Chimie industrielle

1ère Année

Option PÉTROCHIMIE





TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

1. Finalités de la formation 1
   - 1.1. Consolidation de la maîtrise des procédés 1
   - 1.2. Développement de la compétence analytique 1
   - 1.3. Intégration de la dimension stratégique 1

2. Compétences visées 1
   - 2.1. Maîtrise des fondements théoriques et réactionnels 1
   - 2.2. Analyse et optimisation des schémas de production 2
   - 2.3. Intégration des contraintes opérationnelles et environnementales 2

3. Approche Pédagogique 2
   - 3.1. Articulation Théorie-Praxis 2
   - 3.2. Pédagogie par la Résolution de Problèmes 3

4. Hygiène, Sécurité Industrielle et Environnement (HSE) 3
   - 4.1. Fondements de l'approche intégrée 3
   - 4.2. Les trois piliers de la maîtrise des risques 3
   - 4.3. L'objectif pédagogique central 4

PARTIE I : FONDEMENTS DES PROCÉDÉS CHIMIQUES **5**

a. L'énergie, moteur de la transformation 5

b. La cinétique, maîtresse du temps 5

c. Les transferts, artères du procédé 5

d. Le réacteur et la séparation, cœurs de l'usine 5

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION À L'INDUSTRIE CHIMIQUE ET AUX PROCÉDÉS **6**

1.1. L'Industrie Chimique : Secteurs et Importance 6
   - a. L'accroche du chimiste 6
   - A. Les trois grands secteurs de la chimie 6

FIGURE 1 : RÉF. IMG (3832-8183-0602) **8**

Schéma de la transformation de matière première en produits finis 8
   - B. Importance stratégique et économique 8

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 2 : RÉF. IMG (1854-2930-6198) **10**

Interconnexion entre l'industrie chimique et les autres secteurs économiques 10

- L'anecdote de l'ingénieur de la Gécamines 10

1.2. Les Matières Premières de l'Industrie Chimique 12

- a. De la roche au réacteur 12
- A. Les matières premières d'origine minérale 13

FIGURE 3 : RÉF. IMG (0972-9740-4245) **15**

Schéma simplifié du raffinage du pétrole brut en produits pétrochimiques 15

- B. Les matières premières d'origine fossile 15
- C. Les matières premières d'origine renouvelable (Biomasse) 16

FIGURE 4 : RÉF. IMG (9161-6453-9317) **17**

Cycle de transformation de la biomasse en produits chimiques et énergie 17

- Scénarios et Exercices 17
- Une erreur providentielle dans l'atelier 17

1.3. Représentation des Procédés : Schémas, Opérations et Procédés Unitaires 19

- a. L'analogie du plan d'architecte 19
- A. Les Schémas de Procédé (Flowsheets) 20

FIGURE 5 : RÉF. IMG (8581-2186-8748) **22**

Comparaison entre un schéma de procédé simple et un schéma détaillé 22

- B. L'Opération Unitaire 22
- C. Le Procédé Unitaire 23

CHAPITRE 2 : LES BILANS DE MATIÈRE **26**

2.1. Principe de Conservation et Bilans sur Systèmes sans Réaction 26

- a. Une loi immuable, de la cuisine au réacteur 26
- A. L'équation générale du bilan de matière 26

FIGURE 6 : RÉF. IMG (2844-6924-2495) **29**

Schéma de bilan de matière sur un séparateur simple 29

- Anecdote : Le casse-tête du terminal pétrolier de Muanda 29

2.2. Bilans Stœchiométriques sur Systèmes avec Réaction Chimique 31

- a. La recette du chimiste 31
- A. L'Équation Générale du Bilan 31

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Le Réactif Limitant et le Taux de Conversion....32

2.3. Analyse des Procédés avec Recyclage et Purge....34

- a. L'art de ne rien perdre....34
- A. Le Recyclage : Une Logique d'Économie....35

FIGURE 7 : RÉF. IMG (1466-5225-1719)....37

Schéma simplifié d'une boucle de recyclage dans un procédé industriel....37

- B. La Purge : Le Gardien de la Pureté....37

CHAPITRE 3 : LES BILANS D'ÉNERGIE (THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE)....41

3.1. Premier Principe de la Thermodynamique et Bilan d'Enthalpie....41

- a. L'énergie est un comptable implacable....41
- A. Le Premier Principe : Conservation de l'Énergie....41
- B. L'Enthalpie (H) : L'Énergie Utile du Chimiste....41

FIGURE 8 : RÉF. IMG (0358-3735-9347)....44

Schéma d'un bilan d'enthalpie sur un réacteur chimique continu....44

- Scénarios et Exercices....44
- Une anecdote du fleuve Congo....44

3.2. Calcul de la Chaleur de Réaction....46

- a. Le feu et la glace : deux faces d'une même pièce....46
- A. L'Enthalpie Standard de Réaction ()....47
- B. La Loi de Hess : L'algèbre des réactions....47

FIGURE 9 : RÉF. IMG (8126-6755-6364)....49

Diagramme illustrant la loi de Hess pour une réaction chimique simple....49

- De la sève d'hévéa à l'énergie de l'usine....49

3.3. Application des Bilans Énergétiques sur un Procédé Complet....51

- a. De la théorie à l'usine....51
- A. La cartographie énergétique du procédé....52

FIGURE 10 : RÉF. IMG (4521-5146-5995)....53

Schéma de bilan énergétique sur une colonne de distillation simple....53

- B. L'équation générale et ses simplifications....53

CHAPITRE 4 : INTRODUCTION À LA CINÉTIQUE ET AUX RÉACTEURS CHIMIQUES....57

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

4.1. Cinétique Chimique : Vitesse et Facteurs d'Influence.....57
- a. Le temps, c'est de l'argent, même pour les molécules.....57
- A. Définition de la Vitesse de Réaction.....57
- B. La Loi de Vitesse : Une Équation pour Prédire.....57
- C. Les Principaux Facteurs d'Influence.....58

FIGURE 11 : RÉF. IMG (8894-8591-3777).....61

Action d'un catalyseur sur la barrière énergétique d'une réaction.....61
- Scénarios et Exercices.....61

4.2. Le Réacteur Idéal Discontinu (Batch).....63
- a. La marmite du chimiste.....63
- A. Définition et Principe de Fonctionnement.....63

FIGURE 12 : RÉF. IMG (9412-4903-2435).....66

Schéma de principe d'un réacteur discontinu idéalement agité.....66
- B. Équation Caractéristique (Bilan de Matière).....66

