

Productions industrielles

Carmen M. Tibirna



Productions industrielles

Carmen M. Tibirna

Ce manuel présente certaines limitations en matière d'accessibilité, notamment en ce qui concerne certains tableaux, images et équations.

Centre collégial de développement de matériel didactique

**Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives nationales du Québec
et Bibliothèque et Archives Canada**

Titre : Productions industrielles / Carmen M. Tibirna.

Noms : Tibirna, Carmen-Mihaela, auteur. | Centre collégial de développement de matériel didactique, organisme de publication.

Description : Comprend des références bibliographiques.

Identifiants : Canadiana (livre imprimé) 20250028506 | Canadiana (livre numérique) 20250028514 | ISBN 9782894704370 (couverture souple) | ISBN 9782894704387 (PDF)

Vedettes-matière : RVM : Fabrication—Manuels d'enseignement supérieur. | RVMGF : Manuels d'enseignement supérieur.

Classification : LCC TS183.T53 2025 | CDD 670.42—dc23

Responsable du projet au CCDMD : Hélène Lévesque

Révision linguistique : Valérie Myriam Manseau

Révision scientifique : François Brion

Correction d'épreuves : Isabelle Roy

Conception graphique, infographie et conception de la couverture : Pro-Actif

Illustrations : Carmen Tibirna

Photographies : Gracieuseté d'Alcoa, photo à droite de la couverture et photo d'ouverture du chapitre 8
Carmen Tibirna, toutes les autres photos

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives Canada, 2025

ISBN de l'édition imprimée : 978-2-89470-437-0

ISBN de l'édition numérique : 978-2-89470-438-7



CENTRE COLLÉGIAL DE DÉVELOPPEMENT
DE MATÉRIEL DIDACTIQUE

3800, rue Sherbrooke Est
Montréal (Québec), Canada H1X 2A2
Téléphone : 514 873-2200
www.ccdmd.qc.ca

© CCDMD, Collège de Maisonneuve, 2025

Il est illégal de reproduire cet ouvrage, en totalité ou en partie, quel qu'en soit la forme ou le procédé, sans l'autorisation écrite préalable du Collège de Maisonneuve, conformément aux dispositions de la Loi sur le droit d'auteur du Canada.

La production de cet ouvrage a été rendue possible grâce au soutien financier du ministère de l'Enseignement supérieur.

Imprimé au Canada

Table des matières

Chapitre 1

Introduction aux productions industrielles 2

1.1 Introduction 4

1.1.1 Définitions et terminologie 4

1.1.2 Généralités 5

1.1.3 Procédé industriel 8

1.2 Intrants d'une production industrielle 14

1.2.1 Matières premières 14

1.2.2 Énergie 14

1.3 Extrants d'une production industrielle 16

1.3.1 Produits 16

1.3.2 Déchets, émissions et produits hors spécification 16

1.4 Caractérisation d'une production industrielle 17

1.4.1 Qualité 17

1.4.2 Rendement 18

1.4.3 Productivité 18

1.5 Exercices 19

Chapitre 2

Productions pétrolières 20

2.1 Introduction 22

2.1.1 Définitions et terminologie 22

2.1.2 Origine, extraction et prétraitement du pétrole 23

2.1.3 Composition du pétrole 26

2.2 Produits pétroliers 28

2.2.1 Combustible d'un moteur à essence 30

2.2.2 Combustible d'un moteur diesel 32

2.3 Raffinage du pétrole 32

2.3.1 Distillation atmosphérique et distillation sous vide 32

2.3.2 Craquage catalytique et thermique 37

2.3.3 Hydrocraquage 40

2.3.4 Reformage catalytique 42

2.3.5 Isomérisation 44

2.3.6 Procédés de synthèse 46

2.4 Productions industrielles 48

2.4.1 Exemples de productions industrielles 48

2.4.2 Fabrication des huiles 50

2.5 Exercices 52



Chapitre 3

Productions papetières	56
3.1 Introduction	58
3.1.1 Définitions et terminologie	58
3.1.2 Généralités	59
3.1.3 Chimie du bois	61
3.2 Étapes de fabrication des pâtes et papiers	67
3.2.1 L'approvisionnement en fibres	67
3.2.2 La mise en pâte	68
3.2.3 Le blanchiment	68
3.2.4 La formation de la feuille	68
3.2.5 La finition	68
3.3 Types de procédés de mise en pâte	70
3.3.1 Pâtes mécaniques	71
3.3.2 Pâtes thermomécaniques	74
3.3.3 Pâtes chimiques	74
3.4 Traitements secondaires de la pâte	78
3.4.1 Classage	79
3.4.2 Épuration	82
3.4.3 Épaississement	83
3.4.4 Raffinage des refus	85
3.5 Blanchiment de la pâte	85
3.5.1 Blanchiment des pâtes mécaniques	87
3.5.2 Blanchiment des pâtes chimiques	87
3.6 Machines à papier	89
3.7 Désencrage et recyclage du papier	91
3.7.1 Revue des contaminants usuels des vieux papiers	92
3.7.2 Remise en pâte	94
3.7.3 Paramètres de la trituration	96
3.7.4 Effet des additifs chimiques	97
3.7.5 Désencrage par flottation	98
3.8 Exercices	99

Chapitre 4

Productions de bioproduits	100
4.1 Introduction	102
4.1.1 Définitions et terminologie	102
4.1.2 Généralités	103
4.2 Transformation de la biomasse en énergie	106
4.2.1 Bioénergie et biocarburants	106
4.2.2 Voie sèche de production de bioénergie	108
4.2.3 Voie humide de production de bioénergie	109
4.3 Production de biocarburants liquides	112
4.3.1 Production du bioéthanol	112
4.3.2 Production du biodiesel	118
4.4 Matériaux biosourcés	120
4.4.1 Biopolymères	120
4.4.2 Biocomposites	122
4.5 Notions de santé et de sécurité	125
4.6 Productions industrielles de bioproduits	125
4.6.1 Production de bioéthanol au Canada et au Québec	125
4.6.2 Production de biocarburants dans le monde	126
4.7 Exercices	128



Chapitre 5

Productions de matières plastiques 130

5.1 Introduction 132

5.1.1 Définitions et terminologie 132

5.1.2 Généralités 133

5.2 Structure des matières plastiques 136

5.2.1 Assemblage des monomères 136

5.2.2 Morphologie des polymères (structure au niveau microscopique) 139

5.3 Classification des matières plastiques 144

5.4 Propriétés des matières plastiques 150

5.5 Procédés de polymérisation 150

5.5.1 Polycondensation 150

5.5.2 Polyaddition 152

5.6 Méthodes industrielles de polymérisation 154

5.6.1 Polymérisation en masse 154

5.6.2 Polymérisation en solution 156

5.6.3 Polymérisation en suspension (ou en perles) 156

5.6.4 Polymérisation en émulsion 157

5.7 Techniques de mise en forme des matières plastiques 159

5.7.1 Adjuvants 159

5.7.2 Plastifiants 159

5.7.3 Stabilisants 160

5.8 Recyclage et valorisation des matières plastiques 167

5.8.1 Recyclage des thermoplastiques 167

5.8.2 Valorisation des matières plastiques 167

5.9 Notions de santé et de sécurité 171

5.9.1 Risques liés à la toxicité et aux conditions de travail dans les usines de transformation 171

5.9.2 Risques liés à la toxicité des produits finis lors de leur usage 171

5.10 Production industrielle 172

5.11 Exercices 175

Chapitre 6

Productions chimiques inorganiques 180

6.1 Introduction 182

6.1.1 Définitions et terminologie 182

6.1.2 Généralités 183

6.2 Gaz 186

6.2.1 Azote et oxygène 186

6.2.2 Chlore 187

6.2.3 Hydrogène 191

6.3 Bases 194

6.3.1 Ammoniac 194

6.3.2 Soude caustique 196

6.3.3 Chaux 197

6.4 Acides inorganiques 198

6.4.1 Acide sulfurique 198

6.4.2 Acide nitrique 201

6.4.3 Acide chlorhydrique 204

6.5 Notions de santé et de sécurité 206

6.6 Exercices 208

Chapitre 7

Productions chimiques organiques

7.1 Introduction	214
7.1.1 Définitions et terminologie	214
7.1.2 Généralités	215
7.2 Produits organiques de base	217
7.2.1 Benzène, toluène et xylène (BTX)	218
7.2.2 Solvants organiques	220
7.2.3 Produits organiques divers	225
7.3 Monomères	230
7.3.1 Monomères oléfiniques	230
7.3.2 Monomères vinyliques	232
7.4 Autres produits organiques	235
7.4.1 Chlorofluorocarbones	235
7.4.2 Nitroparaffines	236
7.4.3 Noir de carbone	237
7.4.4 Charbon activé	238
7.5 Notions de santé et de sécurité	239
7.6 Exercices	241

Chapitre 8

Productions métallurgiques

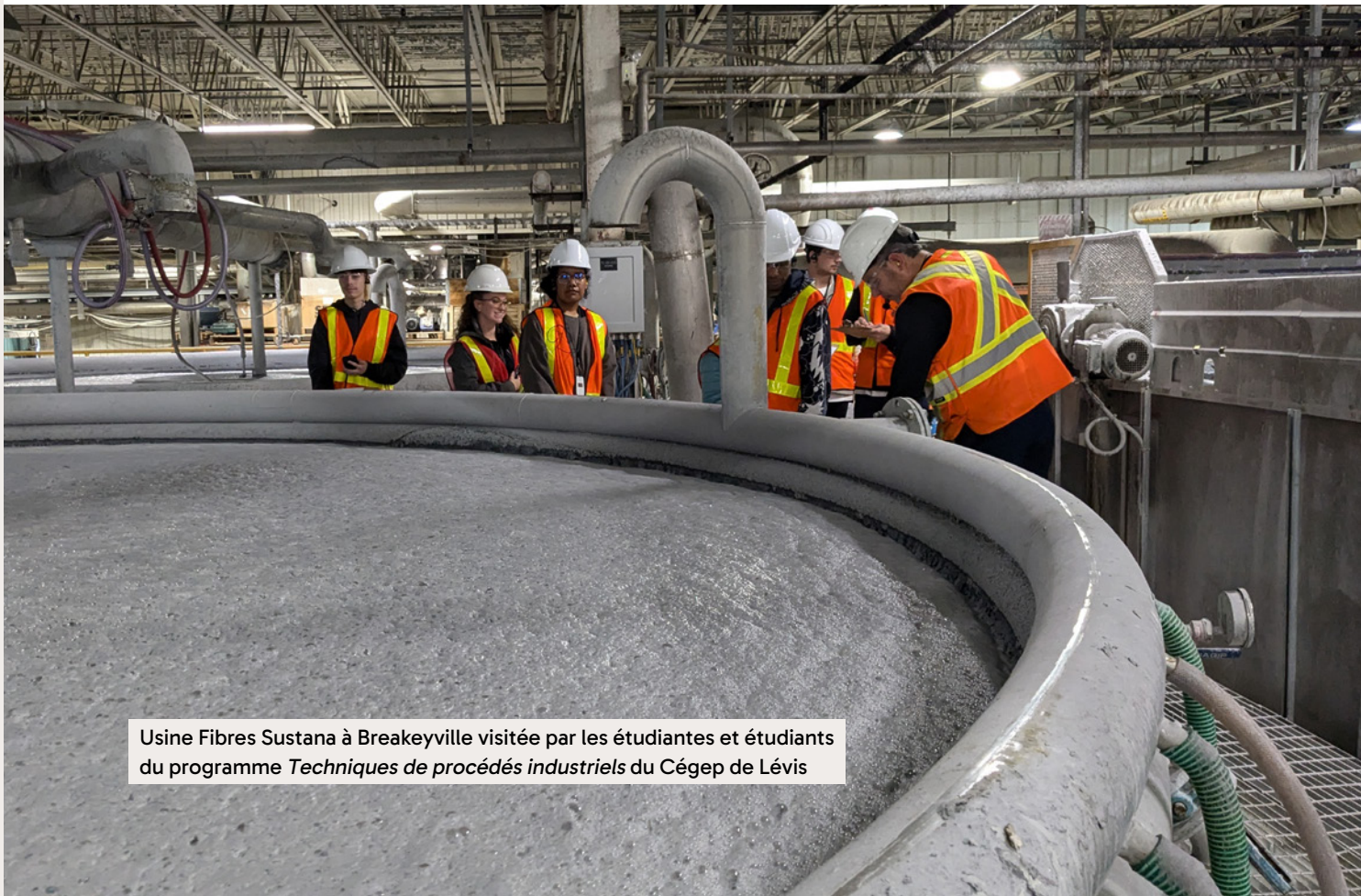
8.1 Introduction	246
8.1.1 Définitions et terminologie	246
8.1.2 Généralités	247
8.2 Aluminium	249
8.2.1 Généralités	249
8.2.2 Caractéristiques de l'aluminium et de ses alliages	252
8.2.3 Procédé de fabrication de l'aluminium	254
8.2.4 Traitements de surface de l'aluminium	256
8.3 Cuivre	258
8.3.1 Généralités	258
8.3.2 Caractéristiques du cuivre et de ses alliages	259
8.3.3 Procédé de fabrication du cuivre	260
8.4 Usages des métaux et des alliages	264
8.5 Notions de santé et de sécurité	267
8.6 Exercices	268
Solutionnaire	272
Médiagraphie	282





Chapitre 1

Introduction aux productions industrielles



Usine Fibres Sustana à Breakeyville visitée par les étudiantes et étudiants du programme *Techniques de procédés industriels* du Cégep de Lévis

Sommaire

1.1 Introduction	4
1.1.1 Définitions et terminologie	4
1.1.2 Généralités	5
1.1.3 Procédé industriel	8
1.2 Intrants d'une production industrielle	14
1.2.1 Matières premières	14
1.2.2 Énergie	14
1.3 Extrants d'une production industrielle	16
1.3.1 Produits	16
1.3.2 Déchets, émissions et produits hors spécification	16
1.4 Caractérisation d'une production industrielle	17
1.4.1 Qualité	17
1.4.2 Rendement	18
1.4.3 Productivité	18
1.5 Exercices	19

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons, dans un premier temps, la nomenclature et les définitions spécifiques aux productions industrielles ainsi que quelques généralités connexes. Étant donné que les procédés industriels sont au cœur de toute production industrielle, nous en décrirons ensuite les composants et les caractéristiques. Les matières premières et l'énergie constituent les intrants d'une production industrielle; elles seront abordées en détail avant que soient introduites les notions concernant les extrants potentiels. Pour terminer, nous fournirons une caractérisation de la production industrielle sur le plan de l'efficacité, du rendement et de la productivité ainsi que quelques exercices d'application.

1.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique aux productions industrielles et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Chimie industrielle* = chimie de production de masse à grande échelle;
- › *Combustion* = transformation de la matière en dioxyde de carbone et eau;
- › *Conditionnement* = processus de prétraitement physico-chimique de la matière première dans une forme convenable pour la fabrication;
- › *Déchets* = matière résiduelle d'une production industrielle ou d'une utilisation quelconque qui n'a pas d'utilité et qui doit être éliminée ou, mieux encore, revalorisée par une entreprise-tierce;
- › *Émission* = production de différents composants, de chaleur, de bruit ou de vibrations qui se dispersent dans l'air, l'eau ou le sol;
- › *Énergie* = système matériel (p. ex. : chaudière à vapeur, moteur électrique) capable de produire une transformation telle que le changement d'état d'une matière, la production d'un mouvement ou d'un travail, etc.;
- › *Extrants* = produits de fabrication, déchets, émissions et rejets qui résultent d'une production industrielle;
- › *Fabrication* = ensemble des procédés visant à transformer une matière première en un produit intermédiaire ou fini;
- › *Industrie* = ensemble d'activités économiques qui ont comme but la fabrication de biens (durables ou non) ainsi que la production d'énergie;
- › *Intrants* = matières premières et énergie qui entrent dans un système;
- › *Matière première* = substance naturelle ou chimique de départ qui, soumise à des transformations physico-chimiques ou mécaniques, conduira à la fabrication d'autres produits et matériaux de base ou intermédiaires;
- › *Norme* = document de référence établi par un organisme officiel de normalisation qui décide des règles à suivre dans un domaine précis;
- › *Procédé industriel* = ensemble de méthodes à suivre pour obtenir, à partir de matières premières et d'énergie, un produit de qualité dans une quantité précise;
- › *Produit intermédiaire* = composant résultant d'une production industrielle qui servira de matière première dans le cadre d'une autre production industrielle ou d'une même production divisée en grandes sections indépendantes;
- › *Produit fini* = composant fabriqué ou modifié dans le cadre d'une production industrielle et qui est prêt à l'usage;
- › *Production industrielle* = processus complexe de fabrication de produits;
- › *Productivité* = variable qui permet d'évaluer la quantité de produits finis ou intermédiaires fabriqués pendant un intervalle de temps donné;
- › *Produit hors spécification* = produit non conforme selon les règles de contrôle de la qualité;

- › *Qualité* = processus et ensemble de propriétés et de caractéristiques qui visent à garantir qu'un produit fabriqué est conforme à un standard ou à une norme;
- › *Rendement* = variable qui permet d'évaluer la quantité de matière première transformée en produit fini ou intermédiaire dans un intervalle de temps donné;
- › *Système* = ensemble complexe de procédés de conditionnement, de fabrication et de séparation;
- › *Séparation* = procédé de fractionnement d'un mélange homogène ou hétérogène de deux ou de plusieurs composants au moyen de différentes forces motrices : la température, la solubilité, la masse volumique, etc.
- › *Usine* = *unité de production* = endroit où les biens sont fabriqués au moyen de différentes machines.

1.1.2 Généralités

Selon la version la plus récente (2022) du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN), il existe 20 secteurs industriels et 102 sous-secteurs qui définissent l'économie canadienne. Parmi ces secteurs industriels, c'est celui de la fabrication (numéroté 31-33) qui fera l'objet du présent manuel. Il est composé de 23 sous-secteurs (tableau 1.1), dont 7 ont été sélectionnés pour être traités dans les prochains chapitres. Ces sous-secteurs ont été choisis parce qu'ils constituent les domaines d'emploi habituels et traditionnels de nos futurs techniciens en procédés industriels. Quoiqu'elles soient de plus en plus répandues dans le quotidien industriel, les productions industrielles de la chimie fine et de la chimie de spécialité ainsi que celles liées aux matériaux hautement spécialisés ne seront pas traitées dans cet ouvrage. Elles sont trop variées, et il serait impossible de toutes les aborder dans un seul manuel. Les autres secteurs industriels qui ne seront pas traités dans cet ouvrage sont les industries produisant des services plutôt que des biens (p. ex. : traitements environnementaux et production d'énergie électrique ou thermique).

Tableau 1.1 Énumération des sous-secteurs composant le secteur de la fabrication (31-33)

Sous-secteurs de la fabrication (31-33) abordés dans le manuel

322 – Fabrication du papier

324 – Fabrication de produits du pétrole et du charbon

325 – Fabrication de produits chimiques

326 – Fabrication de produits en plastique et en caoutchouc

327 – Fabrication de produits minéraux non métalliques

331 – Première transformation des métaux

339 – Activités diverses de fabrication

Une production industrielle est un processus élaboré de fabrication de produits et de services qui implique un système plus ou moins complexe et une suite de transformations de matières premières en produits intermédiaires ou finis. Un schéma simplifié d'une production industrielle est représenté à la [figure 1.1](#) ci-dessous.

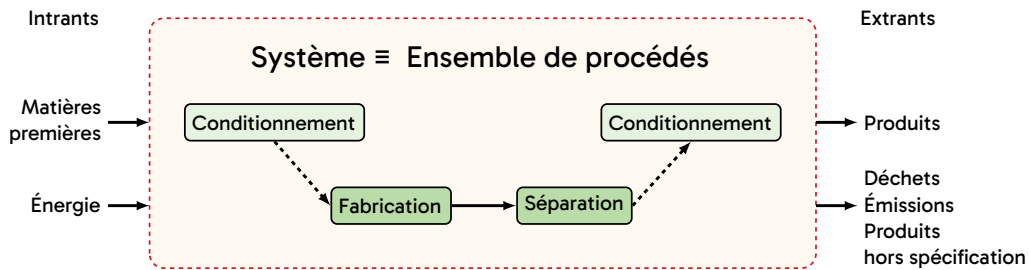


Figure 1.1 Schéma simplifié d'une production industrielle

Pour transformer une matière première en un produit ou service souhaité, il faut développer une unité de production qui emploie le système le plus performant et le plus sécuritaire pour y arriver et qui répond aux exigences de la compétition industrielle. Un système correspond à un ensemble bien défini de **procédés de fabrication et de séparation** auquel peuvent se greffer des **procédés de conditionnement** des intrants ou des extrants, ou les deux.

L'agencement des procédés de fabrication, de séparation et de conditionnement diffère grandement d'un produit à l'autre; il tient compte du degré de pureté et de la forme physique des intrants et des extrants ainsi que des transformations subies par les matières premières afin de conduire aux produits finis ou intermédiaires. Une description détaillée de ces trois types de procédés est présentée à la [section 1.1.3](#).

Les intrants de tout système industriel sont constitués des matières premières et de l'énergie. Ces notions seront approfondies à la [section 1.2](#).

Les extrants de tout système industriel sont constitués des produits, des émissions, des rejets et des déchets. La description de ces différents extrants sera abordée à la [section 1.3](#).

Une unité de production ne sert presque jamais à la production d'un seul produit. Elle est conçue pour être polyvalente, c'est-à-dire qu'elle devrait pouvoir servir à la fabrication de plusieurs produits, afin de pouvoir s'adapter à la demande du marché.

Ce qui caractérise les productions industrielles, c'est à la fois la diversité des produits qu'il est possible de fabriquer, la technologie des procédés employés et la capacité de production. Selon le régime de fonctionnement employé et la capacité de production, une production industrielle peut être conduite en **continu** ou en **discontinu**; ce dernier mode est aussi appelé « production par lot » (*batch*).

Dans le cas d'une **production industrielle continue**, les divers paramètres, et en particulier les débits d'alimentation et de soutirage, sont constants : ils ne varient à aucune étape du procédé. Ce mode de fonctionnement présente des avantages et des inconvénients (tableau 1.2) par rapport au mode discontinu.

Tableau 1.2 Avantages et inconvénients d'une production industrielle continue

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Coût de production inférieure, donc productivité plus élevée • Qualité de la production et des produits constante • Besoins en main-d'œuvre réduits, car la production est automatisée et continue • Mesures de sécurité et conditions sanitaires meilleures en ce qui concerne la fabrication de produits parce que l'automatisation et l'exploitation de la production se font à distance (à l'aide de panneaux de contrôle) 	<ul style="list-style-type: none"> • Investissements élevés, surtout pour le contrôle et la régulation de la production • Nécessité de régulariser la qualité des matières premières nécessaire afin d'assurer une qualité constante du produit fabriqué • Spécificité de l'appareillage, dédié à une production industrielle spécifique (Si la production est tenue de changer, l'appareillage doit être changé en conséquence).

Dans le cas d'une **production industrielle discontinu**, l'état du procédé n'est pas constant : il varie dans le temps, et plusieurs de ses étapes peuvent être exécutées successivement au moyen du même appareillage. Ce mode de fonctionnement présente des avantages et des inconvénients (tableau 1.3) par rapport au mode continu.

Tableau 1.3 Avantages et inconvénients d'une production industrielle discontinu

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Appareillage polyvalent • Aucun problème de circulation de certaines matières (p. ex. : pâtes), car les charges employées sont faibles. • Rendements plus élevés que ceux du mode continu 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût énergétique plus élevé, car il faut chauffer et refroidir chaque charge produite. • Temps morts (remplissage, soutirage, refroidissement, etc.) durant la production, ce qui conduit à une productivité plus faible que celle du mode continu, pour lequel ces périodes n'existent pas. • Besoin en main-d'œuvre élevé, car il est nécessaire d'effectuer la manutention et la surveillance de la production. • Qualité de production variable • Coût de production élevé

Plusieurs productions industrielles combinent des sections dont le processus est en mode continu avec d'autres en mode discontinu. Il existe deux façons de procéder pour permettre la transition d'une section à l'autre :

- 1) Un réservoir tampon d'une capacité suffisante permet une alimentation constante de la section qui fonctionne en continu même lorsque celle qui opère en discontinu, située en amont, est en arrêt. Notez que lorsque l'opération est inverse (continu en amont et discontinu en aval), le volume dans le réservoir tampon varie constamment entre un niveau haut et un niveau bas.
- 2) Les équipements de la section qui fonctionne en mode discontinu sont multipliés en nombre suffisant et opérés en parallèle pour assurer une alimentation constante de la section qui fonctionne en continu.

À moins que la section opérée en mode discontinu comporte peu d'équipements et que le coût de ces équipements soit faible, la première option est la plus fréquemment employée.

1.1.3 Procédé industriel

Un *procédé industriel* est défini comme un ensemble de méthodes à suivre pour obtenir, à partir de matières premières et d'énergie, un produit de qualité dans une quantité précise. Dans la conception d'un nouveau procédé ou la modification d'un procédé existant, peu importe la grande diversité de contextes industriels de nos jours, il faut remplir au moins trois critères essentiels :

- › **Respecter le cahier des charges** en ce qui concerne la composition et la qualité du produit fabriqué. Sur le plan de la composition, la pureté du produit est primordiale. Elle doit être très élevée (voire de 100%) dans le cas des produits réservés à un usage interne chez l'être humain (p. ex. : produits pharmaceutiques ou alimentaires); elle est considérée comme acceptable à un niveau moins élevé dans le cas de fabrications chimiques et énergétiques.
- › **Optimiser la production** par rapport aux conditions d'investissement et de fonctionnement, ce qui revient à dire que les technologies d'opération choisies, leur agencement et leur mise en œuvre doivent assurer la meilleure productivité possible au moindre coût.
- › **Préciser si la production est destinée à être conduite annuellement ou par campagne** et de quelle manière elle le sera, soit en continu ou en lot. Selon ces considérations, les échelles de production varieront de quelques centaines de kilogrammes à des dizaines de millions de tonnes.

