.eu/news/commission-consults-new-rules-chemically-recycled-content-plastic-bottles-2025-07-08_en

13. Joint Research Centre, Environmental and economic assessment of plastic waste recycling and energy recovery pathways in the EU, 2025 : aucune hiérarchie unique entre recyclage mécanique, physique et chimique ; performance dépend du flux et de la technologie.

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC140954>

14. Joint Research Centre, Plastics materials flows in the EU-27 and their environmental impacts, 2025 : pour 2022, les plastiques biosourcés représentaient environ 1,1 % des besoins plastiques de l'UE-27.

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC142860>

15. Joint Research Centre, Design-for-Recycling for packaging : développement de critères techniques visant à améliorer la recyclabilité réelle des emballages. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities/circular-resource-management/design-recycling-packaging_en

16. Programme des Nations Unies pour l'environnement, approche cycle de vie de la pollution plastique : recyclage seul insuffisant ;

réduction, réemploi, conception et meilleure gestion des déchets doivent agir ensemble.

<https://www.unep.org/news-and-stories/story/what-life-cycle-approach-and-how-can-it-help-tackle-plastic-pollution>

Qu'est-ce que le mouvement noosophique ?

Le mouvement noosophique est un projet de recherche, de transmission et de transformation. Il cherche à mieux comprendre le réel, à relier des savoirs qui sont souvent étudiés séparément, à rendre accessibles les connaissances importantes et à transformer ces compréhensions en œuvres, pratiques, outils ou institutions pouvant être confrontés à leurs effets puis corrigés.

Il ne se limite donc pas à une philosophie. Il peut travailler sur l'éducation, la santé, l'agriculture, l'économie, la politique, les relations humaines, la culture, les institutions, les sciences, la spiritualité ou encore l'intelligence artificielle. Selon les sujets, il peut produire un livre, une méthode, une expérience, une critique, un outil pratique ou une proposition institutionnelle.

Une idée centrale du mouvement est qu'il ne suffit pas d'accumuler des connaissances. Il faut aussi apprendre à les relier sans les confondre. Comprendre l'agriculture, par exemple, demande de regarder à la fois les sols, les plantes, l'énergie, l'économie, le travail, les habitudes alimentaires et les effets environnementaux. Mais relier ces dimensions ne signifie pas les réduire à une seule explication : chaque domaine conserve ses méthodes et ses critères de preuve.

Le mouvement cherche également à transmettre. Certaines connaissances importantes ne devraient pas dépendre d'une rencontre heureuse, du milieu social dans lequel on est né ou d'une découverte tardive. Une partie du travail noosophique consiste donc à identifier, vérifier, condenser et rendre réellement accessibles les savoirs qui peuvent aider une personne à mieux comprendre le monde, prendre soin d'elle-même, exercer ses droits et gagner en autonomie.

Le mouvement tire son nom de la Noosophie, qui désigne, dans sa philosophie, une vérité ou structure du réel indépendante de la manière dont nous la comprenons. Autrement dit, le monde ne devient pas vrai parce que nous avons réussi à l'expliquer : il existe

et fonctionne indépendamment de nos théories, de nos croyances et de nos institutions. Nous pouvons en comprendre certaines choses correctement, nous tromper sur d'autres, ou n'en percevoir encore qu'une petite partie.

C'est pourquoi le mouvement noosophique ne considère pas ses propres textes comme infaillibles. Une idée doit pouvoir être comparée aux connaissances disponibles, confrontée aux objections, mise à l'épreuve lorsque c'est possible et corrigée lorsqu'elle résiste mal au réel.

La Noosophie n'est donc pas seulement quelque chose à penser. Le mouvement noosophique cherche à faire en sorte que ce qui est compris puisse aussi devenir utile, transmissible et transformateur dans le monde réel.