FIGURE 13 : RÉF. IMG (1153-8581-1887).....69

Évolution de la concentration d'un réactif au cours du temps.....69
- Scénarios et Exercices.....69

4.3. Les Réacteurs Idéaux Continus (CSTR et PFR).....72
- a. Une question de flux.....72
- A. Le Réacteur Parfaitement Agité (CSTR).....72

FIGURE 14 : RÉF. IMG (2807-8927-1971).....74

Schéma de principe d'un réacteur continu parfaitement agité (CSTR).....74
- B. Le Réacteur Piston (PFR).....74

FIGURE 15 : RÉF. IMG (6214-9027-7524).....77

Modèle du réacteur tubulaire idéal ou réacteur piston (PFR).....77
- Anecdote : Le secret de l'ingénieur de la SOCIR.....77

PARTIE II : LES OPÉRATIONS UNITAIRES DE TRANSFERT.....80

a. Au cœur des procédés industriels.....80

b. Le transfert de matière : déplacer les molécules.....80

c. Le transfert de chaleur : maîtriser l'énergie.....80

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

d. Le transfert de quantité de mouvement : faire circuler les fluides.....80

CHAPITRE 5 : L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES DANS L'INDUSTRIE.....81

5.1. Transport des Liquides : Les Pompes.....81
- a. L'ingénieur et l'eau qui ne monte pas.....81
- A. Principe de fonctionnement d'une pompe.....81
- B. Classification des pompes industrielles.....81

FIGURE 16 : RÉF. IMG (7765-5793-0305).....84

Schéma de principe d'une pompe centrifuge et ses composants clés.....84

FIGURE 17 : RÉF. IMG (3920-9703-1081).....86

Représentation schématique de la Hauteur Manométrique Totale (HMT) d'une inst.....86
- C. Scénarios et Exercices.....86

5.2. Transport des Gaz : Compresseurs, Ventilateurs et Soufflantes.....88
- a. L'air, un fluide à manipuler.....88
- A. La Pression, critère de distinction fondamental.....89

FIGURE 18 : RÉF. IMG (8164-9525-0503).....91

Comparaison schématique entre ventilateur, soufflante et compresseur en usine.....91
- B. Technologies et applications pétrochimiques.....91

5.3. Composants des Réseaux de Tuyauteries et Robineterie Industrielle.....94
- a. L'artère et son cœur.....94
- A. Les Tuyaux : Artères de l'Industrie.....94
- B. Les Raccords : Squelette du Réseau.....95
- C. La Robinetterie : Contrôle du Flux.....95

CHAPITRE 6 : LES TRANSFERTS DE CHALEUR.....98

6.1. Mécanismes Fondamentaux du Transfert de Chaleur.....98
- a. Du calorique à la thermodynamique.....98
- A. La Conduction Thermique.....98
- B. La Convection Thermique.....98
- C. Le Rayonnement Thermique.....99

6.2. Les Échangeurs de Chaleur.....100
- a. La sagesse du refroidissement.....100
- A. Principe de Fonctionnement et Efficacité.....101

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Les Principaux Types d'Échangeurs.....101

6.3. Fours, Chaudières et Tours de Refroidissement.....104

- a. La danse du chaud et du froid.....104
- A. Les Fours Industriels : Le Cœur Brûlant.....104
- B. Les Chaudières : Les Centrales à Vapeur.....105

FIGURE 19 : RÉF. IMG (4717-9317-9794).....107

Schéma de principe d'une tour de refroidissement à tirage naturel.....107

- C. Les Tours de Refroidissement : Le Poumon Froid.....107

CHAPITRE 7 : LES OPÉRATIONS DE SÉPARATION PAR TRANSFERT DE MATIÈRE (I).....110

7.1. Séparation par Distillation.....110

- a. Le principe caché du lotoko.....110
- A. Volatilité Relative : Le Moteur de la Séparation.....110
- B. La Colonne de Distillation : Un Escalier Thermique.....111

FIGURE 20 : RÉF. IMG (1626-8995-5772).....113

Schéma d'une colonne de distillation atmosphérique pour le pétrole brut.....113

- Scénarios et Exercices.....113
- a. L'anecdote de l'Ingénieur Bope à Moanda.....113

7.2. Séparation par Absorption Gaz-Liquide.....115

- a. La logique du piège à gaz.....115
- A. Principe et Mécanisme du Transfert.....115
- B. Les Colonnes d'Absorption.....116

FIGURE 21 : RÉF. IMG (5474-5524-6775).....117

Schéma de principe d'une colonne d'absorption à contre-courant.....117

- C. Le Choix du Solvant.....117

7.3. Séparation par Adsorption sur Solide.....119

- a. Le principe de la surface active.....119
- A. Mécanismes et adsorbants clés.....120

FIGURE 22 : RÉF. IMG (3115-5443-0410).....122

Schéma d'une colonne d'adsorption industrielle pour la purification d'un gaz.....122

- B. Applications en pétrochimie.....122

7.4. Opération de Séchage des Solides.....124

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. Le secret du manioc et du catalyseur.....124
- A. Principes du Séchage Industriel.....125
- B. Les Courbes Caractéristiques du Séchage.....125
- C. Le Sécheur à Lit Fluidisé : Un Acteur Clé.....126

CHAPITRE 8 : LES OPÉRATIONS DE SÉPARATION PAR TRANSFERT DE MATIÈRE (II).....129

8.1. Séparation par Extraction Liquide-Liquide.....129
- a. Le principe de la non-miscibilité.....129
- A. Terminologie Fondamentale de l'Extraction.....129
- B. Coefficient de Partage et Sélectivité.....129
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....130

8.2. Purification par Cristallisation.....132
- a. Le sel du Kongo Central et le sucre du Kwilu.....132
- A. Principe Fondamental : Le Jeu de la Solubilité.....133
- B. Les Étapes d'une Cristallisation Industrielle.....133

FIGURE 23 : RÉF. IMG (2652-3694-5943).....135

Schéma du processus de cristallisation pour la purification d'un solide.....135
- C. Le Choix du Solvant Idéal.....135

8.3. Séparation Solide-Fluide par Filtration.....138
- a. Une erreur de cuisine, une leçon de génie des procédés.....138
- A. Principe fondamental et Média Filtrant.....138

FIGURE 24 : RÉF. IMG (3328-2718-1454).....140

Schéma simplifié d'un filtre-presse à plaques pour la séparation solide-liquide.....140
- B. Lois de la Filtration.....140