Tel qu'illustré à la [figure 1.1](#), les procédés industriels peuvent être catégorisés en trois types :

- › Les **procédés de conditionnement** peuvent viser un seul prétraitement des matières premières ou un seul traitement de finition des produits intermédiaires ou finis, ou, dans la plupart des cas, les deux. Le prétraitement de la matière première a comme objectif sa conversion dans une forme convenable ou l'atteinte de spécifications précises en ce qui concerne sa composition ou sa pureté pour ainsi faciliter le déroulement des procédés de fabrication. Le traitement de finition d'un produit intermédiaire ou fini est nécessaire soit pour en faciliter le transport, soit pour lui donner une forme appropriée à l'usage prévu.
- › Les **procédés de fabrication** sont extrêmement diversifiés, mais, de manière globale, ils peuvent être mis en œuvre **avec** ou **sans réaction (chimique ou biochimique)**. À la fin d'une fabrication industrielle, on obtient toujours un mélange d'un ou de plusieurs produits dont certains présentent un intérêt commercial, et d'autres, non. L'ensemble de ces produits doit alors être fractionné au moyen de procédés de séparation spécifiques à chaque cas.
- › Les **procédés de séparation** de l'ensemble des produits d'une production industrielle sont eux aussi extrêmement nombreux.

Quelques exemples de procédés de conditionnement, de fabrication et de séparation sont présentés au **tableau 1.4**.

Tableau 1.4 Exemples de procédés de conditionnement, de fabrication et de séparation qui peuvent intervenir lors d'une production industrielle

Type de procédé	Exemples	
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> Fragmentation (concassage, broyage, etc.) Traitement à la vapeur Fluidisation Traitement de surface Séchage 	<ul style="list-style-type: none"> Agglomération des solides (granulation, enrobage) Sublimation Lyophilisation Humidification et déshumidification Dépoussiérage
	<ul style="list-style-type: none"> Sans réaction chimique ni biochimique 	<ul style="list-style-type: none"> Homogénéisation Agitation Mélange Lavage des gaz Dépoussiérage des gaz Absorption gaz-liquide (G-L) Adsorption gaz-solide (G-S)
Fabrication	<ul style="list-style-type: none"> Avec réaction chimique 	<ul style="list-style-type: none"> Oxydation Nitration Sulfonation
	<ul style="list-style-type: none"> Avec réaction biochimique 	<ul style="list-style-type: none"> Fermentation Digestion Biométhanisation
Séparation	<ul style="list-style-type: none"> Absorption G-L Épuisement (<i>stripping</i>) Filtration Sédimentation et décantation Distillation et rectification Évaporation Cristallisation 	<ul style="list-style-type: none"> Extraction solide-liquide (S-L) Extraction liquide-liquide (L-L) Séparation par membrane Séparation (magnétique, électrique, mécanique) Adsorption liquide-solide (L-S) Chromatographie

On industrialise un procédé selon un algorithme (**figure 1.2**, page suivante) en effectuant des essais progressifs :

- › D'abord, on effectue des essais à **l'échelle du laboratoire** – on choisit la voie chimique, biochimique ou physique qui permet d'obtenir le produit ciblé. Ensuite, des essais sont menés dans un laboratoire de recherche traditionnel au moyen d'une quantité ou d'un volume réduit, c'est-à-dire environ un litre ou un kilogramme de matières premières.
- › Par la suite, on procède aux essais à **l'échelle pilote** – cette étude est toujours conduite en laboratoire de recherche, mais dans une installation de conception industrielle. Elle implique l'usage d'un volume ou d'une masse de matières premières de l'ordre de centaines de litres ou de kilogrammes. Il est recommandé de passer par l'échelle pilote pour acquérir des données et optimiser les conditions opératoires du procédé.
- › Finalement, des essais sont menés à **l'échelle industrielle** où sont employés des milliers ou des centaines de milliers de litres ou kilogrammes de matières premières.

L'algorithme des diverses phases d'industrialisation d'un procédé est représenté de manière schématique à la figure 1.2.

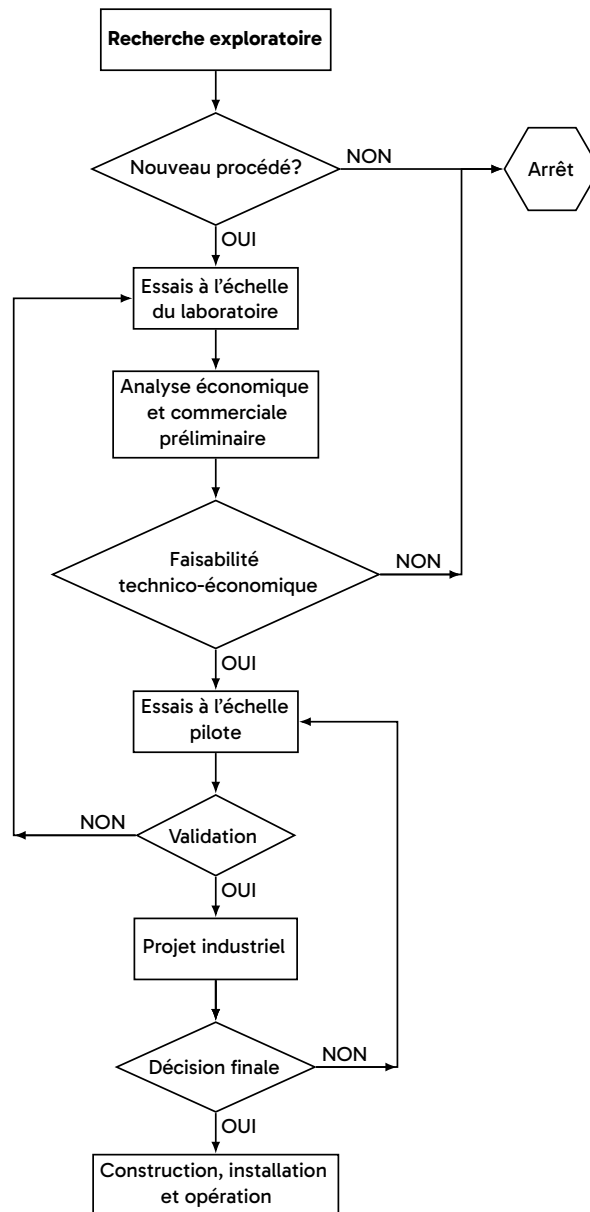


Figure 1.2 Schéma de l'algorithme d'industrialisation d'un procédé

La description d'un procédé industriel à l'aide de schémas est très pratique et universelle. Les schémas font partie intégrante de l'industrialisation d'un procédé. Ils peuvent se présenter sous différents types :

- › **Schéma bloc ou fonctionnel** aussi appelé *block flow diagram* (BFD) en anglais – type de schéma le plus simple et le plus utilisé dans le monde scientifique et industriel. Il est formé de cadres rectangulaires (contenant des données clés) et de flèches qui indiquent la circulation de différents flux de matière et la relation qui existe entre les cadres. Il permet de comprendre les grands principes utilisés et il ne comporte aucune donnée numérique, ou très peu. Un exemple de schéma bloc est présenté à la [figure 1.3](#).

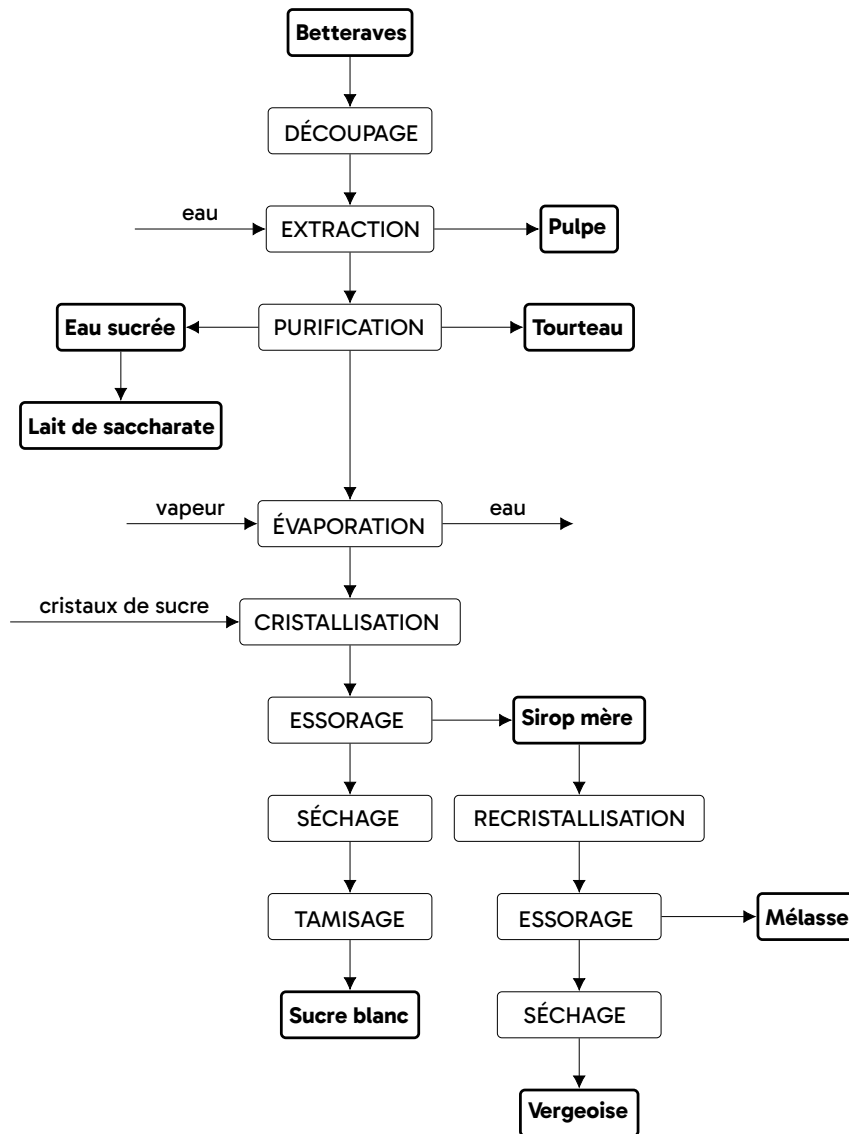


Figure 1.3 Exemple de schéma bloc illustrant le procédé industriel d'extraction du sucre à partir de betteraves

- › **Schéma de procédé**, aussi appelé « diagramme d'écoulement » ou *process flow diagram* (PFD) en anglais – illustration qui présente l'ensemble et la nature des appareils faisant partie d'un procédé ainsi que le sens de circulation des matières depuis l'entrée jusqu'à la sortie. On y trouve les boucles de recirculation. À moins que ce soit nécessaire à la compréhension du procédé, l'instrumentation et les boucles de contrôle n'y sont pas représentées. Ce type de schéma permet d'évaluer l'impact de changements apportés aux conditions opératoires sur la qualité des produits obtenus ou sur la quantité produite. Sans être surchargé, il comporte suffisamment de données numériques (pression, température, volume d'équipements, etc.) pour permettre la création de bilans de masse et d'énergie ainsi que toute autre information essentielle à la compréhension de l'agencement des équipements ou du procédé. Un exemple de schéma de procédé est présenté à la **figure 1.4**. Il est très fréquent que des composés fasse l'objet d'une recirculation dans un procédé, par exemple pour réutiliser un réactif alimenté en excès afin de favoriser un équilibre chimique ou d'améliorer le rendement d'un second réactif coûteux, ou bien encore pour réutiliser un solvant. Sauf en de rares exceptions où le train de séparation est parfait, la boucle de recirculation doit absolument comprendre une purge ayant un débit suffisant pour maintenir la concentration en impuretés à un niveau acceptable. Ce débit de purge est compensé grâce à l'ajout d'un débit équivalent dans la boucle, appelé « l'appoint » (ou *makeup*).

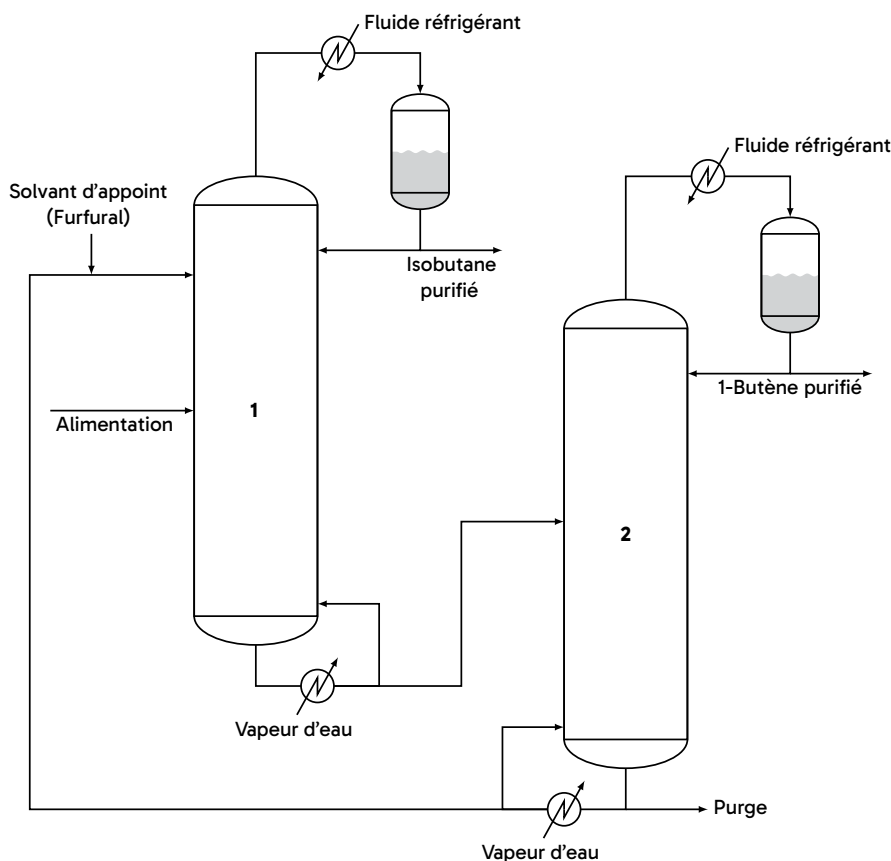


Figure 1.4 Exemple de schéma illustrant le procédé industriel de distillation extractive d'un mélange isobutane-1-butène (1 = colonne de distillation extractive; 2 = colonne de récupération du solvant)

- Schéma tuyauterie et instrumentation, ou piping and instrument diagram (P&ID) en anglais** – schéma le plus précis et plus complet utilisé dans le monde industriel pour décrire un procédé. Il constitue la représentation la plus fidèle d'un procédé industriel, car il montre l'ensemble des appareils et des équipements, de la tuyauterie, de la robinetterie ainsi que des instruments de mesure, de contrôle et de régulation qui le composent. Il s'agit d'un schéma de référence pour tous les corps de métiers œuvrant dans le procédé (ingénieurs, techniciens d'entretien, opérateurs, etc.); il doit donc impérativement être mis à jour lorsque des changements, même minimes, sont apportés au procédé, qu'ils soient physiques (équipements et accessoires) ou opérationnels (consignes, conditions opératoires, etc.).

Les procédures d'opération et d'entretien y font référence en utilisant les numéros d'équipements clairement identifiés tant sur le P&ID que les équipements et les accessoires eux-mêmes (par exemple, le réservoir TK-1, la vanne de régulation de pression PIC 302). Il y a tellement d'éléments graphiques sur ce type de schéma qu'en réalité, pour être facilement consultable, un procédé moindrement complexe peut être représenté au moyen de plusieurs dizaines de schémas ayant un lien entre eux. Un exemple de schéma P&ID est présenté à la **figure 1.5**.

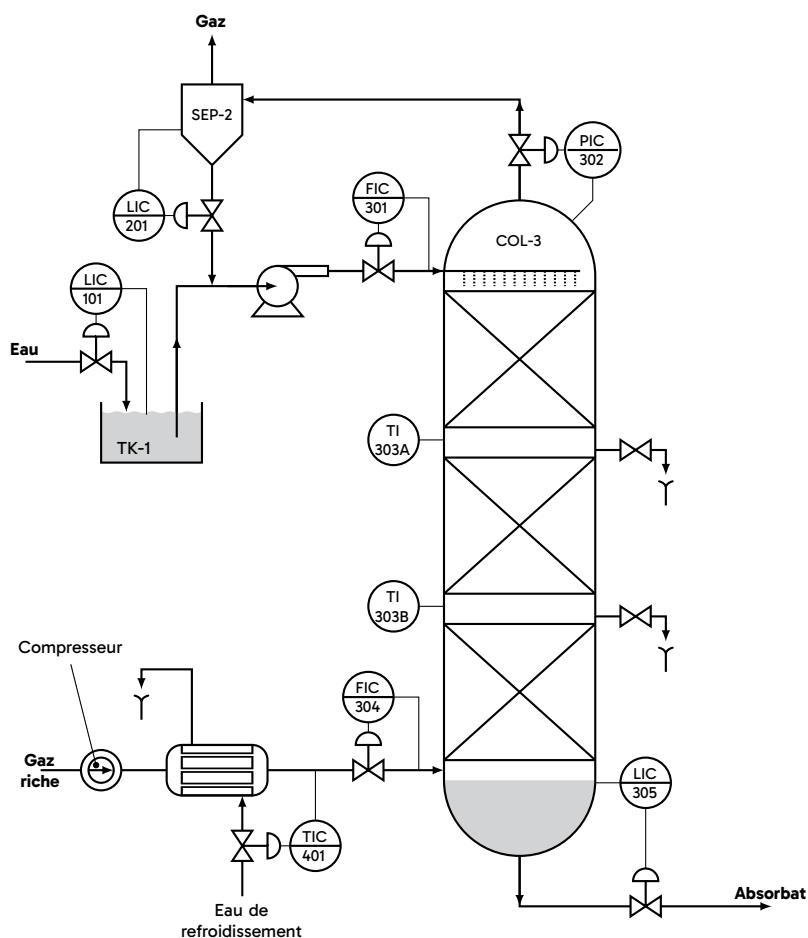


Figure 1.5 Exemple de schéma P&ID illustrant le procédé industriel d'absorption d'un gaz dans l'eau (LIC = contrôleur de niveau; TIC = contrôleur de température, FIC = contrôleur de débit; TI = indicateur [sonde] de température; PIC = contrôleur de pression)

1.2 Intrants d'une production industrielle

1.2.1 Matières premières

On définit une *matière première* comme étant une substance qui, au départ, est d'origine naturelle ou chimique (obtenue par synthèse) et qui, après avoir été soumise à des transformations physico-chimiques ou mécaniques, servira à la fabrication d'autres produits et matériaux de base ou intermédiaires. Les matières premières naturelles sont constituées par l'ensemble des substances qui se trouvent dans notre environnement terrestre. Pour ce qui est des matières premières chimiques, elles sont produites à l'aide de transformations chimiques à partir d'une ou de plusieurs matières premières naturelles.

Les matières premières peuvent être d'origine **minérale (inorganique)** ou **organique**. La première de ces deux catégories peut être subdivisée en substances métalliques et non métalliques; elle inclut également trois autres substances inépuisables : l'eau, l'air et le sel de table (NaCl). Une énumération des principales matières premières minérales est présentée dans le chapitre 6, qui traite des productions chimiques inorganiques.

Les matières premières naturelles organiques sont très diverses; elles peuvent être épuisables ou renouvelables. Elles peuvent également être d'origine végétale ou animale, voire microbienne. Une présentation globale de plusieurs types de matières premières naturelles organiques est présentée dans le [tableau 1.5](#).

Tableau 1.5 Exemples de matières premières naturelles organiques

Type de matière	Exemples
Renouvelable	<ul style="list-style-type: none"> • Céréales : blé, maïs, orge • Oléagineux : arachide, soja, olive • Sucres : betterave, canne à sucre • Produits tropicaux : thé, café, cacao • Produits animaliers : bovins, ovins, porcins • Bois : cellulose, lignine • Caoutchouc naturel • Laine • Coton • Tabac • Huiles essentielles
Épuisable	<ul style="list-style-type: none"> • Pétrole • Gaz naturel • Charbon

1.2.2 Énergie

Les industries de fabrication de biens sont très énergivores, car elles utilisent l'énergie (électrique, thermique et mécanique) et les produits énergétiques non seulement pour faire fonctionner les unités de production, mais aussi pour alimenter certains procédés en tant que matière première. Les principales sources d'énergie qui permettent d'obtenir du travail mécanique ou de la chaleur, utilisables dans le cadre des productions industrielles, sont de deux types :

- › Les **phénomènes**, tels que le soleil, le vent, les chutes d'eau
- › Les **produits énergétiques**, tels que les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), les substances radioactives et les déchets

Les deux sources d'énergie traditionnelles les plus utilisées par les productions industrielles sont les combustibles et l'électricité. Leurs caractéristiques sont présentées au **tableau 1.6**. Parmi les sources d'énergie non traditionnelles actuellement bien développées et économiquement viables qui sont employées par les productions industrielles, on peut citer :

- › Les systèmes solaires – ils utilisent des capteurs qui sont capables d'emmagasiner l'énergie solaire pour ensuite la transformer en énergie thermique.
- › Les systèmes photovoltaïques – ils transforment l'énergie solaire en énergie lumineuse.
- › Les systèmes hydrothermiques – ils transforment la géothermie de haute énergie naturelle en électricité ou en chaleur.

Tableau 1.6 Caractéristiques des combustibles traditionnels et de l'électricité comme sources d'énergie pour les productions industrielles

	Caractéristiques générales
Combustibles traditionnels (ex. : mazout, gaz naturel, charbon)	<ul style="list-style-type: none"> • Leur énergie est transformée en chaleur par combustion. • Ils sont caractérisés par leur pouvoir calorifique inférieur (PCI) et leur pouvoir calorifique supérieur (PCS). • Les deux types de pouvoir calorifique s'expriment en kJ/kg. • Le PCS représente le dégagement total de chaleur lors de leur combustion, y compris la condensation de la vapeur d'eau produite. • Le PCI représente le dégagement de chaleur lors de leur combustion sans inclure la condensation de la vapeur d'eau produite.
Électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Elle est produite dans des centrales hydrauliques, thermiques et nucléaires. • Les centrales thermiques utilisent la combustion des combustibles traditionnels pour produire de l'électricité. • Tous les types de centrales ont un générateur électrique qui consiste en un alternateur entraîné par une turbine.

Tableau 1.7 Caractéristiques particulières des combustibles traditionnels

Exemples de combustibles	Caractéristiques particulières
Mazout	<ul style="list-style-type: none"> • Il est obtenu par le raffinage du pétrole. • Il constitue le combustible pétrolier le moins cher. • Il doit être désulfuré (débarrassé du soufre qu'il contient) avant d'être utilisé.
Gaz naturel	<ul style="list-style-type: none"> • Il provient de gisements naturels (souterrains ou sous-marins). • Il est essentiellement constitué de méthane. • Il constitue le combustible le moins cher. • Il doit être désulfuré avant d'être utilisé.
Charbon	<ul style="list-style-type: none"> • Il provient de gisements naturels. • On distingue deux types de charbon : à coke et à vapeur. • Le charbon à coke est indispensable à la sidérurgie et à la métallurgie. • Le charbon à vapeur est indispensable pour la production de chaleur et d'électricité.

1.3 Extrants d'une production industrielle

1.3.1 Produits

Le résultat d'une production industrielle est un produit fini ou intermédiaire souhaité. Les productions industrielles liées aux produits organiques et minéraux les plus fabriqués au monde sont présentées dans les sept chapitres suivants de ce manuel. Malgré le maintien de conditions opératoires optimales pour la conduite d'un procédé industriel, certains produits indésirables sont générés en même temps que le produit d'intérêt. Ils sont aussi appelés « sous-produits » et ils peuvent être de différents types :

- › Les **sous-produits primaires** – ils sont obtenus par une ou plusieurs réactions parallèles et concurrentes à celle qui est souhaitée.
- › Les **sous-produits secondaires** – ils sont obtenus par la dégradation du produit d'intérêt.

La séparation du produit d'intérêt de tous les autres types de produits s'effectue au moyen d'un ou de plusieurs procédés de séparation (voir le [tableau 1.4](#)).

1.3.2 Déchets, émissions et produits hors spécification

Les **déchets industriels** sont constitués des résidus issus d'une production industrielle ou d'une utilisation quelconque. Ils n'ont aucune utilité et ne présentent aucune possibilité de recyclage; ils doivent donc être éliminés dans l'intérêt de la protection de l'environnement et de la santé publique. Parmi eux, on peut citer les matières corrosives, nocives, toxiques, comburantes, explosibles, inflammables, irritantes, cancérogènes, etc. Selon leur nature et leurs caractéristiques physico-chimiques, les déchets peuvent être traités de différentes manières :

- › Incinération, co-incinération
- › Pyrolyse
- › Neutralisation
- › Traitement biologique
- › Stockage par enfouissement
- › Épandage
- › Stabilisation

Les **émissions** résultent de la production de différents composants (gaz à effet de serre, par exemple), de chaleur, de bruit ou de vibrations qui se dispersent dans l'air, l'eau ou le sol; elles sont donc polluantes.