Comment ce livre a été produit

La production de cet ouvrage s'est déroulée par étapes successives plutôt que par génération automatique d'un texte complet. Le sujet, les objectifs et les orientations générales ont d'abord été définis humainement. Noosophe IA a ensuite contribué à explorer le sujet, rechercher et comparer des sources, construire différentes architectures possibles et faire apparaître les arguments, objections et zones d'incertitude.

Le manuscrit a été développé progressivement, chapitre après chapitre. Les propositions produites ont été relues, discutées, corrigées ou rejetées lorsqu'elles ne correspondaient pas au projet, contenaient des affirmations insuffisamment étayées ou simplifiaient excessivement le sujet. Des phases distinctes de recherche documentaire, de rédaction, de critique, de vérification de cohérence et d'assemblage ont été utilisées lorsque cela était nécessaire.

L'intelligence artificielle n'est donc pas considérée ici comme une source d'autorité. Elle intervient comme un outil actif de recherche, de formulation, de comparaison et de mise à l'épreuve. Les

propositions qu'elle produit peuvent être erronées et restent révisables.

La version publiée résulte de ce travail itératif, de corrections successives et d'une validation humaine finale. Cette méthode cherche à utiliser les capacités de l'intelligence artificielle sans lui transférer les décisions concernant la finalité de l'ouvrage, les choix de valeur ou la décision de publication.

À propos de Hieronymus Anonymus

Hieronymus Anonymus est l'initiateur humain du projet Noosophie Intégrative. Son travail porte sur la mise en relation de domaines de connaissance et de pratique habituellement séparés, ainsi que sur l'expérimentation de nouvelles formes de collaboration entre humains et intelligence artificielle. Il participe à la conception, à la discussion, à la révision et à la validation des travaux publiés par les Éditions Noosophie.

Découvrir, rejoindre et soutenir

Découvrir la Noosophie

Pour découvrir le mouvement, ses travaux et ses publications.



<https://www.noosophie.fr/>

Devenir Noosophe

Pour découvrir le projet d'adhésion et rejoindre le mouvement lorsqu'il sera ouvert.



<https://www.noosophie.fr/devenir-noosophe>

Soutenir la Noosophie

Ce livre est mis gratuitement à disposition. Si vous souhaitez permettre aux Éditions Noosophie de continuer à publier gratuitement des ouvrages, soutenir les recherches et développer les activités du mouvement, vous pouvez contribuer par un don du montant de votre choix.



<https://www.noosophie.fr/soutenir>

© Hieronymus Anonymus — Éditions Noosophie — contact@noosophie.fr

Licence CC BY-NC-ND 4.0 — Prix : Gratuit

La pétrochimie est partout, mais presque toujours invisible.

Entre le pétrole ou le gaz naturel et une bouteille, un textile, un pneu, une mousse isolante ou un détergent s'étend une architecture industrielle complexe : séparation des charges, vapocraquage, reformage, production d'éthylène, de propylène et d'aromatiques, polymérisation, formulation, mise en forme et circulation mondiale des intermédiaires.

Ce livre reconstruit cette chaîne étape par étape.

Il montre comment quelques molécules plateformes peuvent donner naissance à des milliers de produits, pourquoi la réaction chimique ne représente qu'une partie du défi industriel, comment matières premières, énergie, infrastructures et marchés déterminent la géographie des complexes pétrochimiques, et pourquoi remplacer les hydrocarbures fossiles ne consiste jamais simplement à « changer de matière ».

L'ouvrage examine également les risques industriels, la toxicité, les émissions de gaz à effet de serre, les déchets plastiques, le recyclage, la biomasse, l'électrification et les différentes voies de circularité, en distinguant systématiquement les problèmes que chaque solution peut réellement résoudre.

Ni plaider pour la pétrochimie, ni réquisitoire contre les plastiques, ce livre propose une méthode plus exigeante : suivre les molécules, comprendre les procédés et identifier les fonctions avant d'évaluer les transformations possibles.



Soutenir



Noosophie IA

sous la direction de Hieronymus Anonymus

Éditions Noosophie

Comprendre pour agir

<https://www.noosophie.fr/soutenir>

Prix : Gratuit