8.4. Séparation par Centrifugation.....142
- a. Le fufu et la science des forces.....142
- A. Principe fondamental et accélération centrifuge.....143
- B. Applications pétrochimiques spécifiques.....144

PARTIE III : ÉTUDES DE CAS DES GRANDES INDUSTRIES CHIMIQUES.....147

a. Du laboratoire à l'usine : le changement d'échelle.....147

b. Les piliers techniques : procédés et rendements.....147

c. L'empreinte économique et stratégique.....147

d. Responsabilité et sécurité : l'ingénieur citoyen.....147

CHAPITRE 9 : L'INDUSTRIE DE L'ACIDE SULFURIQUE ET DES ENGRAIS.....148

9.1. Le Procédé de Contact pour l'Acide Sulfurique.....148

- a. Le roi invisible de l'industrie.....148
- A. Les Quatre Étapes Clés du Procédé.....148

FIGURE 25 : RÉF. IMG (3021-6301-6369).....150

Schéma simplifié du procédé de contact pour l'acide sulfurique.....150

- B. La Conversion Catalytique : Un Compromis Scientifique.....150

FIGURE 26 : RÉF. IMG (5800-9431-3661).....153

Le compromis température-rendement dans la conversion catalytique du dioxyde 153

- C. La Finalisation : de l'Oléum à l'Acide Commercial.....153
- Scénarios et Exercices.....154

9.2. De l'Acide Sulfurique aux Engrais Phosphatés.....157

- a. Une question de survie alimentaire.....157
- A. L'Attaque Acide du Phosphate Naturel.....157
- B. La Fabrication des Superphosphates.....158
- Scénarios et Exercices.....159

9.3. Enjeux Environnementaux de l'Industrie Phosphatée.....160

- a. Le phosphate, une richesse à double tranchant.....160
- A. Les rejets gazeux et liquides.....161
- B. La gestion du phosphogypse.....161

FIGURE 27 : RÉF. IMG (7498-0421-3826).....163

Vue aérienne d'une immense pile de phosphogypse près d'une usine.....163

- Scénarios et Exercices.....163

CHAPITRE 10 : L'INDUSTRIE DE L'AMMONIAC ET DES DÉRIVÉS AZOTÉS.....166

10.1. Le Procédé Haber-Bosch pour la Synthèse de l'Ammoniac.....166

- a. Le paradoxe de l'ammoniac.....166
- A. L'équation et le dilemme thermodynamique.....166
- B. Les conditions opératoires : un compromis industriel.....166

FIGURE 28 : RÉF. IMG (9263-9325-0951).....169

Schéma simplifié d'une unité de synthèse d'ammoniac Haber-Bosch.....169

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....169

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

10.2. Production d'Acide Nitrique par le Procédé d'Ostwald....171
- a. L'étincelle d'Ostwald....171
- A. Principe Général du Procédé....171

FIGURE 29 : RÉF. IMG (7842-9374-5151)....173

Schéma simplifié d'une unité de production d'acide nitrique par procédé Ostwald....173
- B. La Séquence Réactionnelle en Trois Actes....173

FIGURE 30 : RÉF. IMG (0888-6264-1164)....176

Vue en coupe du convertisseur catalytique pour l'oxydation de l'ammoniac....176
- a. L'or liquide de l'agronome du Kasaï....176

10.3. Fabrication des Engrais Azotés et Applications de l'Urée....178
- a. L'azote, clé de la fertilité des sols....178
- A. Synthèse de l'Urée : Le Procédé Bosch-Meiser....178

FIGURE 31 : RÉF. IMG (9139-2543-9454)....181

Schéma simplifié d'une tour de prilling pour la production d'urée....181
- B. Applications de l'Urée au-delà des Engrais....181

FIGURE 32 : RÉF. IMG (0237-1933-2114)....184

Sacs d'engrais et exemples d'applications industrielles de l'urée....184
- C. Le Nitrate d'Ammonium....184

CHAPITRE 11 : L'INDUSTRIE DU CHLORE ET DE LA SOUDE (ÉLECTROCHIMIE)....187

11.1. Le Procédé Chlore-Alcali par Électrolyse de Saumure....187
- a. Genèse d'un procédé fondamental....187
- A. Principe de l'Électrolyse de la Saumure....187
- B. Les Trois Technologies de Cellules....188

11.2. Technologies des Cellules d'Électrolyse....190
- a. Le sel, l'alchimie et l'électricité....190
- A. La Cellule à Mercure (Procédé Castner-Kellner)....190
- B. La Cellule à Diaphragme....191
- C. La Cellule à Membrane Échangeuse d'Ions....191

11.3. Applications Industrielles du Chlore et du PVC....193
- a. Du sel des Phéniciens aux usines de Moanda....193
- A. Le chlore, un réactif polyvalent....193

FIGURE 33 : RÉF. IMG (8325-6037-4913) **195**

Schéma des applications directes et indirectes du chlore gazeux 195

- B. Le PVC, le plastique du quotidien 195

11.4. Applications Industrielles de la Soude Caustique 198

- a. L'outil invisible de l'industrie 198
- A. La Déconstruction de la Matière Organique : Papier et Textile 198
- B. Le Raffinage et la Saponification 199
- C. Le Traitement des Minerais et des Eaux 200

FIGURE 34 : RÉF. IMG (3760-3250-3204) **202**

Le rôle de la soude caustique dans le procédé Bayer d'extraction d'alumine 202

- Scénarios et Exercices 202
- a. Le feu du raffineur 202

CHAPITRE 12 : L'INDUSTRIE DES CIMENTS ET LE TRAITEMENT DES EAUX **205**

12.1. La Fabrication du Ciment Portland 205

- a. L'héritage romain et la poussière de Portland 205
- A. Matières Premières et Préparation du Cru 205
- B. La Cuisson et la Clinkérisation 205

FIGURE 35 : RÉF. IMG (3911-8102-9281) **208**

Schéma simplifié d'un four rotatif pour la production de clinker 208

- C. Le Broyage Final et l'Ajout du Gypse 208

FIGURE 36 : RÉF. IMG (7032-5480-0264) **211**

Composition minéralogique du clinker de ciment Portland avant broyage final 211

- L'énigme du pont de Lwangi 211

12.2. Chimie de l'Hydratation du Ciment et du Béton 213

- a. Le ciment ne "sèche" pas, il réagit 213
- A. Les Acteurs Chimiques de l'Hydratation 213
- B. Prise et Durcissement : Deux Phénomènes Distincts 214