Plusieurs directives et réglementations relatives aux émissions industrielles ont été élaborées et imposées aux industries au fil des années afin de prévenir, de réduire et, dans la mesure du possible, d'éliminer la pollution due aux productions industrielles.

Les **produits hors spécification** sont définis comme des produits non conformes selon les règles de contrôle de la qualité. Ces rejets sont très divers, tout comme les produits fabriqués mondialement et ils peuvent être solides ou liquides. L'optimisation d'une production industrielle vise entre autres la diminution maximale à la source du nombre ou du volume de rejets. Lorsqu'ils sont le résultat d'une production industrielle, les rejets peuvent être soit valorisés, soit recyclés, sinon ils sont incinérés ou détruits de manière spécifique.

1.4 Caractérisation d'une production industrielle

L'efficacité et les performances d'une production industrielle sont exprimées en fonction de la quantité et de la qualité de produit fini ou intermédiaire qu'elle est capable de fournir sur une période donnée. Parmi les caractéristiques et les paramètres vérifiables et mesurables qui permettent de caractériser l'efficacité d'une production industrielle, on peut compter la qualité de la production, le rendement et la productivité. Les notions liées à la qualité d'une production industrielle sont très vastes, il est donc difficile de les couvrir toutes dans le présent manuel. Dans ce qui suit, nous présentons la notion de qualité industrielle d'une manière très succincte.

1.4.1 Qualité

Quelle que soit la production industrielle, elle doit fournir des produits finis ou intermédiaires qui satisfont aux exigences de la clientèle. La qualité industrielle suppose la mise en place d'une production qui contribuera à rendre tous les produits fabriqués conformes à un standard. Il s'agit donc d'une démarche qui vise à limiter les rejets et à éliminer les défauts en veillant à ce qu'un protocole expérimental soit en conformité avec des standards (ou des normes) dans le but de répondre aux attentes et aux besoins de la clientèle.

La qualité industrielle affecte toutes les facettes de la fabrication industrielle. Elle peut être décomposée en trois axes :

- › La **conception de la production** – la qualité d'un produit peut être améliorée à sa conception grâce à l'emploi de matières premières de qualité et d'une méthode optimale de fabrication.
- › Le **contrôle-qualité des produits fabriqués** – il consiste à mettre en place un ensemble de procédures visant à mesurer et à comparer de manière constante la conformité des produits à leurs spécifications ou à un standard (norme) de qualité. Cette comparaison d'un produit avec une norme précise est l'étape qui suit sa fabrication.
- › La **gestion de la qualité** – par l'intermédiaire de normes précises, elle englobe tout ce qu'une unité de production met en œuvre pour gérer ses procédés et ses activités.



Une **norme** est une référence qui est établie par un organisme national ou international de normalisation et qui énonce les règles à suivre. L'Organisation internationale de normalisation (ISO) est le principal organisme mondial non gouvernemental qui gère les normes internationales. La série des normes ISO 9000 est la plus connue. Elle est appliquée dans le monde entier et fournit les lignes directrices et les outils pour la gestion de la qualité d'une entreprise ainsi que les modèles d'assurance de la qualité pour les relations entre l'unité de production et ses clients.

Toutes les usines qui fabriquent des produits entrant en contact avec l'être humain (médicaments, cosmétiques, produits agroalimentaires) doivent respecter les **bonnes pratiques de fabrication** (BPF), aussi appelées *good manufacturing practices* (GMP) en anglais. Les BPF font référence aux pratiques d'hygiène et d'organisation devant être mises en place à tous les niveaux d'une production industrielle afin de limiter les risques de contamination croisée et la confusion sur le plan de l'étiquetage et de l'identification des composants. On établit ces BPF en tenant compte des aspects suivants :

- 1) Gestion de la qualité
- 2) Assainissement et hygiène
- 3) Bâtiments et installations
- 4) Équipement
- 5) Matières premières
- 6) Personnel
- 7) Validation et qualification
- 8) Plaintes
- 9) Documentation et tenue de dossiers
- 10) Inspection et audits de qualité

1.4.2 Rendement

Le *rendement* d'une production industrielle est l'une des variables qui permettent d'évaluer sa performance, ce qui signifie le degré de transformation d'une matière première en produit fini ou intermédiaire. Il se calcule comme le rapport entre la quantité de produit d'intérêt obtenu et la quantité de matière première (réactif clé introduit dans la production) :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Qté de produit}}{\text{Qté de matière première}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

1.4.3 Productivité

La *productivité* d'une production industrielle est une deuxième variable qui permet d'évaluer sa performance, c'est-à-dire la quantité de produit fini ou intermédiaire fabriqué sur une période donnée. Elle se calcule comme le rapport entre la quantité de produit d'intérêt obtenu et le temps nécessaire pour obtenir cette quantité :

$$\text{Productivité} = \frac{\text{Qté de produit}}{\text{Temps de fabrication}} \quad (1.2)$$

1.5 Exercices

A Exercices de révision

- A.1** Combien de secteurs industriels existent au Canada, selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN)? Combien d'entre eux sont décrits dans ce manuel?
- A.2** Faites un schéma simplifié d'une production industrielle.
- A.3** Combien de types de procédés entrent en jeu dans le cadre d'une production industrielle? Nommez chacun d'entre eux.
- A.4** Nommez les avantages et les inconvénients d'une production industrielle en mode continu.
- A.5** Nommez les avantages et les inconvénients d'une production industrielle en mode discontinu.
- A.6** Quelle est la définition d'un procédé industriel?
- A.7** Quels sont les critères dont il faut tenir compte dans la conception d'un nouveau procédé ou la modification d'un procédé existant?
- A.8** Qu'est-ce qu'un procédé de conditionnement? Donnez-en quelques exemples.
- A.9** Qu'est-ce qu'un procédé de fabrication? Donnez-en quelques exemples.
- A.10** Qu'est-ce qu'un procédé de séparation? Donnez-en quelques exemples.
- A.11** Nommez les trois étapes d'industrialisation d'un procédé?
- A.12** Nommez les intrants d'une production industrielle.
- A.13** Nommez les extrants d'une production industrielle.
- A.14** Nommez les trois paramètres utilisés pour caractériser une production industrielle.
- A.15** Quelle est la différence entre la productivité et le rendement d'une production industrielle?

B Exercices de réflexion

- B.1** Quelle est la différence entre un schéma de procédé et un schéma P&ID?
- B.2** Quelles sont les deux sources d'énergie traditionnelles les plus utilisées par les productions industrielles. Pourquoi le sont-elles?
- B.3** Nommez les trois matières premières naturelles organiques épuisables. Pourquoi ces matières sont-elles considérées comme étant épuisables?
- B.4** Pour caractériser une production industrielle, serait-il plus significatif de calculer son rendement ou sa productivité?

Chapitre 2

Productions pétrolières



Oléoduc (pipeline) qui lie le terminal maritime de Lévis à la raffinerie de Valero

Sommaire

2.1 Introduction	22
2.1.1 Définitions et terminologie	22
2.1.2 Origine, extraction et prétraitement du pétrole	23
2.1.3 Composition du pétrole	26
2.2 Produits pétroliers	28
2.2.1 Combustible d'un moteur à essence	30
2.2.2 Combustible d'un moteur diesel	32
2.3 Raffinage du pétrole	32
2.3.1 Distillation atmosphérique et distillation sous vide	32
2.3.2 Craquage catalytique et thermique	37
2.3.3 Hydrocraquage	40
2.3.4 Reformage catalytique	42
2.3.5 Isomérisation	44
2.3.6 Procédés de synthèse	46
2.4 Productions industrielles	48
2.4.1 Exemples de productions industrielles	48
2.4.2 Fabrication des huiles	50
2.5 Exercices	52

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous traiterons de la principale source d'énergie et de matières premières pour l'industrie chimique de notre civilisation : le pétrole. Après avoir présenté les définitions et la terminologie propres à l'industrie pétrolière, nous exposerons l'origine, les caractéristiques ainsi que les opérations de prétraitement du pétrole. Ensuite, nous détaillerons les nombreux procédés utilisés pour son raffinage : la distillation, la conversion chimique et la finition. Enfin, nous aborderons les productions et les applications industrielles liées aux produits pétroliers, à l'exception de la production de bases pour la pétrochimie, qui feront l'objet d'un autre chapitre du présent manuel. Pour terminer, afin de permettre la mise en pratique des notions théoriques liées à la caractérisation, à l'exploitation et à la transformation du pétrole, des questions de révision, de réflexion et d'application sont proposées.

2.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique à la production pétrolière et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Carburant* = combustible utilisé dans les moteurs à explosion;
- › *Combustible* = matière qui brûle en présence d'oxygène et produit de l'énergie;
- › *Coupes pétrolières* = fractions issues de la distillation du pétrole brut et classées en fonction de leur température d'ébullition ou de leur masse molaire;
- › *Craquage catalytique* = procédé qui consiste à briser les chaînes d'hydrocarbures au moyen d'un catalyseur;
- › *Craquage thermique* = procédé de rupture des molécules d'hydrocarbures sous la seule influence de la température;
- › *Distillation atmosphérique* = fractionnement, à pression atmosphérique, des constituants d'un mélange liquide homogène en fonction de leur volatilité;
- › *Distillation sous vide* = fractionnement, sous pression réduite (*vide*), des constituants d'un mélange liquide homogène en fonction de leur volatilité;
- › *Hydrocraquage* = hydrotraitement appliqué aux fractions pétrolières à haut poids moléculaire dans le but de produire des coupes à bas point d'ébullition;
- › *Indice d'octane* = IO = résistance à l'auto-allumage (détonation spontanée) des carburants utilisés dans les moteurs à allumage commandé;
- › *Indice de cétane* = capacité d'auto-inflammation des carburants utilisés dans les moteurs diesels;
- › *Isomérisation* = procédé qui permet d'améliorer l'indice d'octane d'essences légères contenant des hydrocarbures composés de 5 ou 6 atomes de carbone;
- › *Pétrole brut* = roche carbonée liquide ou huile minérale d'origine fossile;
- › *Raffinage du pétrole* = procédé industriel de fractionnement et de transformation du pétrole brut en divers produits finis : carburants, combustibles, solvants, etc.;
- › *Raffinerie* = usine où est effectué le raffinage d'une matière brute dans le but de la transformer en produits finis ou de la purifier;
- › *Rectification* = distillation fractionnée d'un mélange liquide homogène accompagnée d'un reflux des fractions légères en tête de colonne de distillation;
- › *Reformage catalytique* = procédé de transformation d'une essence lourde de première distillation en un carburant à indice d'octane élevé;
- › *Stripage* = extraction des composants volatils d'une coupe pétrolière par entraînement au moyen d'un gaz (la vapeur d'eau, le plus souvent).

2.1.2 Origine, extraction et prétraitement du pétrole

Origine du pétrole

La formation du pétrole remonte à des millions d'années et elle est due à l'enfouissement puis à la dégradation lente de la matière organique d'origine végétale et animale. Sous l'action combinée de bactéries anaérobies ainsi que de températures et de pressions considérables causées par l'accumulation de nombreuses couches de sédimentation, les débris riches en matières organiques se sont transformés en pétrole.

D'un point de vue chimique, le pétrole est considéré comme un mélange très complexe d'un nombre pratiquement infini de constituants (contenant du carbone, de l'hydrogène, de l'azote, de l'oxygène, du soufre, des métaux, etc.) qui proviennent de la décomposition d'organismes marins ayant vécu il y a plusieurs millions d'années. La nature et la composition du pétrole sont liées à son origine géographique, c'est-à-dire son lieu d'extraction. Il existe donc actuellement une centaine de pétroles bruts différents sur le marché. Les variations dans les conditions de formation du pétrole brut d'une région à l'autre font en sorte que ses propriétés fluctuent, elles aussi. Par exemple, sa consistance et sa couleur peuvent aller d'épais et noir à fluide et doré, et sa teneur en impuretés (soufre et eau) peut varier considérablement. Ces différences déterminent l'importance du travail de raffinage qui sera nécessaire pour transformer le pétrole brut en produits prêts à l'emploi.

Extraction du pétrole

Le pétrole brut est issu de l'exploitation d'un puits. On l'en extrait à l'aide de diverses méthodes qui sont dictées par les facteurs géologiques. Le pétrole brut classique d'origine terrestre ou extracôtier est extrait de ses gisements souterrains au moyen des méthodes traditionnelles de forage et de pompage vertical. Sa récupération de la roche-réservoir se fait le plus couramment par injection, de vapeur d'eau ou de gaz, ou par pompage. L'injection de vapeur d'eau a comme objectif de réchauffer le pétrole captif et de le fluidifier afin d'en faciliter l'écoulement. Elle favorise aussi le maintien d'une pression élevée dans le réservoir et permet ainsi l'expulsion du pétrole à la surface. Une représentation schématique du processus d'extraction du pétrole classique de gisements souterrains terrestres est présentée à la [figure 2.1](#).

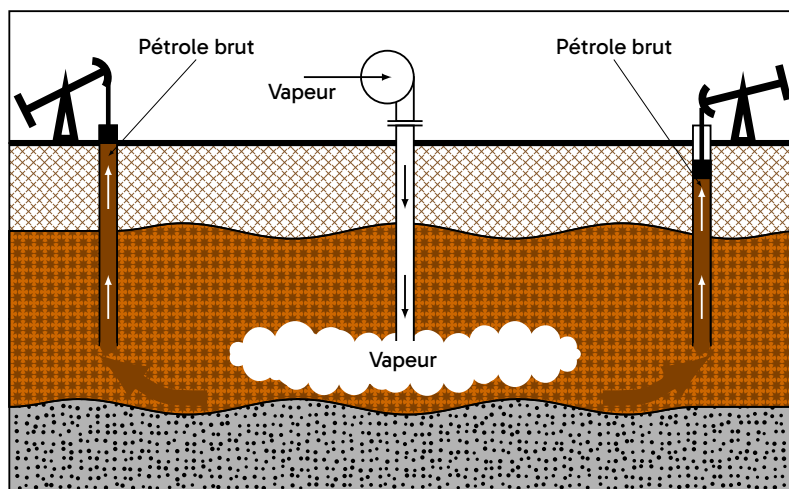


Figure 2.1 Schéma de principe de l'extraction du pétrole brut classique

Le pétrole non classique est piégé dans les sables bitumineux, des formations géologiques qui rendent difficile son extraction. Pour l'y récupérer, selon la profondeur de ces gisements dans le sol, l'industrie fait appel à deux méthodes spécifiques :

- › l'extraction minière à ciel ouvert (quand les bitumes se trouvent près de la surface);
- › la récupération *in situ*. L'extraction minière à ciel ouvert consiste à creuser le sol et à le broyer, tout en y incorporant de l'eau pour ensuite pomper ce mélange vers l'unité d'extraction qui sépare le bitume du mélange de sable et d'argile.

La récupération *in situ* consiste à creuser deux puits horizontaux qui sont décalés en hauteur, pour ensuite injecter de la vapeur d'eau dans le puits supérieur. Au fur et à mesure que la température augmente dans ce puits, le bitume se fluidifie et s'écoule vers le puits inférieur, d'où il sera récupéré par pompage vertical.

Selon les données statistiques publiées par l'Agence d'information sur l'énergie des États-Unis pour l'année 2022, les dix principaux producteurs de pétrole et leurs productions quotidiennes sont ceux présentés à la **figure 2.2**.

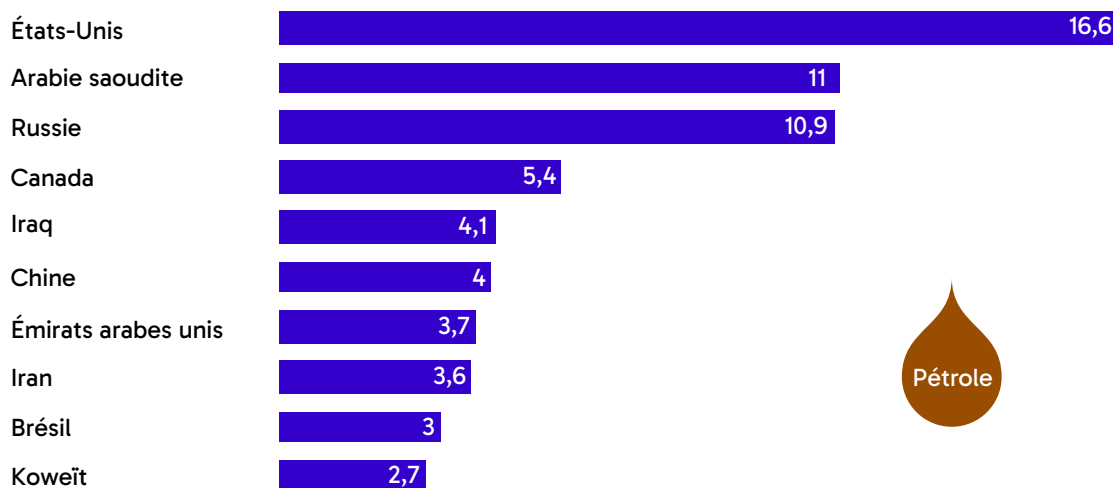


Figure 2.2 Volume d'extraction de pétrole (en millions de barils par jour) des dix plus grands producteurs mondiaux

Prétraitement du pétrole

Le pétrole brut, lorsqu'il est extrait d'un gisement, est accompagné de gaz et d'eau salée. Sur les champs pétroliers, afin de réduire les risques d'incendie et les pertes liées à la manutention, on procède à la stabilisation du pétrole brut par dégazage et décantation de l'eau pour ne conserver que la fraction d'huile liquide avant de procéder à son transport vers la raffinerie. Malgré ce prétraitement, une faible quantité d'eau salée y reste en suspension sous forme d'émulsion, ce qui représente environ de 2 à 4 grammes de sel (NaCl) par tonne de pétrole. Le sel, durant la distillation du pétrole brut, produit de l'acide chlorhydrique (HCl), un produit corrosif pour l'unité industrielle de raffinage qui nuit également à l'utilisation ultérieure des produits pétroliers.

L'opération de dessalage s'effectue dans un extracteur de saumure (figure 2.3); elle est effectuée en ajoutant de l'eau au pétrole brut chauffé à une température de 70 à 90 °C. L'eau salée est ensuite séparée à l'aide d'un décanteur soumis à un champ électrique qui favorise la coalescence (formation) des gouttes. La phase aqueuse salée, plus dense que la phase organique (pétrole), s'accumule dans la partie inférieure de l'extracteur et elle est acheminée au bassin du système de traitement de l'eau. L'opération de dessalage peut éliminer jusqu'à 95% du sel contenu dans le pétrole brut. Les 5% restants sont extraits à la raffinerie, avant le début du raffinage par distillation.

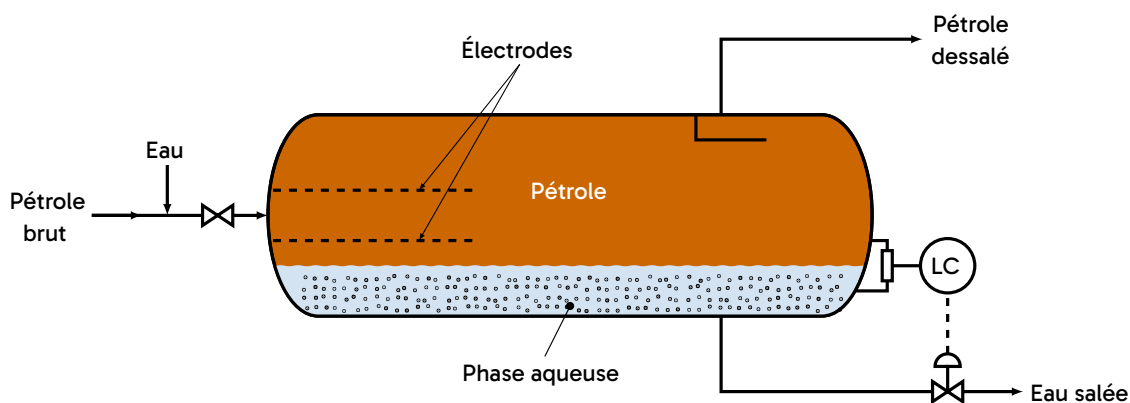


Figure 2.3 Schéma d'un extracteur de saumure permettant le dessalage du pétrole brut

Le pétrole brut n'est pas considéré comme un carburant et il n'a aucune réelle utilité tel quel. Étant donné qu'il est constitué d'un mélange de divers combustibles fossiles, il faut lui faire subir des séparations, des transformations et des traitements afin d'obtenir des produits à usage commercial comme l'essence, le carburant diesel, le mazout, le kérosène, etc. Cette succession d'opérations s'appelle le « raffinage du pétrole » et elle sera traitée à la [section 2.3](#).

2.1.3 Composition du pétrole

Les pétroles bruts sont majoritairement composés d'hydrocarbures (substances formées de carbone et d'hydrogène), des plus légers (gazeux) aux plus lourds (solides à haute teneur en carbone). Dans tous les pétroles bruts, on trouve également, en quantité plus faible et variable, des composés organiques azotés, oxygénés et soufrés ainsi que des traces de métaux. La littérature spécialisée est unanime : tous les pétroles comportent quatre familles de composants chimiques dont les proportions varient selon le lieu de provenance du brut. Le **tableau 2.1** présente les structures de ces quatre familles chimiques.

Tableau 2.1 Composition chimique du pétrole brut

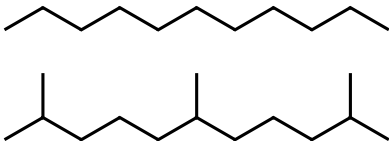
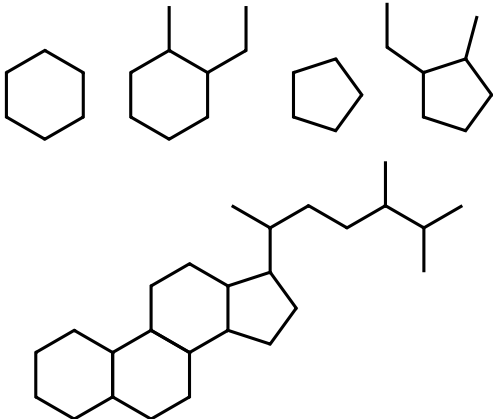
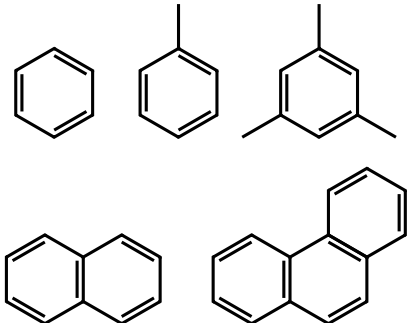
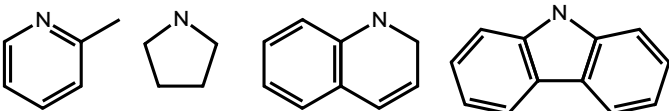
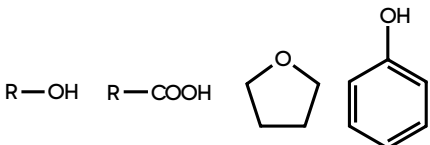
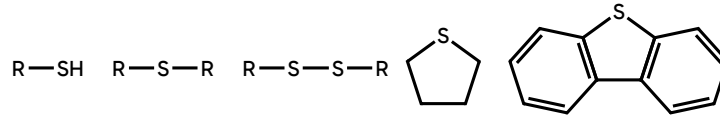
Famille	Composants	Structures
I	Alcane linéaires ou paraffines Alcane ramifiés ou isoparaffines	
II	Cycloalcanes, ou naphènes	
III	Hydrocarbures aromatiques	

Tableau 2.1 Composition chimique du pétrole brut (*suite*)

Famille	Composants	Structures
IV	Composés azotés, oxygénés et soufrés	Composés azotés
		 Pyridine Pyrrole Quinoline Carbazole
		Composés oxygénés
		 Alcools Acides Furane Phénol
		Composés soufrés
		 Mercaptans Sulfures Disulfures Thiophène Dibenzothiophène

Le pétrole brut est essentiellement composé d'hydrocarbures (familles chimiques I, II et III) et, en plus faible proportion, de produits azotés, oxygénés et soufrés (famille chimique IV). Les composés organométalliques à base de nickel, de fer, de vanadium, etc. n'ont pas été listés dans le [tableau 2.1](#), car ils se retrouvent seulement à l'état de traces dans le pétrole brut. On ne trouve pas, à l'état naturel, d'hydrocarbures de type éthylénique ($-C=C-$) ni acétylénique ($-C\equiv C-$) en raison de leur instabilité.

En conclusion, dans le pétrole brut n'existent que des structures moléculaires appartenant aux familles chimiques I à IV, qui sont intéressantes pour leurs propriétés mais ne répondent pas en totalité aux spécifications du marché. Le raffineur aura donc la tâche d'effectuer des modifications et traitements divers sur les composants du pétrole brut afin de faire apparaître des combinaisons moléculaires qui peuvent garantir l'atteinte des spécifications propres à la fonction à laquelle on le destine (carburant, combustible, etc.).

2.2 Produits pétroliers

Une raffinerie est un ensemble industriel complexe qui fabrique en général trois catégories de produits :

- › Des **produits finis**, prêts à être employés pour les usages courants
- › Des **produits semi-finis**, qui servent de bases à des mélanges ultérieurs et nécessitent qu'on leur fasse subir des transformations supplémentaires pour en parfaire la qualité
- › Des **sous-produits** ou des produits intermédiaires, qui servent comme matières premières pour la pétrochimie

Les carburants et les combustibles constituent environ 80% des produits issus du traitement du pétrole. Le reste est composé de produits spécifiques tels que des lubrifiants, des solvants ou des matières plastiques. Les produits issus du raffinage du pétrole peuvent être classés selon leur poids moléculaire moyen ou leur point d'ébullition. Dans le **tableau 2.2**, les catégories sont énumérées dans un ordre croissant (en fonction de leur température d'ébullition).

Tableau 2.2 Classification des produits pétroliers selon leur composition et leur température d'ébullition

No	Produits pétroliers	Composition	T. d'ébullition (°C)
1	Gaz	H ₂ et C ₁ à C ₃	–
2	Gaz liquéfié	C ₃ et C ₄	< 50
3	Essences légères	C ₃ à C ₈	40 – 180
4	Essences lourdes	C ₇ à C ₁₀	
5	Kérosène	C ₁₀ à C ₁₄	180 – 230
6	Gazole		
7	Mazout léger	C ₁₃ à C ₁₇	230 – 305
8	Mazout lourd		
9	Huiles	C ₁₈ à C ₂₅	305 – 405
10	Paraffine et cires	C ₂₆ à C ₃₈	405 – 515
11	Asphalte (bitume)	C ₃₈ à C ₄₀	–

Les produits issus du raffinage du pétrole doivent répondre à un certain nombre d'exigences, appelées « spécifications », concernant leurs propriétés ou leurs qualités. Par exemple, un **carburant** destiné à alimenter un moteur automobile doit respecter plusieurs caractéristiques précises, comme une masse volumique maximale, des valeurs de points d'ébullition initiale et finale qui définissent la fraction ainsi que des points d'ébullition intermédiaires. L'ensemble de ces caractéristiques constitue ce que l'on nomme la « courbe de distillation limite ». De plus, un seuil maximal de teneur en soufre ainsi qu'un indice de performance particulier, l'indice d'octane, doivent être respectés afin que la qualité du carburant corresponde aux normes.

Pour un **combustible**, mis à part les critères de point d'ébullition, on a fixé une valeur de viscosité, un point d'écoulement (ou de congélation) et une teneur en soufre qui doivent être respectés.

L'ensemble de ces spécifications ont été déterminées dans le cadre d'une large concertation internationale et elles sont soumises à des normes, à des méthodes et à des appareillages qui permettent de les mesurer afin d'assurer une parfaite conformité, quels que soient l'opérateur et le lieu de conception des produits testés.

Typiquement, la courbe de distillation d'une essence (figure 2.4) présente les caractéristiques suivantes :

- › Elle est définie par un point final inférieur ou égal à 215 °C.
- › Un volume de 10 % de l'essence est distillé avant 70 °C.
- › Entre 40 % et 70 % en volume de l'essence est distillé avant 100 °C.
- › Un volume de 90 % de l'essence est distillé avant 210 °C.

Ces normes contraignantes servent à assurer le bon fonctionnement des moteurs : il est nécessaire d'avoir un certain pourcentage de produits très légers facilement vaporisables, contrôlé par le point des 10 %, qui conditionne le départ à froid des moteurs. Les butanes sont responsables en majeure partie de la tension de vapeur de l'essence.

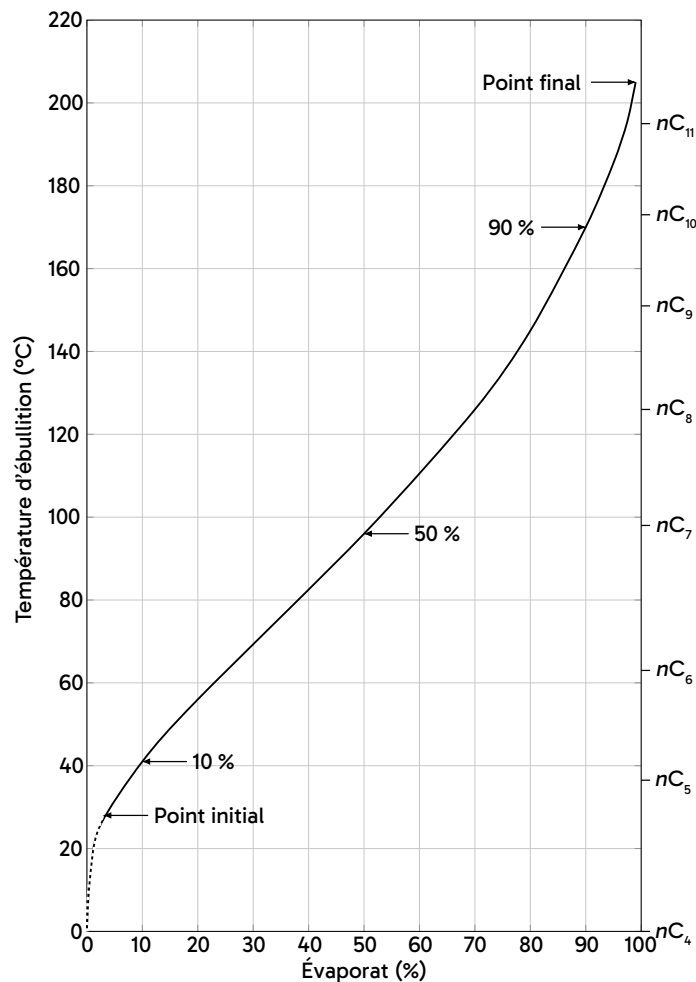


Figure 2.4 Courbe typique de la distillation d'une essence

2.2.1 Combustible d'un moteur à essence

Soumis aux conditions idéales, dans les cylindres d'un moteur à combustion, le combustible est complètement transformé en CO_2 et en H_2O :



Normalement, dans des conditions favorables de fonctionnement, la combustion est assez avancée, mais les gaz d'échappement renferment quand même du CO et d'autres composés d'oxydation partielle.

Le fonctionnement d'un moteur à combustion (figure 2.5) est assuré par un cycle à quatre étapes :

- 1) L'admission
- 2) L'allumage
- 3) La combustion
- 4) L'échappement

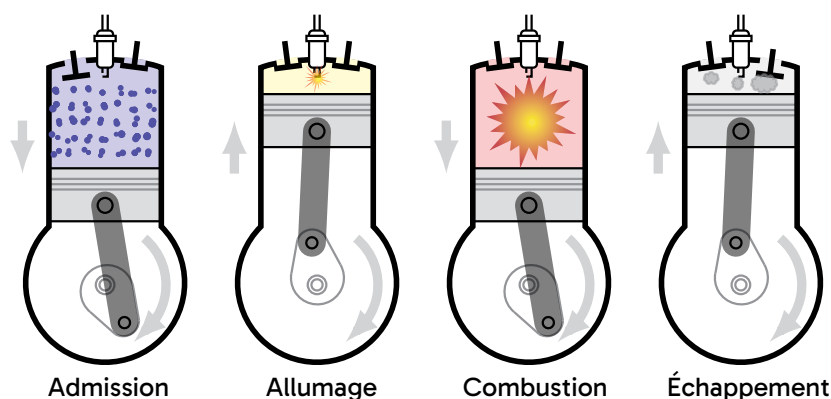


Figure 2.5 Schéma du cycle de fonctionnement d'un moteur à combustion

- 1) L'**admission** – Lorsque le piston descend dans le cylindre, la soupape d'admission s'ouvre, ce qui fait entrer un mélange de vapeur d'essence et d'air provenant du carburateur.
- 2) La **compression** – Pendant que le piston se déplace vers le haut, la soupape d'admission se ferme, ce qui scelle le cylindre. Le mélange d'air et de carburant est comprimé et, lorsque le piston est presque en fin de course, la bougie produit une étincelle qui allume le mélange dans lequel l'essence est partiellement à l'état de gaz et partiellement à l'état de fines gouttelettes.
- 3) L'**allumage** – Il produit un volume assez considérable de gaz qui, en se dilatant, exerce une forte poussée sur le piston et le fait redescendre.
- 4) L'**échappement** – Pendant que le piston remonte, la soupape d'échappement s'ouvre, et le mélange d'air et de carburant brûlé est expulsé du cylindre.

Pour qu'un moteur à combustion fonctionne efficacement, l'essence doit posséder deux caractéristiques importantes :

- 1) Elle doit avoir une juste volatilité, afin de s'enflammer promptement au moment où le volume d'essence à l'état gazeux est minime au sommet du cylindre.
- 2) La combustion du mélange doit se produire exactement à la vitesse voulue pour exercer une poussée douce et graduelle sur le piston lorsqu'il redescend; une combustion trop rapide produit une détonation qui génère une onde de choc et fait cogner le moteur.

Des études ont montré qu'il y a une relation étroite entre le comportement des hydrocarbures et leur structure chimique. Il a été observé et démontré que le pouvoir antidétonant des paraffines est mauvais, mais qu'il est excellent pour les isoparaffines et les hydrocarbures aromatiques. Les oléfines et les naphthènes ont un comportement intermédiaire. Ces constatations sont illustrées à l'aide du schéma présenté à la **figure 2.6** et elles ont conduit à la définition de l'**indice d'octane**.

Paraffines < [Oléfines = Cycloalcanes] < [Isoparaffines = Aromatiques]

Indice d'octane

Figure 2.6 Indice d'octane de différents hydrocarbures

L'indice d'octane est défini comme étant la résistance à l'auto-allumage (détonation spontanée) des carburants utilisés dans les moteurs à allumage commandé. Il est étroitement lié au rendement d'une essence. Pour le définir, les raffineurs ont choisi deux carburants qui servent de référence pour leur comportement extrême en ce qui concerne leur résistance à l'auto-allumage :

- › l'**heptane normal** (alcane linéaire à 7 atomes de carbone), qui est très détonant et auquel on a conventionnellement attribué la valeur de 0 pour l'indice d'octane;
- › l'**isooctane** (2,2,4-triméthylpentane), qui est réfractaire à la détonation et auquel on a attribué la valeur maximale de 100 pour l'indice d'octane.

La valeur du pouvoir antidétonant d'une essence correspond au pourcentage d'isooctane qu'il faut mélanger à l'heptane normal pour atteindre le rendement d'essence voulu. Une essence ayant un indice d'octane de 95 est composée d'un mélange de 95% d'isooctane et de 5% d'heptane normal.

Lorsqu'elle sort de la raffinerie, l'essence a en général un indice d'octane insuffisant pour pouvoir être utilisée. La pratique industrielle a permis de découvrir qu'il existe des additifs qui permettent d'améliorer l'indice d'octane d'une essence. Pendant longtemps, ces additifs ont été exclusivement des composés à base de plomb (tel que le *tétraméthylplomb* et le *tétraéthylplomb*), d'où l'ancienne appellation « essence au plomb ». Mais le plomb est un métal lourd préjudiciable à la santé. De plus, il est nocif pour les catalyseurs à base de platine que l'on trouve dans les pots catalytiques destinés à diminuer la pollution due aux gaz d'échappement. Aujourd'hui, les principaux additifs utilisés pour améliorer l'indice d'octane d'une essence sont les alcools et les éthers. Les trois représentants des alcools sont : le *méthanol*, l'*éthanol* et l'*alcool tertiobutylique*. Les deux principaux représentants des éthers sont le *méthyl-tert-butyléther* (MTBE) et le *tertioamylméthyléther* (TAME). Parmi les additifs mentionnés ci-dessus, le MTBE est celui qui est actuellement le plus apprécié et le plus employé par l'industrie pétrolière pour ses performances : indice d'octane élevé, faible tension de vapeur et excellente compatibilité avec l'essence.

2.2.2 Combustible d'un moteur diesel

Contrairement au moteur à allumage, dans un moteur diesel, l'air est d'abord aspiré seul dans le cylindre, puis comprimé dans un second temps avec plus de force que dans les moteurs à essence. La compression rapide de l'air fait monter sa température à environ 300 °C. Le combustible est alors injecté dans le cylindre à l'état pulvérisé, et l'allumage se produit spontanément. Le dernier temps correspond à l'échappement des gaz de combustion.

Pour un moteur diesel, le carburant doit donc avoir une meilleure aptitude à l'auto-inflammation, à l'inverse d'une essence automobile. Afin d'évaluer la performance d'un combustible diesel, on doit utiliser un autre indice que l'indice d'octane, appelé « indice de cétane ». Pour le définir, on choisit deux carburants étalons :

- le cétane normal (*n*-hexadécane), qui provoque une excellente combustion dans le moteur diesel et auquel la valeur de 100 a été attribuée;
- l'alphaméthylnaphtalène, qui s'allume très lentement et auquel a été attribuée la valeur de 0. On dit qu'un carburant a pour indice de cétane x s'il présente le même pouvoir d'auto-inflammation que le mélange de $x\%$ en volume de (1) et de $(100-x)\%$ de (2). Le carburant pour moteur diesel porte le nom de « gazole » et il présente un indice de cétane voisin de 50.

2.3 Raffinage du pétrole

2.3.1 Distillation atmosphérique et distillation sous vide

Pour être d'une quelconque utilité, le pétrole doit être soumis à divers traitements dans une raffinerie. Le raffinage comprend essentiellement trois étapes :

- 1) La séparation du pétrole brut en fractions (distillation)
- 2) La transformation chimique de certaines fractions
- 3) Les traitements d'épuration

La distillation consiste à porter le mélange liquide à ébullition, puis à en condenser les vapeurs. Les constituants ainsi obtenus s'appellent des « fractions », ou « coupes ».

Une unité complète de distillation du pétrole brut est schématisée à la **figure 2.7**. Elle est constituée de plusieurs parties :

- a) Un dessaleur (1) pour enlever le sel
- b) Deux fours (2 et 7) pour chauffer, respectivement, le pétrole brut et le résidu de la colonne atmosphérique
- c) Deux colonnes de distillation à plateaux : une à pression atmosphérique (3) et une sous vide (ou à basse pression) (8)
- d) Cinq colonnes de stripage (4-6, 9 et 10)

Après le dessalage (1), le pétrole brut passe dans un four (2), ou bouilloire, dans lequel il est chauffé à une température de 350 à 380 °C. Par la suite, il est envoyé dans une colonne de distillation atmosphérique continue (3), appelée « tour de fractionnement », dans laquelle s'effectue la séparation des constituants en fractions ainsi que leur soutirage latéral. Les fractions les plus légères (celles dont le point d'ébullition est le moins élevé), se retrouvent en haut de la colonne, alors que les plus lourdes demeurent en bas, comme résidu; les produits intermédiaires se situent entre les deux, selon leur point d'ébullition. La colonne est réglée de telle manière que la température à sa tête se situe aux environs de 70 °C et celle au fond, entre 370 et 380 °C.

Il s'y effectue un échange continu entre la vapeur (ascendante) et le liquide (descendant) qui provient de la condensation d'une partie de la vapeur. Cet échange est favorisé par les dispositifs à plateaux dont est munie la colonne. L'industrie utilise entre 30 et 50 plateaux pour mener ce genre de distillation. Les fractions obtenues dans la colonne de distillation atmosphérique (3) sont les suivantes :

- 1) En tête de colonne, on retrouve une fraction légère, constituée d'une essence légère et de gaz.
- 2) À divers niveaux, on retrouve les fractions d'essence (naphta), de kérosène (pétrole lampant), de gazole et d'huile minérale légère.
- 3) En fond de colonne, on obtient un résidu qui peut s'utiliser dans la préparation des mazouts lourds ou alimenter une deuxième colonne, celle-là fonctionnant sous vide.

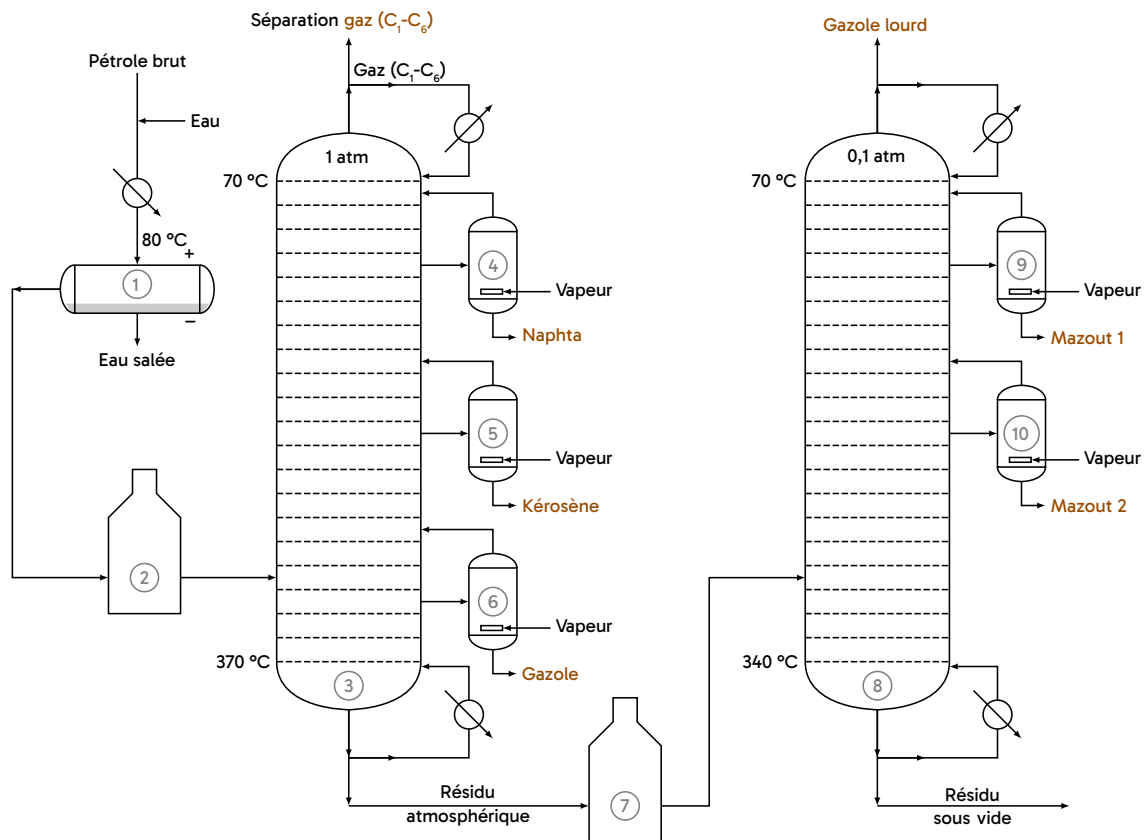


Figure 2.7 Représentation schématique d'une unité de distillation du pétrole

Toutes les fractions obtenues par distillation atmosphérique doivent subir un traitement supplémentaire dans d'autres unités avant de pouvoir être utilisées comme produits finis.

- 1) **Le traitement de la fraction légère** – Cette fraction est refroidie dans un condenseur placé en tête de colonne : une partie du condensat est réintroduite dans la colonne comme reflux, l'autre partie est traitée dans une série de trois colonnes à corps de remplissage successives pour séparer les fractions de C_1 à C_6 .
- 2) **Le traitement des fractions intermédiaires** – Les fractions prélevées à différents niveaux de la colonne entraînent avec elles une certaine quantité de produits volatils qui doivent être réintroduits dans la colonne. À cet effet, avant d'être récupérées dans des réservoirs de stockage, elles sont traitées par injection de vapeur dans les colonnes de stripage indépendantes (4 à 6, 9 et 10), ce qui permet d'entraîner les produits les plus volatils et de les recirculer dans la colonne de distillation atmosphérique. Les fractions intéressantes sont stockées jusqu'à leurs traitements ultérieurs dans les unités de transformation de la raffinerie.
- 3) **Le traitement du résidu atmosphérique** – Le résidu de distillation à pression atmosphérique peut être soumis au fractionnement, en totalité ou en partie, dans une nouvelle colonne qui, elle, opère sous vide à des températures comprises entre 70 et 350 °C. À la suite de cette deuxième distillation, plusieurs fractions sont recueillies à divers niveaux de la colonne.

La figure 2.8 fournit une représentation schématique des intrants et des extrants pétroliers d'une colonne de distillation atmosphérique, ainsi que des opérations de pré- et post-traitement.

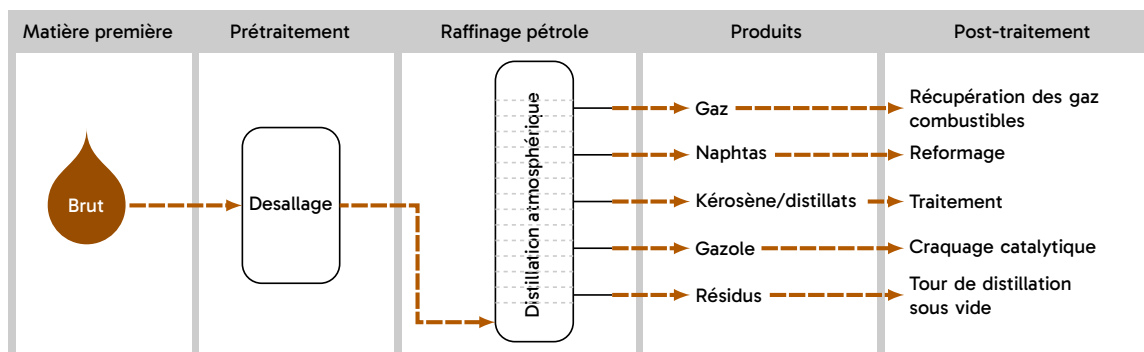


Figure 2.8 Schéma des intrants et des extrants de la distillation atmosphérique d'un pétrole brut ainsi que des opérations de pré- et post-traitement

La distillation sous vide (à pression réduite) est basée sur l'abaissement du point d'ébullition au moyen d'une diminution de la pression afin d'éviter la décomposition ou le craquage qui peuvent se produire à températures élevées. L'un des objectifs majeurs de cette méthode de distillation est de récupérer en tête de colonne le gazole lourd, qui pourra être converti en produits plus légers par un craquage catalytique. D'autres fractions, ainsi que le résidu sous vide, serviront de base à la constitution de mazouts lourds. La figure 2.9 fournit la représentation schématique des intrants et des extrants pétroliers d'une colonne de distillation sous vide, ainsi que des opérations de pré- et post-traitement.

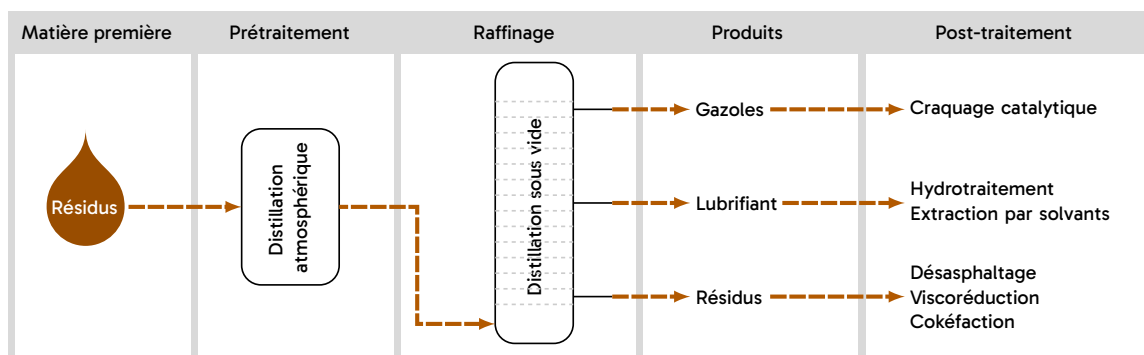


Figure 2.9 Schéma des intrants et des extrants de la distillation sous vide d'un pétrole brut ainsi que des opérations de pré- et post-traitement

Quoiqu'intéressantes, les fractions obtenues à la suite des processus de distillation atmosphérique et de distillation sous vide répondent rarement aux besoins du marché (voir le [tableau 2.3](#)).

Tableau 2.3 Bilan après une première distillation (atmosphérique et sous vide) du pétrole brut

Fractions	Quantité	Qualité
Gaz	Insuffisante	–
Essence légère	Insuffisante	Mauvais indice d'octane
Essence lourde	Insuffisante	Très mauvais indice d'octane
Kérosène	Indéterminée	Correct comme carburéacteur
Gazole	En excès	Nécessite un bon indice de cétane
Résidu atmosphérique	En excès	Correct pour usage comme mazout lourd
Distillat sous vide	Indéterminée	Indice de viscosité insuffisant et point de congélation trop élevé
Résidu sous vide	En excès	Correct pour usage comme asphalte

Par conséquent, il faut modifier la composition de ces fractions pour augmenter la proportion d'essence et en améliorer la qualité, car c'est le procédé le plus lucratif pour les compagnies pétrolières.

La modification de la structure chimique des composants contenus dans les fractions pétrolières en vue d'obtenir des produits plus recherchés se réalise dans les raffineries à l'aide des méthodes suivantes :

- › Le craquage catalytique et thermique
- › L'hydrocraquage
- › Le reformage catalytique
- › L'isomérisation
- › Les procédés de synthèse



2.3.2 Craquage catalytique et thermique

Craquage catalytique

La plupart des raffineries disposent d'unités de craquage dans le but de maximiser le rendement en essence ou en oléfines légères. Le craquage catalytique (*Fluid Catalytic Cracking – FCC*) est une opération de transformation chimique des fractions pétrolières issues du raffinage. Ses caractéristiques peuvent se résumer comme suit :

- › Son objectif principal est d'augmenter la quantité d'essence produite, mais aussi d'obtenir une essence oléfinique dont l'indice d'octane est meilleur que celui de l'essence obtenue par distillation.
- › Il permet de convertir les fractions lourdes (de type gazole) en fractions plus légères (de type essence) en brisant les chaînes carbonées des hydrocarbures.
- › Les réactions de craquage (rupture des liaisons C-C) sont endothermiques; elles ont donc besoin d'une température élevée pour se produire.
- › Les catalyseurs utilisés dans les premiers procédés industriels étaient solides et à base d'argile naturelle. Les essais visant à améliorer la conversion de l'essence et son rendement ont conduit à l'usage de catalyseurs de type *zéolithes*. Il s'agit d'aluminosilicates naturels ou de synthèse qui sont parfaitement cristallisés et qui ont des pores bien définies.
- › La chimie du craquage catalytique est très complexe. Elle fait intervenir un très grand nombre de réactions, dont les principales sont présentées au [tableau 2.4](#).