FIGURE 37 : RÉF. IMG (1008-2722-7952) **216**

Microstructure du Ciment Hydraté au Microscope Électronique 216

- Anecdote du Pont Maréchal à Matadi 216

12.3. Chaîne de Traitement de l'Eau Potable 218

- a. De la source à l'usine : une inspiration naturelle.....218
- A. Prétraitement et Coagulation-Floculation.....218

FIGURE 38 : RÉF. IMG (2646-2948-2969).....221

Schéma du processus de coagulation-floculation dans une usine de traitement.....221

- B. Décantation et Filtration.....221
- C. Désinfection finale.....222

FIGURE 39 : RÉF. IMG (2850-4473-4764).....224

Coupe transversale d'un filtre à sable multicouche pour l'eau potable.....224

- b. Scénarios et Exercices.....224

12.4. Principes de Traitement des Eaux Usées Industrielles.....226

- a. Une question de survie industrielle.....226
- A. Les quatre étapes cardinales du traitement.....226

FIGURE 40 : RÉF. IMG (9204-8554-2271).....228

Schéma simplifié d'une station d'épuration industrielle pour les eaux usées.....228

- B. Paramètres de contrôle et de performance.....228

ANNEXES.....231

1. Glossaire des Termes du Génie Chimique.....231
   - A. Opérations Unitaires Fondamentales.....231
   - B. Réacteurs Chimiques et Cinétique.....232
   - C. Procédés Clés du Raffinage Pétrolier.....233
2. Symboles des Équipements de Procédé (Norme ISO 10628).....234
   - A. Principes Généraux de Symbolisation.....234
   - B. Récipients et Réservoirs (Vessels and Tanks).....235
   - C. Échangeurs de Chaleur (Heat Exchangers).....236
   - D. Pompes et Compresseurs.....236
   - E. Vannes (Valves).....236
   - F. Colonnes et Réacteurs.....237
3. Tableaux de Données Thermodynamiques.....237
   - A. Définitions et Conventions Fondamentales.....237
   - B. Grandeurs Thermodynamiques Tabulées.....238
   - C. Calcul des Grandeurs de Réaction Standards.....240
   - D. Correction en Température : Loi de Kirchhoff.....240

4. Exemples de Schémas de Procédés (PFD – Process Flow Diagram).....241
- A. Définition et Objectifs du PFD.....241
- B. Symbologie Normalisée (ISO 10628 / ISA S5.1).....242
- C. Structure et Conventions de Lecture.....243

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

PRÉLIMINAIRES

1. Finalités de la formation

1.1. Consolidation de la maîtrise des procédés

Cette formation vise la maîtrise approfondie des procédés industriels majeurs. L'élève doit dépasser la simple description des réactions chimiques fondamentales. Il s'approprie la logique opératoire du craquage, du reformage catalytique et de la polymérisation. La finalité est de construire une compétence systémique sur les unités de production, incluant leurs interconnexions et leurs flux de matière et d'énergie.

1.2. Développement de la compétence analytique

Au-delà de l'acquisition des savoirs, le curriculum développe une compétence analytique rigoureuse. L'apprenant est formé pour diagnostiquer une défaillance, pour optimiser un rendement et pour interpréter les données d'un flux de production. L'objectif est de former des techniciens supérieurs capables d'agir sur les variables d'un système pour atteindre une performance de production définie et sécurisée.

1.3. Intégration de la dimension stratégique

Enfin, le programme ancre les savoir-faire techniques dans leur contexte économique national. L'élève saisit la position de la pétrochimie comme industrie de base. Il comprend la chaîne de valeur, depuis la matière première brute jusqu'aux produits semi-finis essentiels (polymères, solvants, engrais). Cette vision d'ensemble prépare les futurs cadres à des prises de décision éclairées, conscientes des enjeux de qualité, de coût et d'impact environnemental.

---

2. Compétences visées

2.1. Maîtrise des fondements théoriques et réactionnels

La maîtrise des fondements s'articule autour de la description quantitative des grands procédés de la pétrochimie. L'élève doit être en mesure de justifier le choix d'un procédé en mobilisant les principes de la cinétique chimique, de la thermodynamique appliquée et de la catalyse.

Cette compétence couvre spécifiquement : - L'identification des mécanismes réactionnels (radicalaires, ioniques) propres au craquage, au reformage et à la polymérisation. - La corrélation entre la structure des hydrocarbures et leur réactivité. - La différenciation du rôle et du mode d'action des catalyseurs (homogènes, hétérogènes, zéolithes).

2.2. Analyse et optimisation des schémas de production

Un second axe de compétences vise la lecture et l'interprétation des schémas de procédés industriels (Process Flow Diagrams). L'élève doit dépasser la simple réaction chimique pour raisonner en termes de flux de matière et d'énergie à l'échelle d'une unité de production, comme celle de la raffinerie de Muanda au Kongo Central. Cela implique la capacité à établir des bilans matière et énergie, à calculer des rendements, des sélectivités et à identifier les points critiques d'un procédé (goulots d'étranglement, boucles de recyclage).

2.3. Intégration des contraintes opérationnelles et environnementales

Une compétence transversale est développée pour l'évaluation des projets pétrochimiques au regard des normes HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement). L'élève apprend à analyser l'impact environnemental d'un procédé, la gestion des effluents et la valorisation des coproduits. Cette dimension inclut une initiation à l'analyse de la viabilité économique, reliant les choix techniques (pression, température, catalyseur) aux coûts opératoires et à la rentabilité globale d'une installation industrielle.

---

3. Approche Pédagogique

3.1. Articulation Théorie-Praxis

Une articulation rigoureuse entre les principes fondamentaux de la chimie et leurs applications industrielles structure ce manuel. Chaque concept théorique, qu'il relève de la thermodynamique, de la cinétique chimique ou de la catalyse, est systématiquement corrélé à un procédé pétrochimique concret. La démarche vise la maîtrise du raisonnement hypothético-déductif propre à l'ingénieur. L'objectif est de permettre la transition fluide depuis la compréhension d'une équation de vitesse jusqu'à son application dans la modélisation d'un réacteur de craquage ou de reformage.

3.2. Pédagogie par la Résolution de Problèmes

Au-delà de la transmission des savoirs factuels, l'accent est mis sur le développement de compétences analytiques. La progression pédagogique favorise l'autonomie par la confrontation à des études de cas et des exercices complexes. Ces derniers sont conçus comme des scénarios industriels contextualisés, ancrés dans des réalités plausibles (optimisation de rendement, sélection de catalyseur, contraintes logistiques entre Moanda et le Kwilu). L'enseignant dispose ainsi d'une base solide pour évaluer la capacité de l'étudiant à mobiliser ses connaissances pour résoudre une problématique technique multidimensionnelle.