Tableau 2.4 Principales réactions de craquage catalytique

Réactifs	Réaction	Produits du craquage
Alcanes	$C_xH_{2x+2} \rightarrow C_yH_{2y} + C_zH_{2z+2}$ $x = y + z$	Un alcane de masse moléculaire inférieure à l'alcane de départ et une oléfine
Oléfines	$C_xH_{2x} \rightarrow C_yH_{2y} + C_zH_{2z}$ $x = y + z$	Deux nouvelles oléfines de masse moléculaire inférieure à l'oléfine de départ
Cycloalcanes	$Ar - C_xH_{2x+1} \rightarrow Ar - H + C_xH_{2x}$ $x = y + z$	Deux oléfines
Alkylaromatiques	$Ar - C_xH_{2x+1} \rightarrow Ar - H + C_xH_{2x}$ $x = y + z$	Un aromatique et une oléfine

Procédé industriel de craquage catalytique

Un schéma simplifié d'une unité de craquage catalytique est illustré à la figure 2.10. Il comporte les éléments suivants :

- › Un réacteur de type tube éleveur (1), dans lequel se réalise le craquage
- › Un réacteur de type régénérateur (2), qui sert à régénérer le catalyseur usé
- › Un désorbeur (3), qui sert à désorber la plus grande quantité possible d'hydrocarbure fixé sur le catalyseur
- › Deux cyclones (4 et 5), qui permettent la séparation du catalyseur et des gaz (réactifs non transformés, vapeur d'eau et produits du craquage)
- › Une colonne de distillation (6), qui sépare les divers produits du craquage

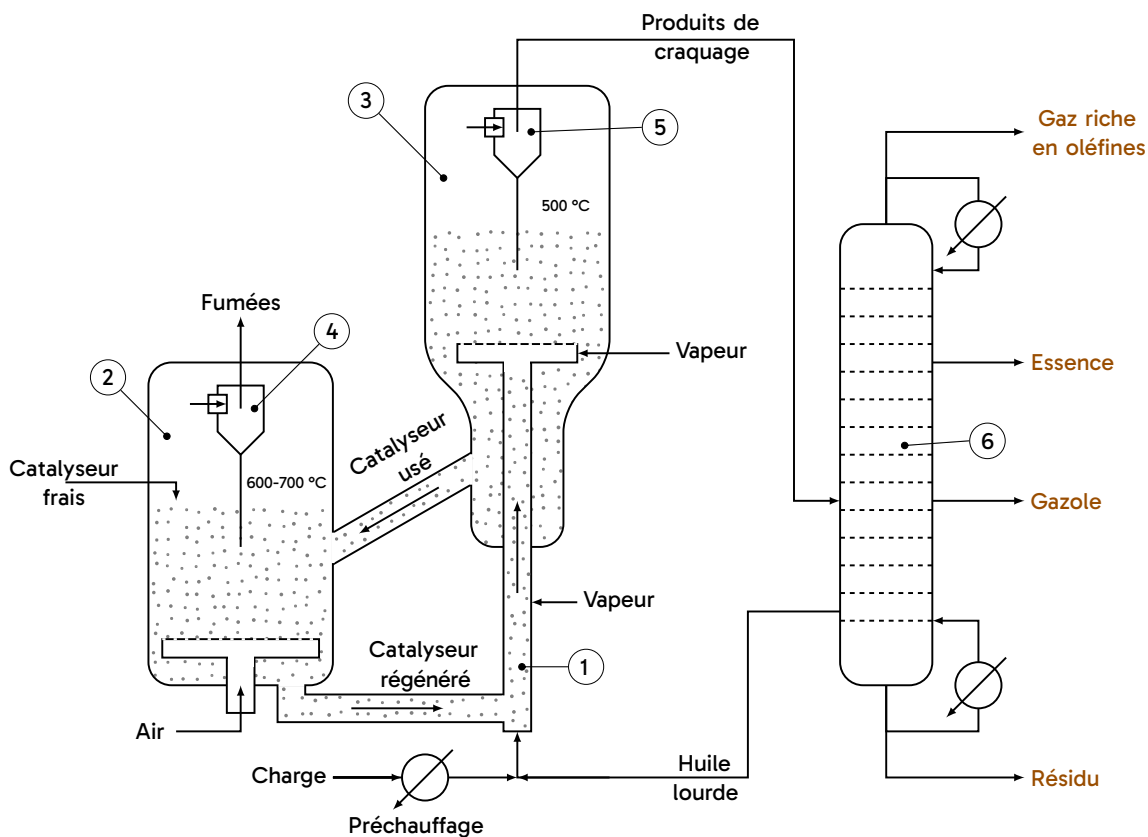


Figure 2.10 Schéma d'une unité de craquage catalytique

Le principe de fonctionnement ainsi que les caractéristiques de l'unité de craquage catalytique illustrée à la figure 2.10 peuvent se résumer comme suit :

- › Dans le bas du tube élévateur (1), la charge préchauffée rencontre le catalyseur chaud venant du régénérateur (2) et elle atteint une température favorable à la réaction de craquage, soit environ 500 °C.
- › La vaporisation et le craquage de la charge conduisent à une augmentation importante de son volume qui, associée à l'injection de vapeur d'eau, provoque un avancement rapide (de l'ordre de quelques secondes) du mélange catalyseur-hydrocarbures. Puisque le craquage est endothermique, la température du mélange à la sortie du tube élévateur est plus basse qu'à son entrée.
- › Le mélange pénètre ensuite dans le désorbeur (3), qui est muni d'une rampe circulaire d'injection de vapeur d'eau et d'un cyclone. L'injection de vapeur sert à désorber la majeure partie des hydrocarbures volatils qui se sont déposés sur le catalyseur. Les cyclones (4 et 5), quant à eux, servent à séparer le catalyseur solide des gaz (réactifs non transformés, vapeur d'eau et produits du craquage). Les gaz sortent par le haut du désorbeur, et le catalyseur désactivé (en raison du dépôt d'hydrocarbures lourds et de coke sur ses sites actifs) tombe au fond, d'où il est soutiré en continu et acheminé vers le régénérateur.
- › Les conditions normales de fonctionnement du régénérateur sont constituées d'une température comprise entre 600 et 700 °C (en fonction de la résistance thermique du catalyseur) et d'un temps de séjour de 5 à 10 minutes. Le rôle du régénérateur est de brûler les produits lourds (tels que le coke) qui se sont déposés sur le catalyseur pendant le craquage. On doit effectuer cette combustion sans élever la température de façon excessive pour éviter de détruire la porosité du catalyseur.
- › Suivant les conditions normales de fonctionnement de l'unité de craquage, le catalyseur doit passer en permanence du réacteur (1) au régénérateur (2), ce qui provoque sa dégradation mécanique. À l'usure ainsi engendrée s'ajoute une certaine dégradation thermique, en raison du traitement de combustion appliqué dans le régénérateur. Pour maintenir un niveau de conversion constant, du catalyseur frais doit être ajouté régulièrement en amont du régénérateur.
- › La qualité des produits du craquage dépend des conditions employées dans le réacteur (température et type de catalyseurs utilisés) ainsi que de la nature de la charge d'alimentation. Les effluents issus du craquage sont évacués par le sommet du désorbeur (3) et dirigés vers la colonne de distillation atmosphérique (6).
- › La séparation effectuée dans la colonne de distillation (6) produit ce qui suit :
 - une fraction gazeuse riche en oléfines (propène et butène);
 - une fraction d'essence;
 - une fraction de gazole;
 - une fraction lourde, qui est recyclée dans la charge d'alimentation.
- › Selon les données recensées par la littérature spécialisée, la performance du procédé de craquage catalytique est :
 - de 60 à 70 % pour la conversion de la charge;
 - de 40 à 60 % en volume de la charge pour le rendement en essence;
 - de plus de 90 pour l'indice d'octane.

Craquage thermique

Ce procédé de transformation des molécules d'hydrocarbures s'effectue sous la seule influence de la température comme agent d'activation. Il consiste à rompre les molécules d'hydrocarbures, puis de briser ou de recombinaison des produits intermédiaires initialement formés. Puisque la réaction de craquage est endothermique, le four est l'élément essentiel de toutes les installations industrielles.

Cette forme de craquage peut être réalisée de deux manières :

- › Par viscoréduction (*visbreaker*)
- › Par cokéfaction (*coking*)

L'opération de **viscoréduction** s'applique à des résidus de distillation lourds et a les objectifs suivants :

- › Abaisser la viscosité des mazouts lourds.
- › Récupérer une certaine quantité d'essence et de gazole de la charge d'alimentation lourde.

Ce procédé n'est plus utilisé dans l'industrie pétrolière, car il a été remplacé par d'autres, plus performants, comme le craquage catalytique et l'hydrocraquage. Par conséquent, nous ne ferons pas la description d'une unité de viscoréduction ni de ses caractéristiques.

La **cokéfaction** est employée par l'industrie pétrolière pour valoriser les résidus lourds et produire le coke de pétrole, dont l'utilisation principale est la fabrication d'électrodes pour l'industrie de l'aluminium. La **cokéfaction fluidisée** est un procédé continu de conception analogue à celle du craquage catalytique à lit fluidisé, les particules mobiles du solide étant constituées par les grains de coke. Le résidu chaud est pulvérisé dans un bain fluidisé de particules de coke maintenu à une température d'environ 500 °C et à une pression de 1,5 à 2,5 bar. La charge se vaporise et se craque, et le lit fluidisé empêche le coke formé de se déposer sur les parois. À part le coke, les unités de cokéfaction produisent des gaz de craquage, de l'essence riche en oléfines, du gazole et une fraction lourde qui peut servir à alimenter une installation de craquage catalytique.

2.3.3 Hydrocraquage

L'hydrocraquage est un procédé d'hydroconversion d'une charge pétrolière qui ressemble au craquage catalytique. Les deux procédés visent à transformer les fractions hydrocarbonées à haut point d'ébullition de valeur médiocre en produits plus légers, car ceux-ci ont une valeur commerciale beaucoup plus élevée. La différence entre les deux procédés réside dans le fait que l'hydrocraquage s'effectue en présence d'hydrogène.

Industriellement, l'hydrocraquage est également considéré comme plus souple et mieux adapté aux besoins du raffinage que le craquage catalytique, pour les raisons suivantes :

- › La présence d'hydrogène augmente l'activité du catalyseur et permet de conduire le procédé à plus basse température; en conséquence, le dépôt du coke et la désactivation du catalyseur sont négligeables.
- › La qualité de la charge à traiter peut être inférieure à celle qui est nécessaire au craquage catalytique : dans ce cas, c'est le gazole lourd qui est préféré comme charge à traiter, tandis que pour l'hydrocraquage, le kérosène ainsi que les distillats moyens et lourds peuvent aussi bien convenir comme charge d'alimentation.
- › La présence d'hydrogène dans le procédé mène à la création de produits de réaction saturés, sans oléfines mais comportant une partie d'aromatiques, et donc hautement valorisés.
- › L'hydrogène est facilement accessible dans les raffineries et il est bon marché.

Les caractéristiques générales du procédé d'hydrocraquage peuvent se résumer comme suit :

- › Il s'agit d'un craquage catalytique avec superposition d'hydrogénation.
- › Les réactions d'hydrocraquage sont caractérisées par la rupture d'une liaison C-C, qu'elle soit dans une chaîne linéaire, adjacente à un noyau aromatique, ou encore dans un cycle saturé. Cette rupture conduit à une modification notable du nombre d'atomes de carbone, et donc à l'obtention de produits plus légers que ceux de la charge de départ.
- › Les catalyseurs employés pour l'hydrocraquage sont bifonctionnels : ils sont composés d'un solide de type silice-alumine, auquel s'ajoute un catalyseur d'hydrogénation à base de nickel (Ni) ou de platine (Pt). L'emploi de ce type de catalyseur nécessite que les charges d'alimentation soient préalablement débarrassées du soufre et des métaux, car ces éléments sont nocifs pour les sites actifs du catalyseur.
- › La pression employée pour l'opération varie entre 100 et 200 bar d'hydrogène, et la température est d'environ 350 à 450 °C, en fonction de la charge à traiter et de l'objectif fixé.

Le schéma de la **figure 2.11** représente une unité d'hydrocraquage en une étape. Ce schéma n'est présenté qu'à titre indicatif; le système peut subir de nombreuses modifications portant soit sur les points de mélange de l'hydrogène recyclé, soit sur le gaz d'appoint, soit sur le produit de recyclage. Pour plus d'efficacité, l'industrie exploite des unités d'hydrocraquage à deux étapes comportant un circuit de recyclage commun ou deux circuits de recyclage indépendants.

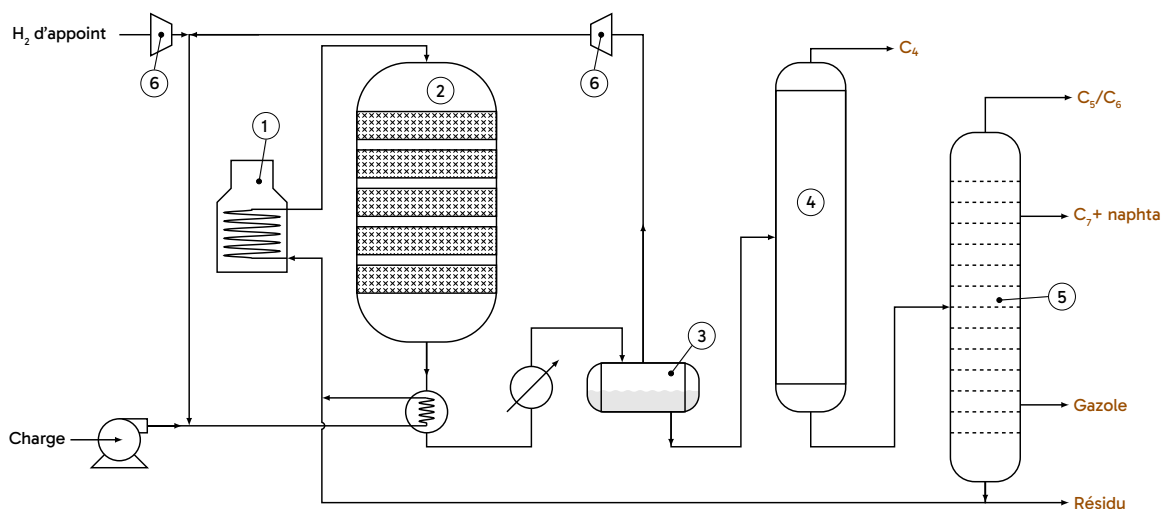


Figure 2.11 Schéma d'une unité d'hydrocraquage en une étape (1 = four; 2 = réacteur à lit fixe; 3 = séparateur à haute pression; 4 = débutaniseur; 5 = colonne de distillation; 6 = compresseurs)

La charge d'alimentation, mélangée avec l'hydrogène comprimé (hydrogène d'appoint, recyclé du procédé antérieur), est préchauffée à l'aide de l'effluent du réacteur (2). Ce flux préchauffé est ensuite additionné du produit de fond de la colonne de distillation (5), et l'ensemble est chauffé dans le four (1) à la température requise. Après l'hydrocraquage dans le réacteur à lit fixe (2), l'effluent est refroidi puis acheminé dans un séparateur à haute pression (3) ainsi que dans un débutaniseur (4) avant d'être envoyé dans la section de fractionnement. Les fractions séparées dans la colonne de distillation (5), des plus légères aux plus lourdes, sont : C_5 et C_6 ; C_7 + naphta; gazole; résidu de l'hydrocraquage. La fraction de pied de colonne, c'est-à-dire le résidu, est en partie recirculée dans l'unité d'hydrocraquage pour être mélangée avec la charge d'alimentation, tandis que l'autre partie est collectée comme résidu final.

2.3.4 Reformage catalytique

Le reformage catalytique est un procédé de conversion chimique des hydrocarbures d'une essence dans le but d'augmenter son indice d'octane et d'ainsi créer un supercarburant. La fraction d'essence de première distillation est constituée d'un mélange complexe d'hydrocarbures de type paraffines, d'isoparaffines, de naphthènes et d'aromatiques. Sachant que parmi ces constituants, ce sont les aromatiques et les isoparaffines qui possèdent l'indice d'octane le plus élevé, l'objectif du reformage catalytique est d'en augmenter la concentration, par conversion chimique, dans la coupe d'essence traitée.

La chimie de ce procédé est complexe : elle fait intervenir tous les hydrocarbures qui étaient présents dans la charge de départ ou qui se sont formés au cours des réactions primaires, mais aussi, éventuellement, les oléfines qui n'étaient pas présentes dans la charge d'alimentation mais qui sont susceptibles de se former pendant le processus.

Les données thermodynamiques et les études associées aux différentes réactions mises en jeu lors d'un reformage catalytique montrent ce qui suit :

- › Les conversions chimiques de type **isomérisation** (conversion des paraffines en isoparaffines) et **aromatization** (conversion des naphthènes en aromatiques) sont endothermiques. Il faut donc fournir de l'énergie et travailler à température élevée. Toutefois, pour maintenir l'activité du catalyseur, la température doit être limitée à environ 500 °C.
- › Pour orienter les réactions vers la production d'hydrocarbures aromatiques, le catalyseur utilisé devrait être bifonctionnel : d'une part, favoriser les réactions d'hydrogénation ou de déshydrogénation (d'où l'utilisation d'un catalyseur à base de métaux) et, d'autre part, favoriser les réactions d'isomérisation et d'hydrocraquage, ce qui conduira à l'emploi d'un support de catalyseur métallique comportant des sites acides. Le catalyseur le plus efficace est le platine (Pt) déposé sur de l'alumine. La teneur en platine est de 0,5 à 1% de la masse catalytique.
- › Pour augmenter la conversion en aromatiques, il est souhaitable d'opérer à faible pression d'hydrogène.

Procédé industriel

Une unité de reformage catalytique est présentée à la [figure 2.12](#). Elle comprend :

- › Un réacteur d'hydrodésulfuration (1)
- › Trois réacteurs de reformage (3, 5 et 7)
- › Trois fours (2, 4 et 6)
- › Un séparateur gaz-liquide (8)
- › Deux colonnes de distillation (9 et 10)

Le principe de fonctionnement ainsi que les caractéristiques de l'unité de reformage catalytique peuvent se résumer comme suit :

Caractéristiques opératoires

- › Catalyseur bifonctionnel : platine/alumine.
- › La charge doit être exempte de tout dérivé soufré et azoté afin d'éviter la désactivation du catalyseur; elle doit être hydrodésulfurée avant d'être introduite dans les réacteurs d'hydrogénation.
- › Température de reformage : entre 480 et 530 °C (plus élevée lorsque le catalyseur commence à se désactiver).
- › Pression d'hydrogène de reformage : 40 bar.
- › Rapport molaire H_2 /hydrocarbures : entre 2 et 10.
- › L'hydrogène est utilisé comme réactif, mais la réaction de reformage se produit également au cours de la conversion.

Principe de fonctionnement

- › La charge d'essence est prétraitée dans le réacteur d'hydrodésulfuration (1) avant son passage dans le four (2) pour y être préchauffée, puis elle est alimentée dans le premier réacteur de reformage (3).
- › L'hydrodésulfuration s'effectue à une température d'environ 350 °C, à l'aide d'hydrogène sous pression (40 bar) et d'un sel métallique comme catalyseur.
- › La charge, débarrassée de ses composants soufrés (S) et azotés (N), est préchauffée avant d'être introduite dans le premier réacteur de reformage (3).
- › L'endothermicité des réactions mises en jeu requiert la présence d'un four entre chacun des trois réacteurs de reformage.
- › L'effluent du dernier réacteur de reformage (7) est refroidi avant de passer dans le séparateur G-L (8). L'hydrogène en est séparé et renvoyé à l'entrée de l'unité.
- › L'effluent liquide est séparé dans une série de deux colonnes de distillation. L'essence de reformage est obtenue en tête de la deuxième colonne de distillation avec un rendement de l'ordre de 85 à 90% et comporte une teneur en aromatiques de 60 à 70% en volume.

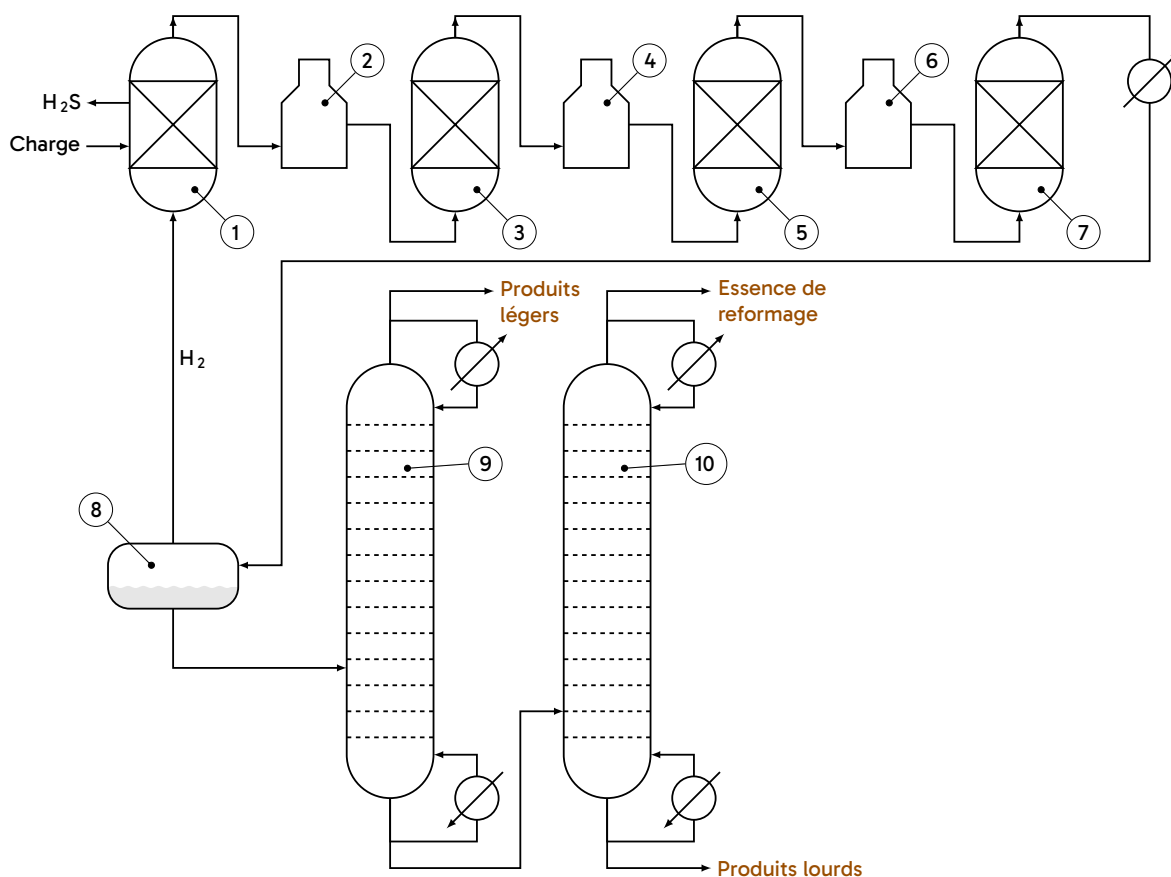


Figure 2.12 Schéma d'une unité de reformage catalytique à trois réacteurs (1 = réacteur d'hydrodésulfuration; 2, 4 et 6 = fours; 3, 5 et 7 = réacteurs de reformage; 8 = séparateur gaz-liquide; 9 et 10 = colonnes de distillation)

Parmi les nombreux procédés de reformage actuellement employés dans le monde, on retrouve ceux-ci :

- › L'ultraforming (Standard Oil)
- › Le *houdriforming* (Houdry)
- › Le powerforming (Exxon)
- › Le reformage sur platine (UOP)
- › Le *magnaforming* (Engelhard, Atlantic Richfield)
- › Le rheniforming (Chevron)

2.3.5 Isomérisation

Parmi les exigences croissantes concernant la qualité des produits pétroliers, celle qui se démarque est la production des essences à indice d'octane élevé. Le reformage catalytique (voir la [section 2.3.4](#)) et le craquage catalytique (voir la [section 2.3.2](#)) permettent d'obtenir des constituants à indice d'octane élevé (supercarburants) mais en quantité insuffisante pour répondre à la demande du marché. Les deux procédés de traitement complémentaires qui sont actuellement utilisés par les raffineurs pour produire des supercarburants sont l'isomérisation et l'alkylation (voir la [section 2.3.6](#)).

L'**isomérisation** permet d'améliorer l'indice d'octane d'essences légères qui sont composées des fractions linéaires de *n*-pentane C₅ et de *n*-hexane C₆ et qui ne peuvent pas subir de reformage catalytique parce qu'elles sont peu susceptibles de conduire à la formation d'hydrocarbures aromatiques.

L'essence légère (naphte léger) provenant de la distillation atmosphérique du pétrole brut (voir la [figure 2.6](#)) est composée principalement de C₅ et C₆. Lorsqu'ils sont isomérisés, ces deux hydrocarbures linéaires conduisent respectivement à l'obtention de l'**isopentane** et de l'**isohexane**, deux composants ramifiés (isoparaffines) présentant un indice d'octane beaucoup plus élevé (augmentation de 30 à 50%) que celui des hydrocarbures de départ ([figure 2.13](#)).

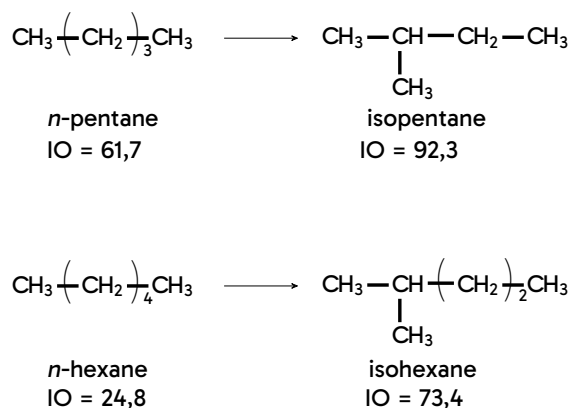


Figure 2.13 Exemples de réactions d'isomérisation (IO = indice d'octane)

Le schéma de principe d'une unité d'isomérisation est représenté à la **figure 2.14**.

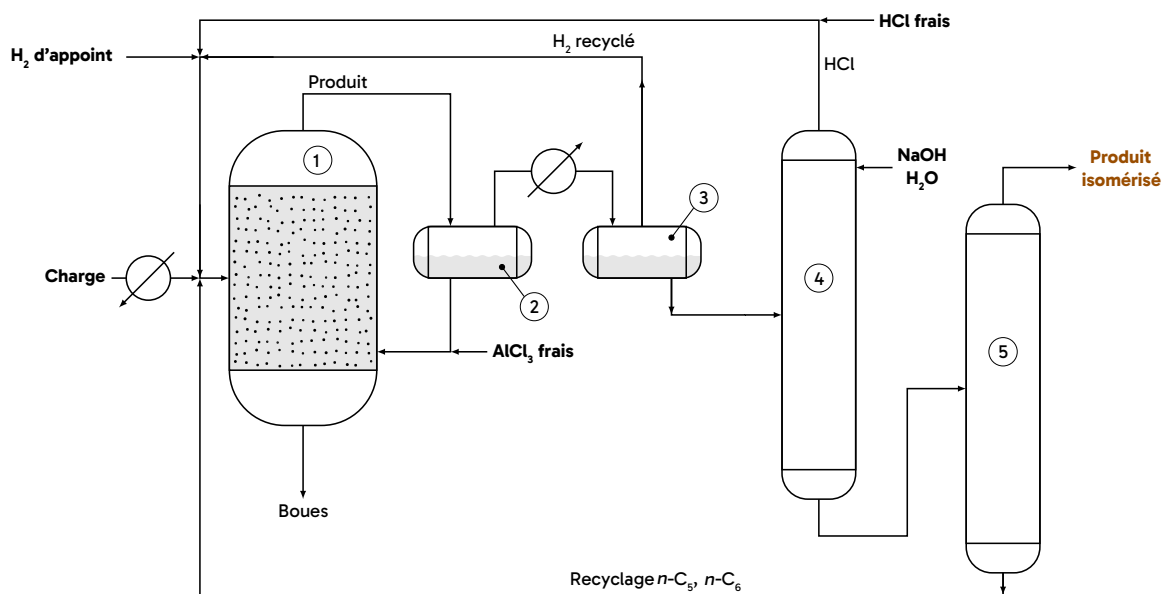


Figure 2.14 Schéma d'une unité d'isomérisation (1 = réacteur; 2 et 3 = séparateurs; 4 = colonne de lavage; 5 = colonne de distillation)

Ce procédé a été mis au point pour l'isomérisation des paraffines C_5 et C_6 . Il a comme caractéristique le fonctionnement en phase liquide dans un réacteur de type contacteur (1). Le catalyseur utilisé est un mélange complexe de chlorure d'aluminium ($AlCl_3$) activé par l'acide chlorhydrique (HCl) anhydre. Les conditions opératoires du réacteur (1) font en sorte qu'on le maintient sous une pression d'hydrogène d'environ 2 à 3 bar pour inhiber les réactions secondaires de craquage et de dismutation. La charge, préchauffée à une température d'environ 100 à 120 °C et combinée avec HCl anhydre et l'hydrogène, est alimentée dans le réacteur (1). Elle y est mise en contact avec un mélange de catalyseur ($AlCl_3$ frais et recyclé).

L'effluent du réacteur (1) est d'abord débarrassé de l'hydrogène par entraînement, dans les séparateurs (2) et (3), puis de l'acide chlorhydrique, par lavage alcalin et eau, dans la colonne de lavage (4). Le produit isomérisé est distillé comme produit de tête dans la colonne de distillation (5). Le résidu de cette colonne (5) est recyclé et mélangé avec la charge d'alimentation.

D'autres procédés ont été mis au point dans le but de remplacer le chlorure d'aluminium, qui est hydrolysable et donc corrosif, par des catalyseurs plus stables, de type métaux nobles déposés sur de l'alumine chlorée.

2.3.6 Procédés de synthèse

Les procédés de synthèse permettent d'obtenir une quantité supplémentaire d'essence ayant un indice d'octane élevé à partir des effluents gazeux issus des différents traitements appliqués aux coupes pétrolières. On exploite principalement, mais assez peu, deux techniques de synthèse : l'alkylation et la polymérisation.

Alkylation

Ce procédé consiste en l'addition d'une oléfine soit à un noyau benzénique, soit à une chaîne hydrocarbonée. La voie d'addition d'une oléfine à un noyau benzénique constitue la première étape dans la fabrication industrielle des détergents; elle ne sera pas abordée dans ce chapitre. C'est plutôt la deuxième voie qui nous intéresse, à savoir l'addition d'une oléfine à une isoparaffine pour obtenir un produit à haut poids moléculaire et à indice d'octane élevé : un supercarburant. Les réactions qui interviennent lors de l'alkylation sont complexes, mais l'alkylation du C_4 peut être représentée de façon très simplifiée, tel qu'illustré à la [figure 2.15](#).

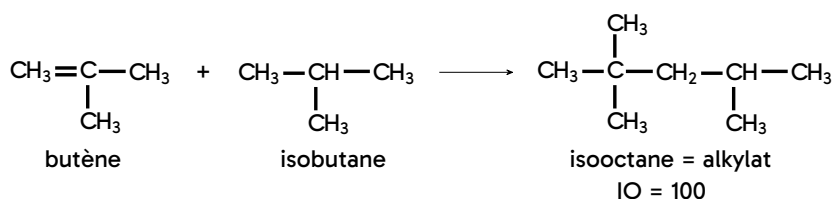


Figure 2.15 Exemple d'alkylation (IO = indice d'octane)

Les conditions habituelles pour effectuer l'alkylation de manière industrielle peuvent se résumer comme suit :

- › La charge est constituée soit d'oléfines fractionnées, soit d'oléfines légères.
- › Le catalyseur le plus utilisé est l'acide fluorhydrique (HF) anhydre. D'autres acides, de type Lewis, tels que AlCl_3 et BF_3 , peuvent être utilisés, mais le HF est le plus sélectif dans un domaine de température plus grand que les autres.
- › La réaction se produit en phase liquide, à une température de 30 à 40 °C, sous une pression de 10 bar et en présence d'un large excès d'isobutane, ce qui permet d'éviter les réactions secondaires de polymérisation.
- › Les réactifs et le catalyseur sont non miscibles; ils forment deux phases liquides. L'alkylation a lieu à l'interface de ces deux phases sous l'action d'un brassage vigoureux.

Polymérisation

Le procédé de polymérisation correspond à une réaction d'addition d'oléfines ([figure 2.16](#)) avec production de dimères de type oléfines, ce qui signifie que la matière première ainsi que les produits de réaction sont tous de nature oléfinique.

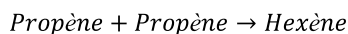


Figure 2.16 Exemples de réactions de polymérisation

La nature des réactifs pose un défi d'approvisionnement, car les oléfines n'existent pas dans le pétrole brut et elles sont également instables, c'est-à-dire qu'elles peuvent produire des gommages. Afin d'être valorisées, les oléfines peuvent être recherchées dans les effluents issus du craquage catalytique ou thermique.

Par rapport à l'alkylation, la polymérisation présente les quelques désavantages qui suivent :

- › La réaction se produit à une température plus élevée (200 °C pour la polymérisation, et 40 °C pour l'alkylation).
- › L'indice d'octane obtenu pour le dimère est nettement moins élevé que celui obtenu pour l'alkylat.
- › Des polymères lourds (jusqu'à 10% de la charge), qui peuvent résulter du processus comme produits secondaires, se retrouvent dans l'oléfine finale et en diminuent la qualité.

Les procédés industriels de polymérisation sont caractérisés par les éléments suivants :

- › L'usage d'un catalyseur, soit de type acide phosphorique (H_3PO_4), déposé sur un support solide, assure une conversion quasi complète des oléfines.
- › Ses conditions opératoires sont une température de 170 à 200 °C et une pression de 35 à 70 bar.
- › L'ajout d'eau dans le circuit d'alimentation du réacteur vise à :
 - diminuer les réactions secondaires inévitables comme la formation d'oligomères supérieurs;
 - prolonger la durée de vie du catalyseur.
- › On emploie un réacteur de polymérisation soit à tubes, soit à chambre. Dans le premier type de réacteur, le catalyseur est inséré dans les tubes, autour desquels circule de l'eau pour contrôler la température. Dans le second type de réacteur, le catalyseur est divisé en plusieurs lits entre lesquels circule le propane froid.

Le **tableau 2.5** présente une synthèse des principales caractéristiques de différents procédés de transformation des fractions pétrolières (charge d'alimentation, produit de réaction, indice d'octane, température, pression, catalyseur).

Tableau 2.5 Principales caractéristiques des procédés de raffinage des fractions pétrolières

Procédé	Charge	Produit final	IO	Température (°C)	Pression (bar)	Catalyseur
Craquage catalytique	Gazole lourd	Essence	Variable	500	–	Zéolithe
Hydrocraquage	Gazole lourd Kérosène	Essence	Variable	350 – 450	100 – 200	Ni/Silice-alumine
Reformage catalytique	Essence	Supercarburant	Variable	480 – 530	40	Pt/Alumine
Isomérisation	Paraffine	Isoparaffine	≈ 92	100 – 120	2 – 3	$AlCl_3/HCl$
Alkylation	Oléfine	Isoparaffine	100	40	10	HF
Polymérisation	Oléfine	Oléfine	Variable	200	35 – 70	H_3PO_4

2.4 Productions industrielles

2.4.1 Exemples de productions industrielles

Tel que précisé à la [section 2.2](#), une raffinerie fabrique trois catégories de produits :

- › Catégorie 1 : Produits finis, prêts à l'usage
- › Catégorie 2 : Produits semi-finis, qui nécessitent des transformations supplémentaires pour arriver à l'état de produits finis
- › Catégorie 3 : Sous-produits ou produits intermédiaires, qui servent comme matières premières pour la pétrochimie

Environ 80% des produits issus du traitement du pétrole dans les raffineries font partie de la première catégorie et sont représentés par les carburants et les combustibles. Les 20% restants font partie des deuxième et troisième catégories.

Produits pétroliers finis

Les carburants et les combustibles issus du raffinage de pétrole ainsi que leurs usages spécifiques sont énumérés dans le [tableau 2.6](#).

Tableau 2.6 Usages spécifiques des produits pétroliers

Produits pétroliers	Usages
H ₂ et C ₁ -C ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Gaz industriels • Pétrochimie
Gaz liquéfiés (propane et butane)	<ul style="list-style-type: none"> • Production industrielle • Produits domestiques
Essences	<ul style="list-style-type: none"> • Carburant pour automobiles • Carburant pour avions
Essences spéciales et solvants	<ul style="list-style-type: none"> • Poêles catalytiques • Détachants • Solvants pour peinture • Solvants industriels
Kérosène	<ul style="list-style-type: none"> • Carburant pour avions à réaction • Carburant pour turbines à gaz • Carburant pour fusées
Pétrole lampant (kérosène)	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairage • Chauffage • Signalisation
Gazole	<ul style="list-style-type: none"> • Carburant pour moteur diesel

Tableau 2.6 Usages spécifiques des produits pétroliers (*suite*)

Produits pétroliers	Usages
Mazout	<ul style="list-style-type: none">• Combustible domestique• Combustible industriel
Huiles légères	<ul style="list-style-type: none">• Huiles à moteur• Huiles de graissage pour usage mécanique
Huiles lourdes	<ul style="list-style-type: none">• Huiles à moteur
Paraffine et cires	<ul style="list-style-type: none">• Protection alimentaire• Isolation électrique
Asphalte	<ul style="list-style-type: none">• Bitume routier• Étanchéité en construction• Emballage• Moulage
Coke	<ul style="list-style-type: none">• Combustible industriel• Fabrication d'électrodes

Produits pétroliers semi-finis

Dans la catégorie des produits semi-finis, on inclut les lubrifiants (huiles de graissage, huiles à moteurs, etc.). Une description détaillée du procédé industriel de fabrication des huiles sera présentée à la [section 2.4.2](#).

Produits pétroliers intermédiaires

La littérature spécialisée présente le **vapocraquage** (pyrolyse d'hydrocarbures saturés en présence de vapeur d'eau) comme étant le principal procédé utilisé pour la production de molécules de base pour la pétrochimie; suivi des procédés d'extraction et de polymérisation. Les produits pétroliers intermédiaires obtenus par vapocraquage sont nombreux; ils comprennent entre autres l'hydrogène, le méthane, l'éthane, l'éthylène et le propylène. Ils serviront à fabriquer des matières plastiques de toutes sortes ou des produits qui seront utilisables dans les secteurs de l'électricité, de l'électronique, du textile, de l'aéronautique, de la construction, de la santé, de la pharmacie, des cosmétiques, etc. Les hydrocarbures aromatiques, en particulier le benzène, le toluène et le xylène, sont de grands produits intermédiaires pour la pétrochimie ainsi que pour la synthèse de résines, de plastifiants et de fibres de polyester.

2.4.2 Fabrication des huiles

Le procédé de fabrication des huiles de graissage, et en particulier des huiles à moteur, est très complexe. Les deux caractéristiques les plus pertinentes en ce qui les concerne sont la viscosité et le point de congélation.

La viscosité (capacité d'écoulement) de l'huile doit être assez élevée pour assurer la fonction de réduction des frottements, mais pas trop, pour permettre une bonne circulation du fluide. En ce qui a trait aux huiles à moteur, il est important de connaître leur indice de viscosité, qui rend compte de l'effet de la température sur la viscosité qui doit demeurer suffisante malgré une élévation de la température sans trop diminuer face au froid. Un indice de viscosité élevé est souhaitable, car il correspond à une variation faible de la viscosité en fonction de la température.

Le point de congélation doit être suffisamment bas pour que l'huile reste fluide même à une température inférieure à $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La préparation des huiles se fait généralement en trois étapes :

- › L'élimination des aromatiques lourds
- › L'élimination des paraffines
- › Le traitement final des huiles

1) L'élimination des aromatiques lourds

Le schéma de principe présenté à la [figure 2.17](#) montre l'extraction sélective des aromatiques lourds par un solvant. La présence des aromatiques lourds dans une huile n'est pas désirée, car leur viscosité varie beaucoup en fonction de la température. Le traitement consiste à introduire une charge (constituée du résidu de la distillation sous vide du pétrole) dans une colonne d'extraction (1), où un solvant précis retiendra seulement les aromatiques lourds. Pendant longtemps, deux solvants étaient utilisés dans la majorité des unités installées : le furfural et le phénol. Plus récemment, on a commencé à utiliser la 1-méthyl-2-pyrrolidone.

La phase constituée du solvant et des aromatiques passe ensuite dans une colonne de distillation (2) et deux colonnes de stripage (3 et 4). Le solvant quittera les colonnes de stripage par leur sommet et sera dirigé vers le décanteur (5), où l'eau de stripage sera retirée avant que le solvant soit recirculé dans la colonne d'extraction (1). La phase constituée d'huile sera acheminée directement dans la colonne de stripage (4) et débarrassée du solvant, puis elle sera retirée de l'unité d'extraction.

2) L'élimination des paraffines

L'huile ayant été débarrassée des aromatiques possède un bon indice de viscosité, mais un point de congélation trop élevé, en raison des paraffines qui entrent dans sa composition. L'étape suivante vise donc à éliminer une partie des paraffines (les plus lourdes) de façon à ramener le point de congélation de l'huile vers $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, selon la spécification recherchée. La précipitation des paraffines lourdes est obtenue par l'action conjointe d'un solvant et du froid.

3) Le traitement final des huiles

Divers traitements finaux sont appliqués en dernier ressort aux huiles pour qu'elles répondent à d'autres exigences de qualité, en particulier la stabilité à l'oxydation et la stabilité de la couleur. Le principal traitement de finition est une hydrogénation catalytique, dont le résultat est une diminution du degré d'insaturation. On mélange les huiles ainsi préparées à des additifs afin d'en améliorer d'autres propriétés, telles que la résistance aux variations de température et l'effet anti-usure.

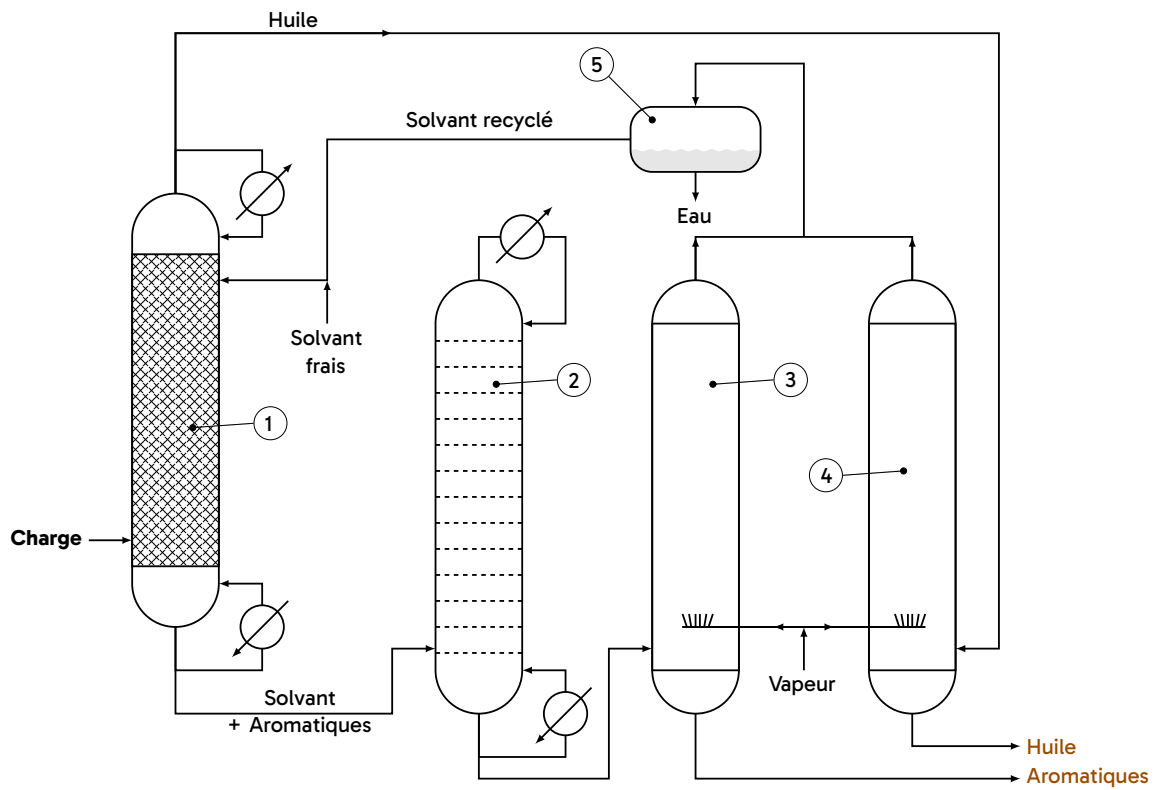


Figure 2.17 Schéma de principe d'une unité d'extraction des aromatiques lourds

2.5 Exercices

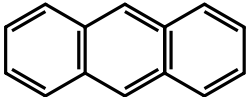
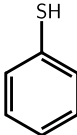
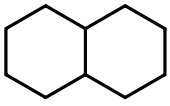
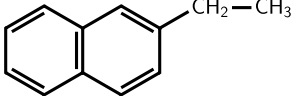
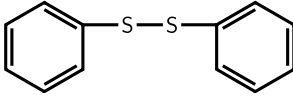
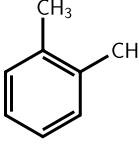
A Exercices de révision

- A.1** Pourquoi, après son extraction d'un gisement, le pétrole brut n'a-t-il aucune utilité commerciale tel quel?
- A.2** Pourquoi l'opération de dessalage du pétrole brut est-elle essentielle avant le raffinage?
- A.3** Quelles sont les caractéristiques/spécifications imposées à un carburant? Nommez-les.
- A.4** Quelles sont les caractéristiques/spécifications imposées à un combustible? Nommez-les.
- A.5** Quel est l'objectif de la distillation fractionnée du pétrole brut et à l'aide de quelle force motrice est-elle réalisable?
- A.6** Pourquoi un moteur à essence peut-il cogner?
- A.7** Parmi les différentes catégories d'hydrocarbures présents dans le pétrole brut, laquelle possède le pouvoir antidétonant le plus faible, et laquelle possède le plus élevé?
- A.8** Quelle est la différence entre le fonctionnement d'un moteur à allumage et celui d'un moteur diesel?
- A.9** L'essence appelée « Suprême » à la pompe possède un indice d'octane de 94. Que représente ce nombre?
- A.10** Pourquoi, malgré leur performance, les additifs à base de plomb ont-ils été abandonnés par l'industrie pétrolière comme solution pour améliorer l'indice d'octane d'une essence?
- A.11** Le raffinage du pétrole comporte une série de procédés de séparation et de transformation.
- Nommez les procédés de séparation utilisés dans le raffinage du pétrole.
 - Nommez les procédés de transformation des produits pétroliers.
- A.12** Quelle est la différence essentielle entre le craquage catalytique et le reformage catalytique?
- A.13** Quelles sont les conditions opératoires employées (température, pression, type de catalyseur) lors de la réalisation :
- du craquage catalytique;
 - du reformage catalytique;
 - de l'hydrocraquage;
 - de l'isomérisation;
 - de l'alkylation;
 - de la polymérisation?

B Exercices de réflexion

- B.1**
- Quelle est la différence fondamentale entre la distillation à pression atmosphérique et celle sous pression réduite (vide)?
 - Lequel de ces deux types de distillation est-il plus facile d'exécuter à l'échelle industrielle?
 - Si l'un des deux types de distillation est plus facile à exécuter industriellement que l'autre, pourquoi fait-on usage des deux?
- B.2** Dans le **tableau 2.7**, en inscrivant les lettres P, I, O, N ou A, attribuez aux divers composants, selon leur structure, l'une des catégories suivantes : P = paraffines (alcanes); I = isoparaffine (isoalcanes); O = oléfines; N = naphtènes (cycloalcanes); A = aromatiques.

Tableau 2.7 Hydrocarbures présents dans les fractions pétrolières

N°	Structure	Catégorie
1	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	
2	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	
3		
4	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	
5		
6		
7		
8		
9	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	
10		

B.3 Complétez le schéma présenté à la **figure 2.18** en indiquant les noms des appareils (de 1 à 10) et des composants (de « a » à « j ») et précisez de quel procédé il s'agit.