---

4. Hygiène, Sécurité Industrielle et Environnement (HSE)

4.1. Fondements de l'approche intégrée

L'acronyme HSE désigne un système de management unifié. Il fusionne trois domaines d'expertise distincts en une seule discipline transversale. Cette approche systémique vise la maîtrise proactive des risques inhérents aux activités industrielles, particulièrement en pétrochimie. Elle conditionne directement la performance, la rentabilité et la pérennité des opérations. Sa mise en œuvre ne relève pas d'une fonction support mais d'une responsabilité managériale et opérationnelle de premier ordre.

4.2. Les trois piliers de la maîtrise des risques

Le système HSE repose sur trois composantes interdépendantes et complémentaires. Chaque pilier possède des objectifs spécifiques concourant à la performance globale.

- **L'Hygiène industrielle** se concentre sur l'identification, l'évaluation et le contrôle des facteurs de nuisance sur le lieu de travail. Ces facteurs peuvent être chimiques (exposition aux hydrocarbures), physiques (bruit, vibrations) ou biologiques. Son but est la prévention des maladies professionnelles à court, moyen et long terme.
- **La Sécurité industrielle** cible la prévention des accidents majeurs et des incidents pouvant causer des dommages aux personnes, aux équipements et à la production (incendies, explosions, fuites toxiques). Elle implique l'analyse des dangers, l'évaluation des risques et la mise en place de barrières de sécurité techniques et organisationnelles.

- **L'Environnement** concerne la gestion des impacts de l'activité industrielle sur les écosystèmes. Il s'agit de maîtriser les rejets (atmosphériques, liquides, solides), de gérer les déchets, de prévenir les pollutions accidentelles et de se conformer à la législation environnementale.

4.3. L'objectif pédagogique central

La transmission des connaissances en HSE dépasse la simple énumération de normes ou de procédures. L'enjeu est de former des techniciens et ingénieurs qui intègrent la dimension HSE comme une composante intrinsèque de toute décision technique ou opérationnelle. L'enseignement doit développer une véritable "culture de la sécurité", un réflexe permanent d'analyse des risques avant, pendant et après chaque action. Cette compétence distingue le professionnel de l'amateur dans un secteur à haut risque.

Partie I : Fondements des Procédés Chimiques

a. L'énergie, moteur de la transformation

Toute transformation chimique obéit à des lois énergétiques strictes. La thermodynamique chimique détermine la faisabilité et la direction spontanée d'une réaction. Elle quantifie l'énergie libérée ou absorbée, un facteur décisif pour la rentabilité et la sécurité d'une installation. Comprendre l'enthalpie ($ H $) et l'énergie libre de Gibbs (G $) permet de prédire si un procédé sera productif ou simplement une perte coûteuse de matière première.

b. La cinétique, maîtresse du temps

Une réaction possible thermodynamiquement peut être infiniment lente. La cinétique chimique étudie la vitesse des réactions et les facteurs qui l'influencent : concentration, température et pression. Surtout, elle introduit le rôle vital du catalyseur. Une usine de production d'ammoniac à Boma sans un bon catalyseur ne serait qu'un coûteux assemblage de tuyaux. La vitesse est le nerf de la guerre industrielle.

c. Les transferts, artères du procédé

Concrètement, la matière et la chaleur doivent circuler. Les phénomènes de transfert sont le système sanguin de l'usine. Le transfert de masse amène les réactifs au contact du catalyseur. Le transfert de chaleur évacue les calories d'une réaction exothermique ou en fournit pour une réaction endothermique. Sans une maîtrise des échangeurs, des pompes et des réacteurs agités, le meilleur des procédés reste une simple équation sur papier.

d. Le réacteur et la séparation, cœurs de l'usine

Au centre de ce ballet se trouve le réacteur chimique, l'enceinte où la transformation a lieu. Sa conception (tubulaire, cuve agitée) impacte directement le rendement. Une fois la réaction effectuée, le produit brut est rarement pur. Les opérations de séparation (distillation, absorption, extraction) sont alors cruciales pour isoler le produit désiré avec la pureté exigée par le marché. Un brut de Moanda devient essence, kérosène et gazole grâce à ces étapes.

Chapitre 1 : Introduction à l'Industrie Chimique et aux Procédés

1.1. L'Industrie Chimique : Secteurs et Importance

a. L'accroche du chimiste

Pendant que tu tiens une simple bouteille d'eau en plastique à Matadi, une chaîne complexe de transformations chimiques a déjà eu lieu. Cette chaîne part d'une matière première brute, souvent le pétrole extrait au large de Muanda, pour aboutir à l'objet que tu utilises sans même y penser.

Ce voyage de la matière, du puits de pétrole à la bouteille, est le cœur de la chimie industrielle. Elle organise la transformation à grande échelle de substances naturelles ou synthétiques en produits à plus haute valeur ajoutée, utiles pour toute la société.

A. Les trois grands secteurs de la chimie

L'industrie chimique se divise classiquement en trois branches principales. Chacune possède une logique de production et un marché distincts. Leur articulation forme l'épine dorsale de l'économie industrielle moderne.

- **La chimie de base :** Elle fabrique des molécules simples en très grandes quantités (souvent des millions de tonnes par an). Ces produits, comme l'acide sulfurique, l'éthylène ou la soude, sont les "briques" fondamentales pour les autres industries. Leurs prix sont bas et leur pureté est fonctionnelle, non absolue.
- **La chimie fine :** À l'opposé, elle produit des molécules complexes en quantités plus faibles (de quelques kilos à quelques centaines de tonnes). Ces substances, comme les principes actifs des médicaments ou les arômes alimentaires, exigent une très haute pureté. Leur valeur ajoutée est immense.
- **La parachimie (ou chimie de spécialités) :** Elle ne vend pas des molécules, mais des "formulations" ayant une fonction précise. Il s'agit de mélanges complexes conçus pour un usage final. Les peintures, les colles, les cosmétiques ou les détergents en sont des exemples parfaits.