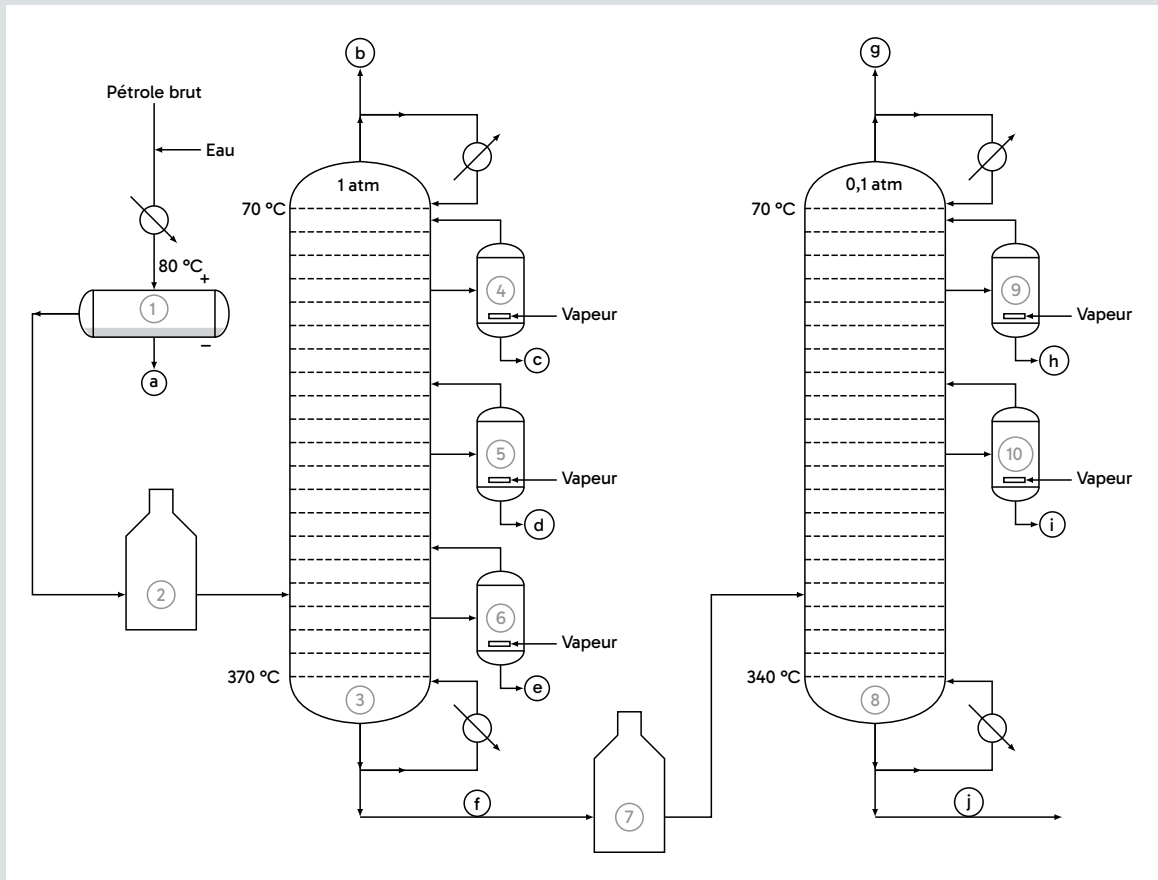


Figure 2.18 Schéma d'un procédé à identifier et à compléter

C Exercices d'application

- C.1** Le méthyl-tert-butyléther (MTBE) est l'un des additifs qu'il est possible de mélanger à une essence afin d'en augmenter la performance. À l'aide d'une source spécialisée (recherche dans le *Handbook* ou autre) trouvez son point d'ébullition, son indice d'octane et sa solubilité dans l'essence. En fonction de ces trois caractéristiques, indiquez si on peut l'ajouter à l'essence automobile.
- C.2** Le craquage catalytique du *n*-octane (C_8H_{18}) conduit à l'éthène (C_2H_4) et un hydrocarbure A, de formule brute C_xH_y .
- Écrivez l'équation de la réaction de craquage catalytique du *n*-octane.
 - Déterminez la formule brute de l'hydrocarbure A et précisez à quelle famille de composés il appartient.
 - Déterminez toutes les formules semi-développées possibles de l'hydrocarbure A.
- C.3** La distillation atmosphérique du pétrole brut permet de séparer ses constituants en fractions pétrolières. Chacune d'elles est formée d'un mélange d'hydrocarbures ayant des propriétés semblables.
- L'une de ces fractions pétrolières contient un alcane (A) à chaîne linéaire formé de sept atomes de carbone (C). Déterminez sa formule semi-développée et écrivez ensuite l'équation de combustion totale de cet hydrocarbure.
 - Le craquage catalytique de l'alcane (A) conduit à la création d'un autre alcane linéaire, formé de trois atomes de carbone et d'une oléfine (B). Écrivez l'équation de la réaction de craquage de l'alcane (A) et trouvez la formule semi-développée de l'oléfine (B).



Chapitre 3

Productions papetières



Usine Cascades Sonoco de Kingsey Falls

Sommaire

3.1 Introduction	58
3.1.1 Définitions et terminologie	58
3.1.2 Généralités	59
3.1.3 Chimie du bois	61
3.2 Étapes de fabrication des pâtes et papiers	67
3.2.1 L'approvisionnement en fibres	67
3.2.2 La mise en pâte	68
3.2.3 Le blanchiment	68
3.2.4 La formation de la feuille	68
3.2.5 La finition	68
3.3 Types de procédés de mise en pâte	70
3.3.1 Pâtes mécaniques	71
3.3.2 Pâtes thermomécaniques	74
3.3.3 Pâtes chimiques	74
3.4 Traitements secondaires de la pâte	78
3.4.1 Classage	79
3.4.2 Épuration	82
3.4.3 Épaississement	83
3.4.4 Raffinage des refus	85
3.5 Blanchiment de la pâte	85
3.5.1 Blanchiment des pâtes mécaniques	87
3.5.2 Blanchiment des pâtes chimiques	87
3.6 Machines à papier	89
3.7 Désencrage et recyclage du papier	91
3.7.1 Revue des contaminants usuels des vieux papiers	92
3.7.2 Remise en pâte	94
3.7.3 Paramètres de la trituration	96
3.7.4 Effet des additifs chimiques	97
3.7.5 Désencrage par flottation	98
3.8 Exercices	99

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les productions papetières. La première partie abordera la terminologie spécifique à l'industrie papetière ainsi que ses généralités, suivies de la chimie du bois ainsi que des étapes de fabrication des pâtes et papiers. La deuxième partie présentera d'abord les trois types de procédés de mise en pâte que l'industrie exploite actuellement, pour continuer ensuite avec les traitements secondaires de la pâte et le blanchiment. La troisième partie mettra l'accent sur la machine à papier elle-même ainsi que le désencrage et le recyclage du papier. Pour permettre une meilleure compréhension et la mise en application des notions théoriques et pratiques qui auront été exposées concernant l'industrie papetière, quelques questions de révision, de réflexion et d'application sont proposées à la fin du chapitre.

3.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique aux productions papetières et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Blanchiment* = traitement de modification de la couleur d'une pâte à papier en vue d'augmenter son degré de blancheur;
- › *Cuisson* = traitement chimique d'une source de bois qui est effectué sous pression, à chaud et au moyen de produits chimiques;
- › *Désencrage* = procédé qui vise à enlever la plupart des particules d'encre d'une pâte obtenue à partir de papier ou de carton imprimés et récupérés;
- › *Fibre cellulosique* = unité de base d'une source de bois qui sert à la préparation de la pâte à papier;
- › *Fibre recyclée* = fibre cellulosique provenant de papiers usagés (vieux papiers);
- › *Fibre vierge* = fibre non recyclée = fibre cellulosique utilisée pour la première fois dans la fabrication du papier;
- › *Lignine* = matériau qui compose la couche extérieure de la fibre cellulosique et qui a pour rôle de cimenter les fibres entre elles;
- › *Liqueur noire* = solution qui résulte de la cuisson chimique du bois et qui ne contient plus de pâte chimique, car elle a été récupérée par séparation;
- › *Machine à papier* = bande humide continue qui sert à la fabrication du papier;
- › *Mise en pâte* = procédé employé dans le but de libérer les fibres cellulosiques et de préparer la pâte à papier;
- › *Papier* = matériau fabriqué à partir de fibres cellulosiques;
- › *Pâte à papier* = *pulpe* = matière constituée de fibres cellulosiques en suspension et destinée à la fabrication du papier;
- › *Pâte blanchie* = pâte qui a subi un traitement de blanchiment;
- › *Pâte chimico-thermomécanique* = *PCTM* = pâte obtenue par raffinage sous pression, à une température d'environ 100 °C et en présence de produits chimiques;
- › *Pâte chimique* = *PC* = pâte obtenue par cuisson (traitement chimique) d'une source de bois en vue d'en éliminer les composants non cellulosiques;
- › *Pâte écrue* = pâte qui n'a subi aucun traitement de blanchiment;

- › *Pâte mécanique* = *PM* = pâte obtenue à partir d'une source de bois par des moyens mécaniques;
- › *Pâte thermomécanique* = *PTM* = pâte obtenue à partir d'une source de bois par l'action combinée de moyens mécaniques et thermiques;
- › *Sens machine* = sens (longueur ou largeur) dans lequel sont majoritairement orientées les fibres qui composent la feuille de papier;
- › *Traitements secondaires de la pâte* = séquence d'opérations qui visent à améliorer la qualité de la pâte à papier.

3.1.2 Généralités

Le papier existe depuis l'Antiquité et, au cours de sa riche histoire à titre de produit indispensable aux activités quotidiennes de l'humanité, il a continuellement évolué pour répondre à la demande grandissante et changeante de ses consommateurs. Malgré les avancées technologiques et la démocratisation de l'électronique en tant que support pour l'écriture, le papier conserve ses titres de noblesse, car il peut être recyclé, incinéré, biodégradé et valorisé de nombreuses façons.

La préparation de la **pâte à papier** est l'étape qui précède toute fabrication papetière. Elle peut être obtenue à partir de fibres végétales, ligneuses ou non. À l'échelle mondiale, les fibres non ligneuses représentent une fraction mineure des approvisionnements en matière première des papetiers. Cependant, elles sont encore largement utilisées dans de nombreux pays et elles y ont une importance considérable, à la fois sur le plan du volume et du pourcentage de l'offre de pâte. À l'heure actuelle, la fibre non ligneuse la plus couramment employée est la paille, suivie de la bagasse et du bambou. D'autres fibres non ligneuses, comme le coton, le chanvre, le sisal et le kénaf, prennent aussi de l'importance dans ce secteur. La **figure 3.1** permet de visualiser les sources principales de fibres végétales, ligneuses ou non.

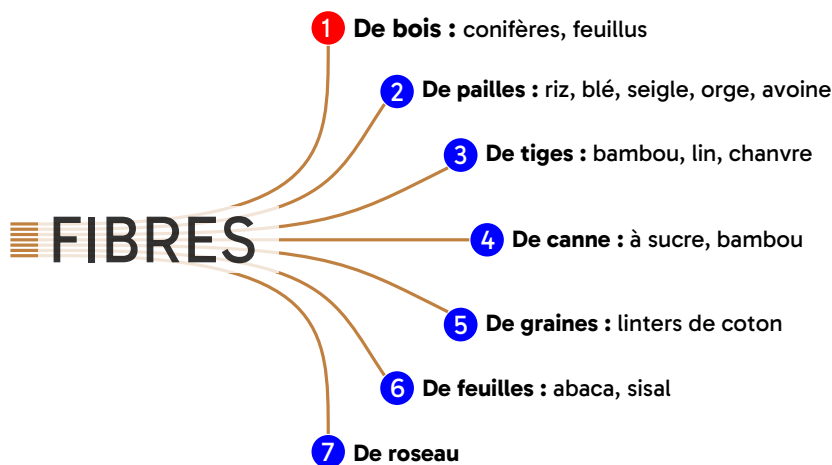


Figure 3.1 Sources de fibres végétales pouvant être utilisées pour la fabrication de pâte à papier (en rouge, les fibres ligneuses; en bleu, les fibres non ligneuses)

Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des fibres non ligneuses en papeterie sont présentés ci-dessous.

Avantages

- › Certaines fibres non ligneuses, utilisées comme matière première pour la fabrication du papier, ont des rendements annuels élevés à l'hectare.
- › Les matériaux non ligneux contiennent moins de lignine que le bois et ils ont une énergie d'activation plus faible; il est donc généralement plus facile de les délignifier.
- › La production de papier à partir de fibres non ligneuses permettrait d'épargner les ressources en bois à papier des forêts naturelles et d'ainsi éviter la plantation de forêts à grande échelle.
- › Dans certains pays, la production de fibres non ligneuses peut être une solution de rechange raisonnable à la plantation d'arbres.

Inconvénients

- › L'approvisionnement constant en fibres tout au long de l'année est impossible, car la plupart des matériaux non ligneux sont des plantes annuelles; il faut donc prévoir une importante capacité d'entreposage pour pallier ce problème.
- › Les fibres non ligneuses comportent toutes une haute teneur en silice. La plupart des papeteries qui les utilisent sont petites et ne possèdent pas les installations de récupération chimique nécessaires pour traiter les volumes importants de silice qui doivent être éliminés.
- › Les fibres non ligneuses, qui proviennent de cultures annuelles, nécessitent l'emploi d'un nombre d'intrants élevé, tant pour leur croissance que pour leur récolte.

D'un point de vue technique et qualitatif, il est possible de produire n'importe quelle qualité de papier en utilisant l'assortiment voulu de fibres végétales non ligneuses. Toutefois, le bois constitue la principale source de fibres cellulosiques propres à l'industrie papetière. À l'échelle mondiale, le bois assure environ 93 % des besoins en la matière. Les essences de bois sont classées en deux grandes catégories :

- › Les résineux (conifères, ou arbres à feuillage persistant)
- › Les feuillus (arbres à feuillage caduc)

Les **résineux** poussent bien dans les régions tempérées ou froides. Ils donnent des fibres longues (de 1,5 à 4 mm) et un papier rigide de qualité. Les essences les plus connues de cette catégorie sont le sapin, le pin, l'épinette et, tout particulièrement au Québec, l'épinette noire. En Europe et dans les pays nordiques, les épicéas et les pins sont les arbres les plus utilisés, car leurs fibres offrent les caractéristiques les plus avantageuses pour la fabrication du papier. Au Québec, la majorité du papier est fabriquée à partir de fibres provenant d'arbres récoltés localement (épinette, pin, sapin, érable, peuplier, faux-tremble, bouleau, hêtre). Dans d'autres parties du monde, on utilise également l'eucalyptus, le chêne, le châtaignier, etc.

Les **feuillus** ont une structure plus complexe que les résineux et ils donnent des fibres plus courtes (allant de 0,8 à 1,5 mm). Le papier qu'ils permettent de fabriquer est souple, contrairement à celui provenant de résineux.

3.1.3 Chimie du bois

La pâte, ingrédient de base, est obtenue à partir de bois brut écorcé. Peu importe l'essence, le bois est composé de quatre grandes classes de produits, tel que représenté schématiquement à la **figure 3.2**.

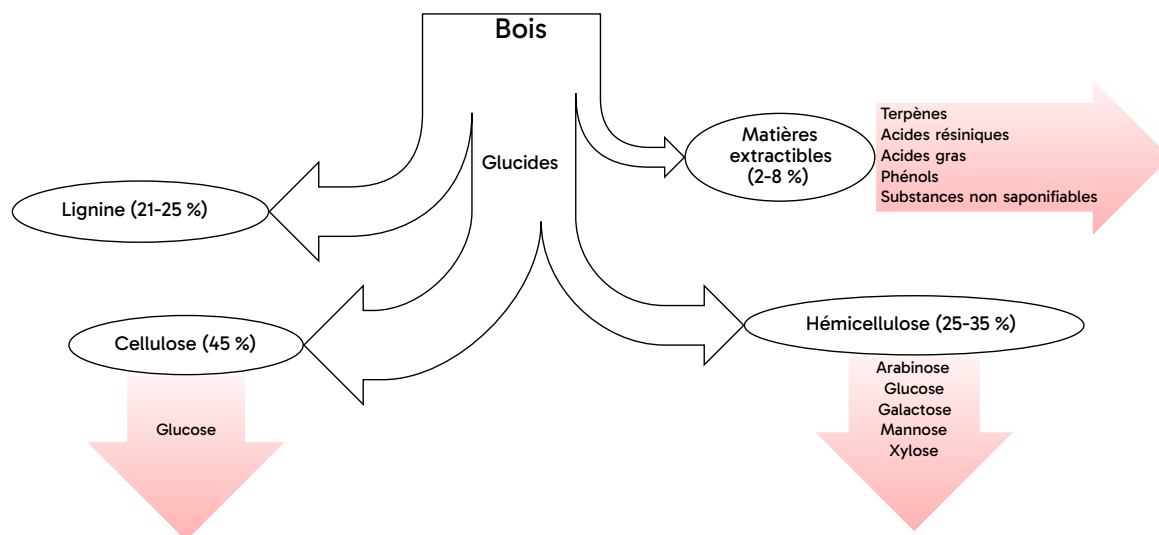


Figure 3.2 Composants chimiques du bois

Cellulose

La **cellulose** est la substance qui détermine la qualité des fibres et qui rend possible leur utilisation dans la fabrication du papier. Elle constitue la molécule organique la plus abondante sur la terre : ce polymère naturel est le constituant principal de la paroi cellulaire de nombreux végétaux (notamment des plantes et des arbres) à une teneur variant de 15 à 99% (**tableau 3.1**).

Tableau 3.1 Teneur en cellulose de quelques espèces végétales

Espèce végétale	Teneur en cellulose (% de la matière sèche)
Coton	95 – 99
Lin	70 – 75
Bouleau, bambou, blé	40 – 50
Maïs	17 – 20

La cellulose (figure 3.3) est le matériau le plus important de la paroi des cellules végétales. Sa chimie et sa structure permettent d'expliquer ses propriétés.

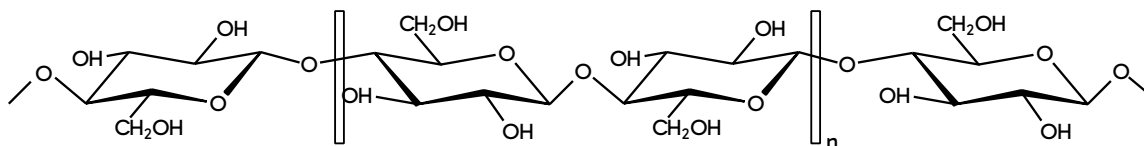


Figure 3.3 Représentation schématique de la structure chimique de la cellulose

D'un point de vue chimique, la cellulose est un glucide, ou un hydrate de carbone. Cela signifie qu'elle est composée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. L'hydrogène et l'oxygène se retrouvent dans la cellulose dans les mêmes proportions que dans l'eau (deux atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène). La cellulose, tout comme l'amidon, est un polysaccharide qui a comme unité de répétition un sucre simple, le glucose, de formule brute (C₆H₁₀O₅)_n. Le symbole *n* représente le nombre d'unités répétitives de sucre simple dans la molécule. C'est ce qu'on appelle le « degré de polymérisation » (DP). Cette donnée varie selon la source de la cellulose et le traitement qu'on lui fait subir (voir le tableau 3.2). La seule différence entre la cellulose et l'amidon réside dans la nature des liaisons chimiques reliant les monomères de glucose. Pour la cellulose, les liaisons sont de type β(1-4), alors qu'elles sont de type α(1-4) pour l'amidon. En raison de cette différence, l'amidon est un polymère ramifié, tandis que la cellulose est un polymère linéaire, ce qui lui permet de s'agencer sous forme de fibres et procure une grande résistance mécanique à la tension.

Tableau 3.2 Divers types de cellulose et leur degré de polymérisation

Type de cellulose	Degré de polymérisation
Cellulose native	3500
Linters de coton purifiés	1000 – 3000
Pâtes commerciales de bois	600 – 1500

La plupart des fibres propres à la fabrication du papier possèdent un DP se situant entre 600 et 1500 (en moyenne pondérée). Ce type de cellulose est connu sous le nom de « cellulose alpha ». Il en existe également deux autres types, les celluloses bêta et gamma, qui ont un DP beaucoup plus faible et qui ne sont pas utilisés pour la fabrication du papier; il s'agit en effet de celluloses dégradées.

En observant la figure 3.3, on peut remarquer que la cellulose est un polymère linéaire; ses molécules peuvent donc s'entasser très près les unes des autres pour former de longs segments. Ceux-ci permettent la création de forces associatives puissantes qui sont responsables de la grande résistance des matières cellulosiques. La cellulose contenue dans les fibres végétales se présente globalement en couches d'orientation définie, donc ordonnées, mais dont certaines régions sont désordonnées, tel qu'illustré à la figure 3.4. Les régions ordonnées, ou cristallines, résistent bien à la pénétration de solvants ou de réactifs. À l'opposé, les régions désordonnées, ou amorphes, ne leur offrent aucune résistance; elles sont par conséquent susceptibles d'être le siège de réactions d'hydrolyse.

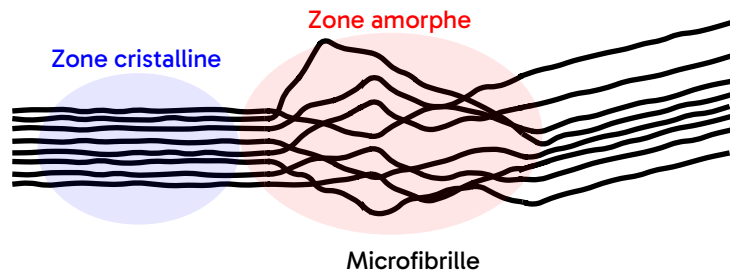


Figure 3.4 Schéma de l'organisation moléculaire de la cellulose

À l'échelle microscopique, l'association de plusieurs chaînes de glucose conduit à la formation d'une micelle. L'assemblage de ces micelles donne naissance à une microfibrille. L'union de ces microfibrilles mène à la création d'une macrofibrille. L'association de centaines de macrofibrilles constitue enfin les fibres du bois (figure 3.5).

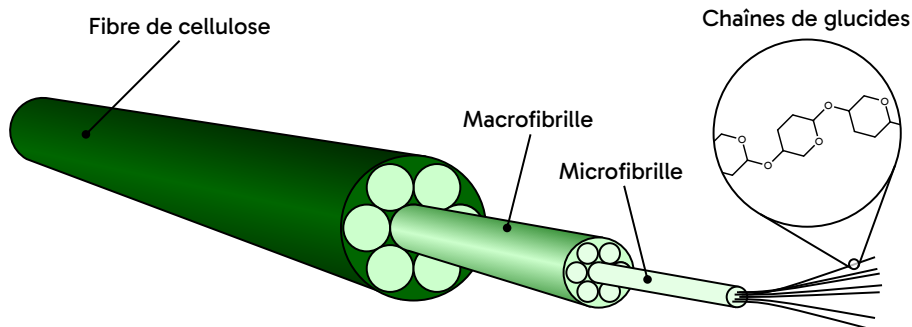


Figure 3.5 Schéma de la fibre cellulosique

Les fibres cellulosiques constituent les unités de base du bois. Elles présentent quelques caractéristiques qui les rendent propres à la fabrication du papier :

- › Elles sont relativement incolores (blanches).
- › Elles existent dans une large gamme de dimensions, mais elles sont creuses et plus longues que larges (de 50 à 100 fois plus longues).
- › Elles sont hydrophiles, c'est-à-dire qu'elles ont une grande affinité pour l'eau, mais elles y sont insolubles.
- › Elles sont poreuses; elles présentent donc une grande capacité d'absorption d'eau et d'adjuvants modificateurs.
- › Gorgées d'eau, elles sont gonflées et souples (au printemps).
- › Séchées, elles s'aplatissent et demeurent raides (à l'automne).
- › Elles présentent une résistance élevée à la rupture par traction et à la déformation plastique.
- › Elles sont souples (flexibles, adaptables).
- › Elles présentent une bonne stabilité chimique.
- › Elles constituent un excellent isolant thermique et acoustique.

La longueur des fibres et l'épaisseur de leur paroi cellulaire sont de loin les caractéristiques structurales les plus importantes pour l'industrie papetière. Une longueur minimale est nécessaire pour permettre la liaison entre les fibres et assurer une résistance au déchirement. On a constaté, en pratique, que les fibres à parois épaisses sont moins adaptables que celles à parois minces.

En général, ces caractéristiques existent dans un équilibre idéal lorsque la plus grande partie possible de la lignine est extraite des fibres et qu'une quantité importante d'hémicelluloses est conservée. Ces propriétés sont grandement améliorées par le raffinage, qui provoque l'élimination de la membrane primaire des fibres et leur permet de s'hydrater et de gonfler, ce qui en augmente la flexibilité et le pouvoir de liaison.

La conformation spatiale de la cellulose détermine ses propriétés physiques et chimiques. Le **tableau 3.3** présente les principales caractéristiques physiques de la fibre cellulosique.

Tableau 3.3 Caractéristiques physiques de la fibre cellulosique

Propriété	Valeur
Diamètre moyen	15 – 30 μm
Masse volumique	1,5 – 1,55 g/cm^3
Allongement à la rupture	20 – 40 %
Module de Young	3 – 36 GPa
Résistance à la traction	300 – 500 MPa
Conductivité thermique	0,06 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ à 23 °C
Coefficient de dilatation thermique	$80\cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Les caractéristiques chimiques de la fibre cellulosique peuvent se résumer comme suit :

- › Sa dégradation thermique commence à 100 °C.
- › Sa combustion se produit vers 380 °C.
- › Elle est insoluble à la fois dans les solvants organiques classiques et dans l'eau.
- › Elle offre une bonne résistance aux acides dilués, aux alcalins ainsi qu'aux huiles et aux graisses.
- › Elle présente une bonne résistance à la corrosion, à la vermine et aux moisissures.
- › Elle est soluble dans les solvants complexes et atypiques suivants :
 - Les solutions aqueuses d'acides, de bases et de sels (iodure de potassium) très concentrées
 - Les systèmes de solvants à base de diméthylsulfoxyde (DMSO)
 - Les systèmes de solvants contenant un halogénure de lithium

Hémicelluloses

La deuxième classe de composants du bois est constituée des hémicelluloses (**figure 3.6**), lesquelles proviennent de cinq sucres différents : 3 sont des hexoses (sucres à 6 atomes C dans leur molécule) et 2 sont des pentoses (sucres à 5 atomes C dans leur molécule).

La combinaison des hexoses crée des polymères qui s'appellent « glucomannanes ». Celle des pentoses avec l'acide uronique forme des structures polymériques appelées « xylanes ». Ces deux types de polymères sont des hémicelluloses. Ils peuvent être associés à la partie cellulosique de la plante ou ils peuvent être liés plus étroitement à la lignine.

Lignine

La lignine est un composé hautement polymérisé que l'on retrouve dans le bois. Elle constitue la couche extérieure de la fibre et a pour rôle principal de cimenter les fibres cellulosiques entre elles (figure 3.7). Elle empêche donc les fibres du bois d'adhérer les unes aux autres.