Figure 1 : Réf. IMG (3832-8183-0602)

Schéma de la transformation de matière première en produits finis



Figure 1 : Réf. IMG (3832-8183-0602)

Schéma de la transformation de matière première en produits finis

a. Le point de départ : la ressource brute

Toute la chaîne commence avec une matière première. Sur ce visuel, le pétrole brut ou le gaz naturel sont extraits. Ces ressources, abondantes dans le Kongo Central, contiennent une multitude de molécules d'hydrocarbures qui doivent être séparées et transformées.

b. Le cœur du réacteur : la chimie de base

La raffinerie et les unités de vapocraquage convertissent la matière première en grands intermédiaires chimiques : l'éthylène, le propylène, le benzène. Ce sont les produits de la chimie de base, fabriqués en volumes massifs.

c. La diversification : la chimie fine et la parachimie

Ces intermédiaires sont ensuite dirigés vers d'autres usines. Certaines les transforment en plastiques (parachimie). D'autres les utilisent pour synthétiser des molécules complexes à haute valeur, comme des pesticides pour l'agriculture du Kwilu (chimie fine).

B. Importance stratégique et économique

L'industrie chimique est un pilier de l'autonomie d'un pays. Sa maîtrise conditionne le développement de presque tous les autres secteurs.

Premièrement, elle ajoute une valeur considérable aux ressources naturelles. Transformer le pétrole brut en polymères ou en médicaments est bien plus rentable que d'exporter la matière première brute. Cette transformation crée de la richesse localement.

Deuxièmement, elle est un moteur pour l'emploi qualifié. Elle nécessite des ingénieurs, des techniciens et des opérateurs formés, de la conception des procédés à la maintenance des installations.

Figure 2 : Réf. IMG (1854-2930-6198)

Interconnexion entre l'**industrie chimique** et les autres secteurs économiques

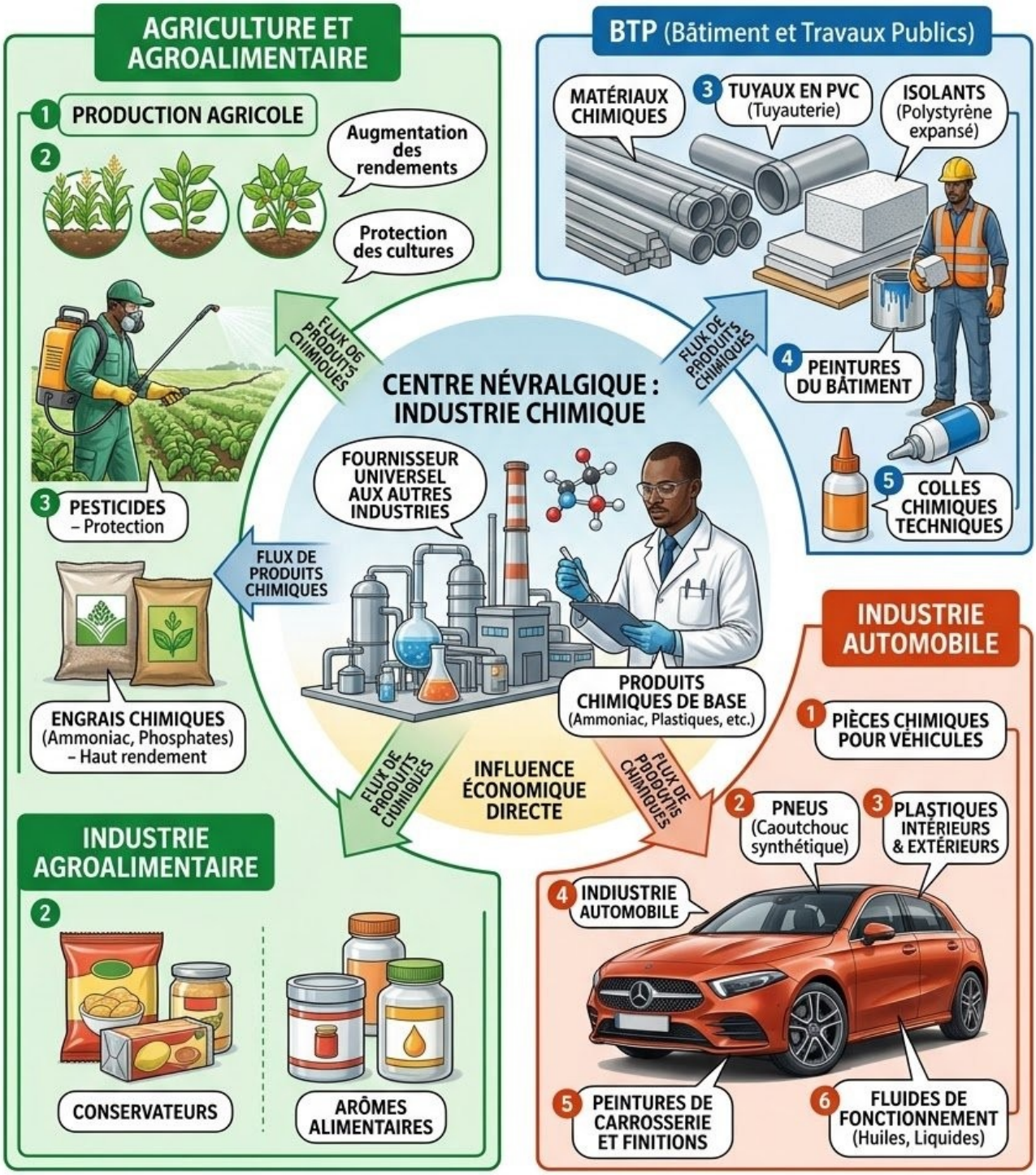

Figure 2 : Réf. IMG (1854-2930-6198)

Interconnexion entre l'industrie chimique et les autres secteurs économiques

a. Le centre névralgique

L'industrie chimique, représentée au centre du diagramme, agit comme un fournisseur universel. Elle ne produit pas majoritairement pour le consommateur final, mais pour les autres industries. Son état de santé influence directement celui de toute l'économie.

b. L'agriculture et l'agroalimentaire

Ce secteur dépend de la chimie pour les engrais (ammoniac, phosphates) qui augmentent les rendements, les pesticides qui protègent les cultures, et les conservateurs ou arômes pour l'industrie alimentaire.

c. Le BTP et l'automobile

La construction utilise des matériaux issus de la chimie : PVC pour les tuyaux, peintures, isolants en polystyrène, colles. L'industrie automobile dépend des plastiques, des pneus (caoutchouc synthétique), des fluides et des peintures de carrosserie.

Finalement, une industrie chimique nationale robuste réduit la dépendance aux importations de produits essentiels. Fabriquer nos propres médicaments, engrais ou plastiques renforce la souveraineté économique et protège le pays des fluctuations des marchés mondiaux.

L'anecdote de l'ingénieur de la Gécamines

L'ingénieur Mbuyi, aujourd'hui à la retraite à Lubumbashi, aime raconter ses débuts à la Gécamines dans les années 80. À l'époque, l'essentiel du procédé d'extraction du cuivre reposait sur une chimie simple : l'hydrométallurgie. On utilisait d'énormes quantités d'acide sulfurique, un produit typique de la chimie de base, pour dissoudre le minerai et en extraire le métal par électrolyse. Il se souvient : "Les jeunes aujourd'hui parlent de 'pétrochimie' comme si c'était de la magie. Mais nous, avec notre vieil acide et nos cathodes, on faisait déjà de la chimie industrielle à une échelle que peu peuvent imaginer. Sans ces cuves d'acide, le Katanga n'aurait jamais produit autant de cuivre. La chimie, c'est le moteur silencieux de la mine."

Exercice 1 : La boutique de Maman Hélène à Goma

Énoncé : Maman Hélène tient une petite quincaillerie-pharmacie au marché de Birere à Goma. Dans ses rayons, on trouve : du ciment, de la peinture, de l'aspirine (acide acétylsalicylique), et des bouteilles de soude caustique pure pour déboucher les canalisations. Aidez son fils, étudiant en chimie, à classer chaque produit dans le bon secteur de l'industrie chimique (chimie de base, chimie fine, parachimie).

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Analyser la nature de chaque produit** On examine chaque article pour déterminer s'il s'agit d'une molécule simple en grande quantité, d'une molécule complexe et pure, ou d'un mélange fonctionnel.
   - La soude caustique ($NaOH$) est une molécule simple, vendue pure, utilisée dans de nombreux procédés.
   - L'aspirine est une molécule spécifique (principe actif), complexe, à haute pureté, pour un effet pharmacologique.
   - La peinture n'est pas une molécule unique mais un mélange (pigments, liant, solvant) conçu pour couvrir une surface.
   - Le ciment est également un mélange complexe de silicates et d'aluminates de calcium, vendu pour sa fonction liante.
2. **Étape 2 : Classifier selon les définitions** On applique les définitions des trois secteurs.
   - **Chimie de base :** La soude caustique ($NaOH$). C'est un produit chimique fondamental, fabriqué en masse.
   - **Chimie fine :** L'aspirine. C'est une molécule complexe à haute valeur ajoutée et haute pureté.
   - **Parachimie :** La peinture et le ciment. Ce sont des mélanges formulés pour une application spécifique (couvrir, lier).

Exercice 2 : Le dilemme de l'ingénieur à Muanda

Énoncé : Ingénieur Kabeya travaille pour la SOCIR à Muanda. Le gouvernement envisage de construire une unité de vapocraquage pour transformer une partie du gaz naturel local en éthylène. Un politicien demande : "Pourquoi dépenser autant d'argent ? Il est plus simple d'importer directement les granulés de plastique dont nous avons besoin !" Préparez deux arguments économiques solides que l'ingénieur Kabeya peut utiliser pour justifier la production locale d'éthylène.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier le cœur du problème** Le débat oppose l'importation d'un produit fini (granulés de plastique) à l'investissement dans une étape de transformation intermédiaire locale (production d'éthylène à partir de gaz). L'éthylène est un produit de la chimie de base qui sert à fabriquer ces plastiques.
2. **Étape 2 : Formuler les arguments stratégiques** On se base sur le concept de valeur ajoutée et de développement industriel.
   - **Argument 1 : Création de valeur ajoutée locale.** En important les granulés, toute la valeur ajoutée (la transformation du gaz en éthylène, puis de l'éthylène en plastique) est créée à l'étranger. En produisant localement l'éthylène, la RDC capture une part significative de cette valeur. Le gaz à bas prix est transformé en un produit chimique beaucoup plus cher sur le marché international.
   - **Argument 2 : Développement d'un écosystème industriel.** Une unité de production d'éthylène ne sert pas qu'à faire un seul type de plastique. L'éthylène est une brique de base pour de nombreux autres produits (polyéthylène, PVC, antigel, etc.). Construire cette unité crée une fondation sur laquelle d'autres industries (plasturgie, automobile, construction) pourront se développer, créant ainsi des emplois qualifiés et une économie plus diversifiée et résiliente.

1.2. Les Matières Premières de l'Industrie Chimique

a. De la roche au réacteur

Même si le sel de cuisine semble simple et naturel, il est une matière première fondamentale de l'industrie chimique. Sa transformation produit le chlore et la soude caustique, des piliers de la fabrication de PVC, de détergents ou de papier. Ce sel, extrait par exemple des salines du Kongo Central, illustre une vérité : la nature fournit la substance brute.

La pétrochimie, elle, agit différemment. Elle ne se contente pas de purifier. Elle déconstruit et reconstruit la matière. Le pétrole brut de Moanda ou le gaz du lac Kivu ne sont pas des fins en soi. Ce sont des points de départ pour une réorganisation moléculaire complexe, créant des produits qui n'existent pas dans la nature.

A. Les matières premières d'origine minérale

L'industrie chimique lourde utilise massivement des ressources extraites de la croûte terrestre. Ces substances inorganiques sont souvent les plus abondantes et les moins coûteuses.

Les principales catégories sont : - **Le soufre (S)** : Extrait à l'état natif ou récupéré lors du raffinage du pétrole et du gaz naturel (désulfuration). Il est la base de la production d'acide sulfurique (H_2SO_4), le produit chimique le plus fabriqué au monde. - **Les phosphates** : Roches sédimentaires riches en ions phosphate (PO_4^{3-}). Ils sont essentiels à la fabrication des engrais phosphatés, vitaux pour l'agriculture. - **Le sel (chlorure de sodium, $NaCl$)** : Obtenu par évaporation de l'eau de mer ou par extraction de mines de sel gemme. Son électrolyse donne du chlore (Cl_2), de l'hydrogène (H_2) et de la soude caustique ($NaOH$). - **L'air** : Source quasi inépuisable d'azote (N_2) et d'oxygène (O_2), séparés par distillation cryogénique. L'azote est crucial pour la synthèse de l'ammoniac (NH_3).

Figure 3 : Réf. IMG (0972-9740-4245)

Schéma simplifié du raffinage du pétrole brut en produits pétrochimiques.

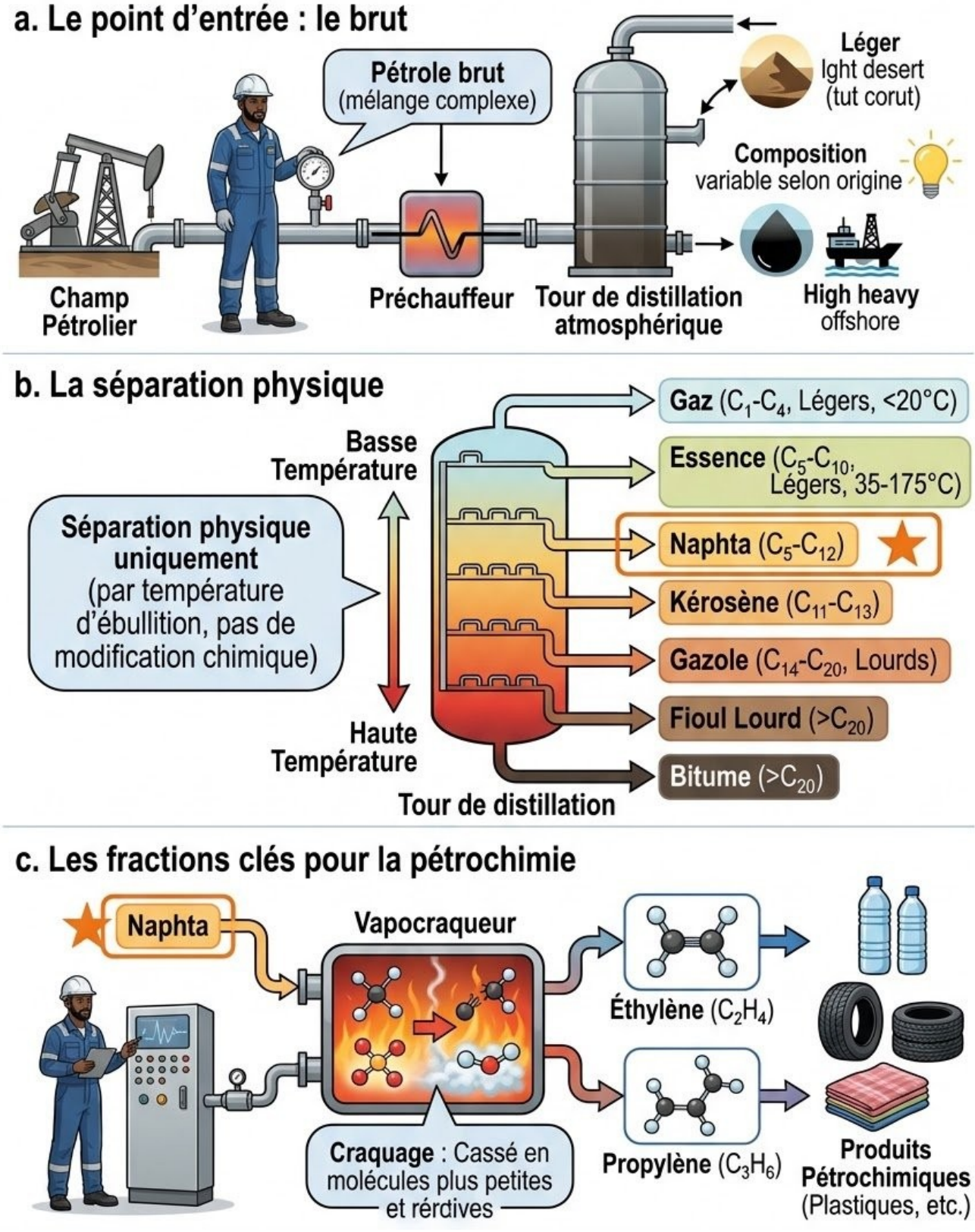

Figure 3 : Réf. IMG (0972-9740-4245)

Schéma simplifié du raffinage du pétrole brut en produits pétrochimiques.

a. Le point d'entrée : le brut

Le pétrole brut est un mélange extrêmement complexe de milliers d'hydrocarbures différents. Il arrive directement du champ pétrolier vers la tour de distillation. Sa composition varie fortement selon son origine géographique. Un brut léger du désert n'a pas les mêmes propriétés qu'un brut lourd et visqueux extrait en offshore. Cette variabilité impose une grande flexibilité aux raffineries pour adapter leurs procédés et obtenir les coupes désirées.

b. La séparation physique

La première étape est toujours une distillation atmosphérique. Ce processus ne modifie pas chimiquement les molécules. Il les sépare uniquement en fonction de leur température d'ébullition. Les molécules les plus légères (gaz, essence) montent en haut de la tour, tandis que les plus lourdes (gazole, fioul, bitume) restent en bas. C'est un tri physique à grande échelle.

c. Les fractions clés pour la pétrochimie

Parmi toutes les fractions, le naphta est la plus précieuse pour la pétrochimie. C'est une coupe légère, riche en molécules de taille intermédiaire (C_5 à C_{12}). C'est le naphta qui alimente les vapocraqueurs pour être "cassé" en molécules plus petites et réactives comme l'éthylène et le propylène, les véritables briques de base de l'industrie plastique.

■ ■ ■

B. Les matières premières d'origine fossile

Elles forment le cœur de la pétrochimie. Ces ressources proviennent de la décomposition de matière organique sur des millions d'années.

- **Le pétrole** : Fournit, après raffinage, des coupes spécifiques comme le naphta. Le craquage du naphta génère les grands intermédiaires : les oléfines (éthylène, propylène) et les aromatiques (benzène, toluène, xylènes ou BTX).
- **Le gaz naturel** : Principalement composé de méthane (CH_4), il sert à produire de l'hydrogène (H_2) par vaporeformage. Il est aussi une

source d'éthane (C_2H_6), qui peut être craqué pour produire de l'éthylène.

- **Le charbon** : Historiquement, le charbon était la base de la chimie via la carbochimie. Par gazéification, il produit un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène (gaz de synthèse), précurseur de nombreux produits chimiques comme le méthanol.

C. Les matières premières d'origine renouvelable (Biomasse)

Alternativement appelées "chimie du végétal", ces matières premières proviennent du monde vivant. La biomasse gagne en importance dans une optique de développement durable.

- **Les cultures sucrières et amylacées** : La canne à sucre ou le manioc du Kwilu, par fermentation, produisent du bioéthanol. Ce dernier peut être déshydraté pour donner de l'éthylène "vert".
- **Les huiles végétales** : L'huile de palme, de colza ou de soja sont des triglycérides. Leur transformation (transestérification) permet de produire du biodiesel et du glycérol, une molécule plateforme pour la chimie.
- **La biomasse lignocellulosique** : Le bois, la paille ou les déchets agricoles sont des sources prometteuses pour produire des sucres, des biocarburants avancés et des composés aromatiques biosourcés.