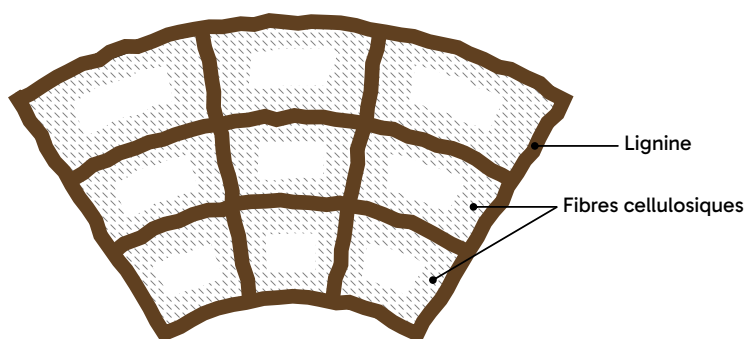


Figure 3.7 Schéma d'une coupe transversale d'une agglomération de fibres de bois

La chimie de la lignine est extrêmement complexe, mais on peut dire, sommairement, que la lignine est formée principalement d'unités de phénylpropane liées ensemble en trois dimensions. Les trois liaisons existantes entre les chaînes latérales de propane et les anneaux de benzène sont brisées au cours des opérations de fabrication de la pâte chimique, de façon à libérer les fibres cellulosiques. La lignine est hydrophobe, c'est-à-dire qu'elle n'aime pas l'eau.

Matières extractibles

Cette appellation englobe plusieurs substances, telles que les acides résiniques, les acides gras, les composés terpéniques et les alcools. Selon les essences, le bois peut contenir jusqu'à 15 % en masse d'extractibles dans certaines variétés tropicales. La plupart de ces substances sont solubles dans l'eau ou dans des solvants organiques neutres et peuvent être enlevées facilement, par extraction à la vapeur, avant la mise en pâte. Parmi les essences de bois nord-américaines, beaucoup ne renferment qu'une proportion de matières extractibles inférieure à 1 % du poids de la matière sèche. Cependant, les pins du Sud en comportent une teneur appréciable et permettent de produire l'huile de pin ainsi que la térébenthine. Malgré leurs faibles proportions, ces substances jouent un rôle important dans de nombreuses propriétés du bois. Elles sont à l'origine de sa couleur, de son odeur et de sa durabilité naturelle, mais aussi de problèmes liés à un dépôt collant appelé « poix », ou *pitch*, sur les machines à papier.

La **figure 3.8** représente de façon schématique la séparation chimique des composants du bois, telle qu'elle est pratiquée par l'industrie et les laboratoires :

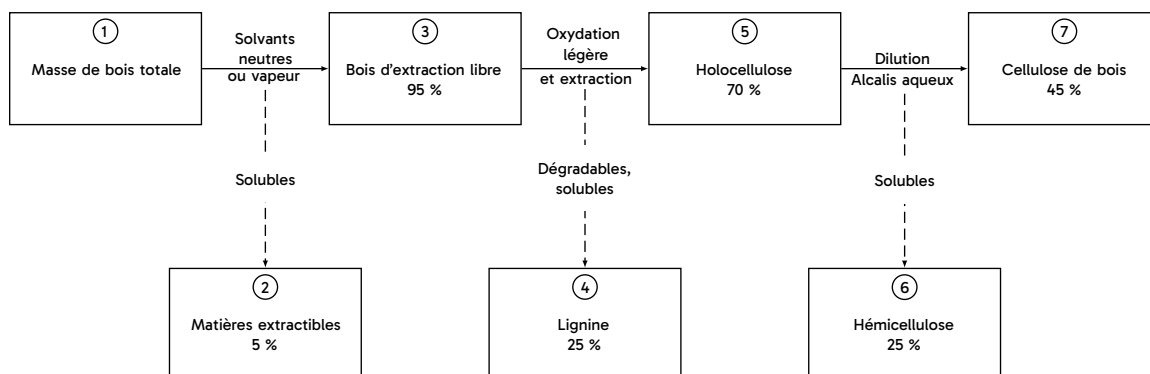


Figure 3.8 Schéma de la séparation chimique des composants du bois

3.2 Étapes de fabrication des pâtes et papiers

La technologie papetière a fait des pas de géant dans les dernières décennies en ce qui a trait à la productivité et à la protection de l'environnement. Les grandes étapes de la fabrication du papier demeurent toutefois inchangées et peuvent se résumer comme suit :

- › L'approvisionnement en fibres
- › La mise en pâte
- › Le blanchiment
- › La formation de la feuille
- › La finition

3.2.1 L'approvisionnement en fibres

Très précieux, le bois sert principalement à la production de matériaux de construction. Papiers et cartons sont d'ailleurs de plus en plus fabriqués à partir des sous-produits des scieries (copeaux, sciures, etc.) ainsi qu'à partir de papiers et cartons recyclés. Le bois rond, provenant de la récolte en forêt, ne constitue donc plus qu'une source minime d'approvisionnement en fibres pour l'industrie papetière. Lorsque c'est encore le cas, les billes de bois acheminées à l'usine sont écorcées. L'écorce est récupérée et utilisée comme combustible pour produire de la vapeur et, occasionnellement, de l'électricité.

3.2.2 La mise en pâte

Le bois est principalement constitué de fibres de cellulose collées ensemble par la lignine. Pour transformer le bois en pâte, ces fibres doivent être séparées. La préparation des pâtes à papier consiste donc en l'extraction des fibres cellulosiques du bois. À ce stade, il s'agit de fibres cellulosiques dites « vierges », car elles n'ont encore jamais été utilisées pour la fabrication de pâtes ni de papiers ou de cartons. Différents procédés permettent l'extraction des fibres, dont les principaux sont :

- › La méthode mécanique
- › La méthode chimique
- › La méthode hybride (combinée)

Une description détaillée de la mise en pâte sera donnée dans les sections suivantes.

3.2.3 Le blanchiment

Les pâtes à papier obtenues grâce aux différents procédés (mécanique, chimique ou hybride) sont d'une couleur plus ou moins écru. Cet aspect peut convenir à la fabrication de certains papiers, notamment les papiers et les cartons d'emballage. Cependant, pour d'autres usages, la couleur souhaitée est le blanc, par exemple pour les papiers destinés à l'impression ou à l'écriture, les papiers d'hygiène ainsi que certains papiers et cartons d'emballage. L'opération de blanchiment compte plusieurs étapes de traitements chimiques, dont le nombre varie selon la blancheur exigée et le type de pâte traitée. Ainsi, les pâtes naturellement claires ne nécessitent qu'une ou deux étapes de blanchiment, tandis que les pâtes naturellement foncées en exigent de six à sept. Des recherches intensives et d'importants investissements ont permis à l'industrie de réduire considérablement l'impact de ce processus sur l'environnement.

3.2.4 La formation de la feuille

Une fois que le degré de blancheur adéquat est atteint, on ajoute un important volume d'eau (99% d'eau et 1% de pâte) avant d'envoyer la composition de fabrication dans la caisse d'arrivée de la table de la machine à papier. Cette teneur précise (1%) est nécessaire afin d'éviter la floculation (assemblage des fibres). Une turbulence est également créée dans la caisse de tête pour réduire le risque de floculation. La suspension fibreuse quitte la caisse de tête sous la forme d'un jet contrôlé pour être répartie de façon uniforme sur une matrice ou toile ajourée, première étape du processus d'égouttage de la suspension fibreuse. Les fibres pourront ainsi y former un matelas entrelacé : la feuille de papier. Par la suite, la presse de la machine à papier permet de retirer davantage d'eau de la feuille, qui en présente encore une forte teneur. La feuille passe entre une série de grands cylindres d'acier qui la compriment afin de l'essorer. Le papier est ensuite soumis à un dernier processus pour réduire sa teneur en eau : l'évaporation. La sécherie est composée d'une nouvelle série de cylindres, chauffés à la vapeur, sur lesquels passe la feuille en continu.

3.2.5 La finition

Pour produire un papier de qualité supérieure présentant un degré de brillance élevé et offrant une durée de conservation plus longue ainsi qu'une plus grande surface d'impression, un couchage peut être ajouté au papier de base sortant de la machine. Pour ce faire, on utilise principalement du kaolin ou du carbonate de calcium (CaCO_3) ainsi que des agents liants, qui sont nécessaires à une bonne adhésion de ces fines matières poudreuses au papier de base. D'autres produits, tels que des azurants optiques, peuvent également être ajoutés pour améliorer l'aspect du papier. Grâce aux azurants optiques, il est possible de faire apparaître la lumière ultraviolette sur le spectre optique, ce qui confère un ton bleuté au blanc du papier. Si d'autres traitements sont appliqués, le papier peut présenter une finition mate ou brillante.

Les schémas présentés aux figures 3.9 et 3.10 permettent de visualiser les grandes étapes employées pour la fabrication de la pâte à papier. Ces étapes peuvent s'exécuter de trois manières : mécanique, chimique et désencrée.

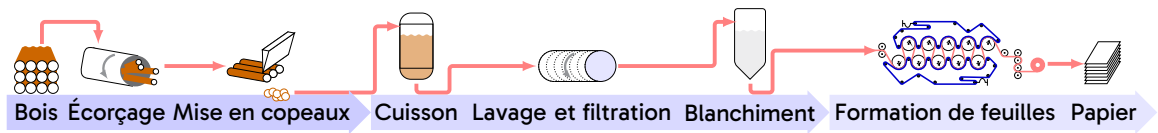


Figure 3.9 Étapes de la fabrication de la pâte à papier de manière chimique

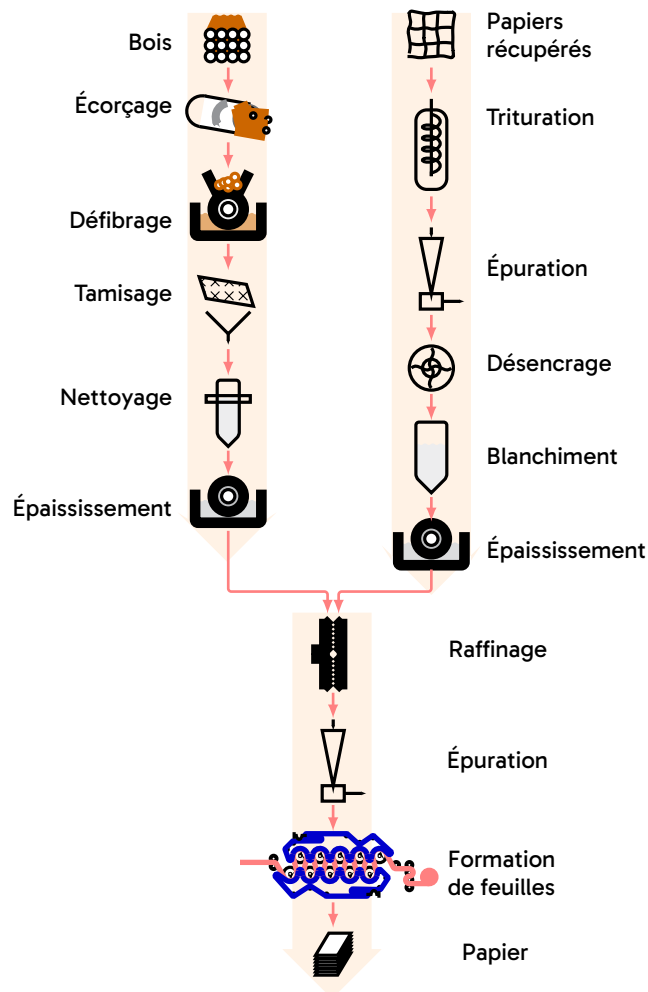


Figure 3.10 Étapes de la fabrication de la pâte à papier de manière mécanique et désencrée

3.3 Types de procédés de mise en pâte

La pâte constitue la matière première de la fabrication du papier. Pour obtenir le papier, il faut :

- › Conserver la cellulose et les hémicelluloses présentes initialement dans le bois.
- › Éliminer (autant que possible) la lignine, la « colle naturelle » qui cimente les fibres cellulosiques ensemble.

Autrement dit, la mise en pâte consiste à libérer les fibres cellulosiques contenues dans le bois, les végétaux ligneux ou d'autres sources de fibres, tout en conservant le mieux possible leurs propriétés mécaniques, optiques et morphologiques et en cherchant à éliminer la lignine (au moyen de procédés chimiques).

La lignine possède deux propriétés fondamentales qui peuvent être exploitées pour la fabrication de la pâte à papier : elle ramollit sous l'action de la chaleur; elle est dissoute par une série de réactifs.

Ces caractéristiques de la lignine ont permis la mise au point de deux méthodes de base pour réduire le bois en pâte à papier :

- › Le procédé mécanique
- › Le procédé chimique

Il existe plusieurs procédés hybrides qui combinent ces deux méthodes de base et qui conduisent à l'obtention d'une variété de pâtes.

Le schéma présenté à la [figure 3.11](#) met en évidence les combinaisons de méthodes de mise en pâte existantes et la variété de pâtes à papier qui en résultent.

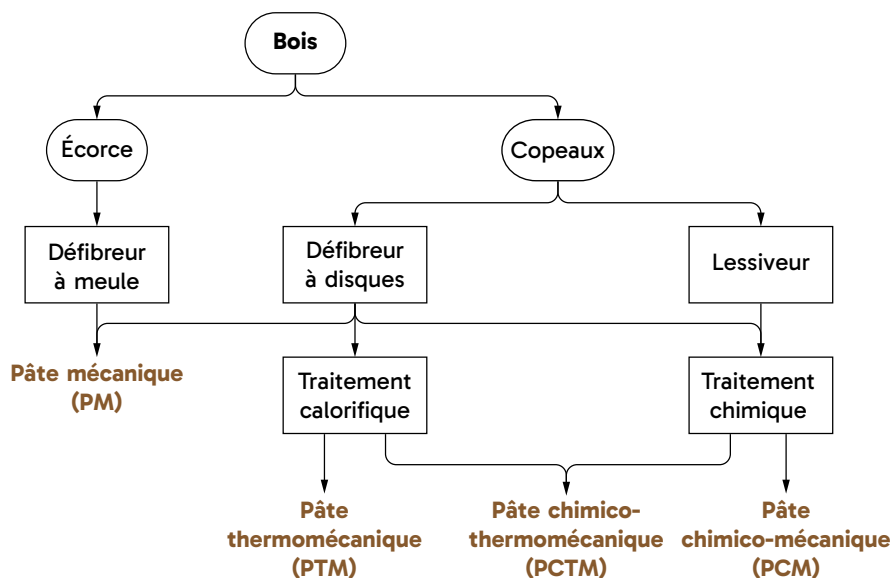


Figure 3.11 Variétés de pâtes à papier

3.3.1 Pâtes mécaniques

Les pâtes mécaniques sont obtenues grâce au travail mécanique du bois en présence de chaleur, qui permet de ramollir la lignine. De cette manière, on peut séparer brutalement les fibres. Ces fibres ou les débris de fibres ainsi obtenues contiennent de la lignine sur leurs parois.

Cette méthode mécanique a quelques désavantages :

- › Les fibres obtenues sont courtes, donc le papier aura une résistance mécanique faible.
- › La présence de la lignine dans la pâte mécanique cause le jaunissement et la détérioration du papier au fil du temps.
- › La lignine présente altère aussi les propriétés de résistance mécanique du papier et rend difficile le blanchiment de la pâte.

Cependant, la méthode mécanique offre aussi quelques avantages :

- › L'utilisation de presque toute la matière première, c'est-à-dire le bois. La perte de matière ligneuse est d'environ 5%, d'où le haut rendement du procédé, qui est d'environ 95%. Pour cette raison, les pâtes mécaniques sont souvent appelées « pâtes à haut rendement ».
- › La présence de la lignine dans la pâte confère au papier une excellente opacité et une bonne imprimabilité.
- › Le coût de revient est faible, car le rendement de production est élevé.

La température est la variable qui différencie les procédés de réduction en pâte par voie mécanique. La pâte mécanique peut être obtenue de trois manières :

- › En déchetant des billes de bois écorcées sur des meules abrasives, on applique le procédé de défibrage du bois à la meule. La pâte obtenue est la pâte mécanique de défibreur. Dans ce cas, on constate un faible chauffage, car le bois est sous forme de billots de 1,2 m de long et la chaleur est produite seulement par la friction du bois contre la meule. Les fibres obtenues sont courtes et endommagées.
- › Un procédé dérivé du premier s'appelle le « raffinage » et consiste à déchetter des copeaux de bois entre deux plaques en acier rainurées qui tournent, ou dont l'une est stationnaire. La pâte obtenue se trouve moins dégradée que dans le procédé à la meule. Ce type de pâte s'appelle « pâte mécanique de raffineur ».
- › Pour augmenter encore la proportion des fibres longues, les copeaux sont traités à la vapeur avant et pendant le raffinage et ils sont déchetés sous pression. Dans ce cas, on obtient une pâte thermomécanique (PTM).

Étant donné que le procédé mécanique endommage les fibres et qu'il n'en extrait pas la lignine, ce type de pâte est généralement utilisé pour la fabrication de produits qui nécessitent moins de résistance (les papiers non permanents), tels que les journaux, les circulaires, certains papiers hygiéniques, etc.

Pâtes de meule

La pâte de meule (*stone groundwood pulp* – SGW) est obtenue en utilisant la méthode mécanique la plus ancienne, qui a été inventée vers 1840. Les rondins défibrés ou billes sont pressés contre une meule rotative (figure 3.12, page suivante), ce qui permet ainsi de séparer les fibres par cisaillement. On ajoute de l'eau pour faciliter le processus (elle lave la surface de la meule et entraîne la pâte) et refroidir la meule, qui s'échauffe sous la friction des rondins pressés contre la pierre. Ensuite, la pâte passe par de fines toiles afin que seules les fibres de cellulose puissent continuer leur chemin. Elle est également nettoyée de tout corps étranger comme le sable ou la poussière.

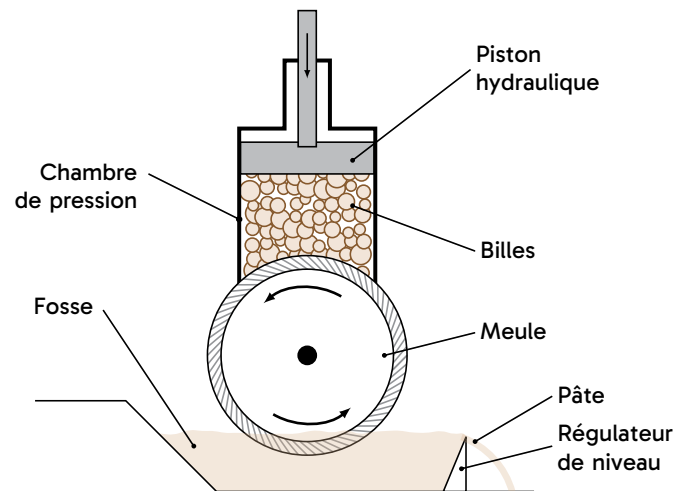


Figure 3.12 Schéma d'un défibreur à meule

Pour ce procédé, il faudra essentiellement des fibres longues, car elles sont plus résistantes (cellules à parois plus épaisses). La pâte obtenue présente donc des fragments de fibres toujours liées par la lignine, des bûchettes (gros éléments de fibres agglutinées), des fibres longues et courtes ainsi que des éléments fins qui serviront à améliorer la résistance à la traction ou l'opacité du papier. Obtenue à froid, la pâte dite « mécanique blanche » est de teinte assez claire, mais de faible ténacité, car ses fibres sont brisées.

Pâtes mécaniques de raffineur

Le raffinage consiste à projeter et à compresser les copeaux de bois à une température élevée entre les disques de métal d'un raffineur jusqu'à ce qu'ils se désagrègent en fibres libres et malléables ayant la forme d'une spirale. Il existe deux modes de raffinage :

- › Le raffinage à pression atmosphérique, qui produit la pâte mécanique de raffineur – procédé **PMR**
- › Le raffinage sous pression, qui donne la **PTM**, décrite à la [section 3.3.2](#)

Raffinage à pression atmosphérique

Dans ce procédé, on force les copeaux de bois à passer entre deux plaques métalliques qui sont installées sur les disques du raffineur et dont la surface présente des lames en relief. Ces lames ont différentes dimensions et sont disposées des plus larges aux plus petites, du centre jusqu'au bord du disque ([figure 3.13](#)). Les copeaux sont admis par le centre des plaques et évacués en périphérie sous l'action de la force centrifuge ([figure 3.14](#)), qui est créée par la vitesse de rotation des plaques et oblige donc les copeaux à passer entre les plaques et à subir le processus de raffinage. Une quantité d'eau bien dosée est également introduite par l'ouverture centrale des plaques pour favoriser l'hydratation (gonflement) des fibres.

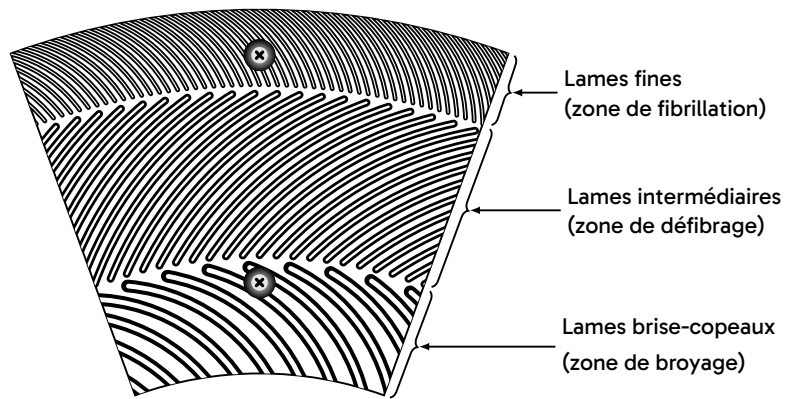


Figure 3.13 Schéma d'une section d'un disque de raffineur

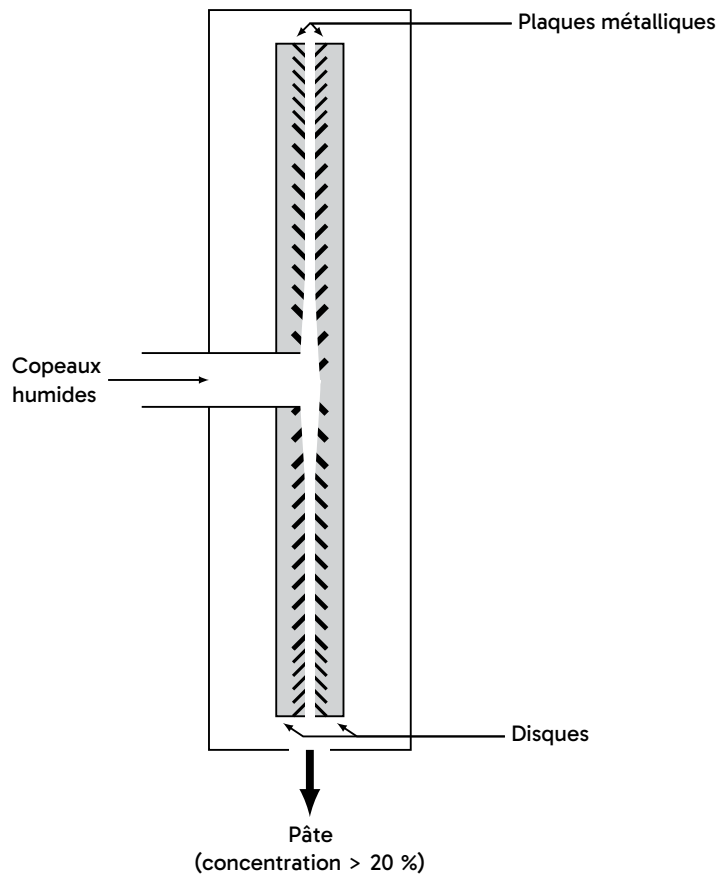


Figure 3.14 Schéma simplifié d'un raffineur à disques

En général, on effectue le raffinage à pression atmosphérique à l'aide de deux étages d'appareils. Les raffineurs du premier étage défibrent les copeaux, tandis que ceux du second étage s'occupent de la fibrillation. À cet effet, on se sert de plaques à lames grossières au premier étage et de plaques à lames fines au second étage. Ce système est le plus répandu dans les usines papetières québécoises.

3.3.2 Pâtes thermomécaniques

Le suédois Arno Asplund a été le premier à avoir effectué le raffinage sous pression des copeaux de bois. Ce procédé est basé sur le même principe que le raffinage à pression atmosphérique, mais il comporte un étuvage des copeaux avant leur passage dans le raffineur, qui est également maintenu sous pression. L'étuvage est un prétraitement à la vapeur sous pression qui dure quelques minutes; il s'effectue à une pression d'environ 200 kPa et à une température de 120 à 130 °C. Cette opération est menée dans un réservoir d'étuvage horizontal ou vertical. Son objectif est de ramollir la lignine, et donc de réduire la rigidité des copeaux et faciliter leur passage dans la zone de broyage du raffineur. Les copeaux qui sont raffinés sans d'abord être étuvés – comme c'est le cas dans le procédé PMR classique – sont fragiles et tendent à se fragmenter sous la contrainte mécanique. L'étuvage favorise la séparation des fibres tout en les gardant à peu près intactes : la pâte contient alors plus de fibres longues et moins de débris ou de bûchettes. Mais il n'assure pas à lui seul la qualité de la pâte, car il ne suffit pas de désagréger les faisceaux de fibres, il faut aussi briser la paroi secondaire des fibres libres pour obtenir une pâte de qualité.

Le raffinage proprement dit s'effectue dans un raffineur à disques à une pression de 200 kPa et la concentration de raffinage varie entre 20 et 50 %, selon les installations. La pression de la vapeur dans le raffineur est maintenue à une valeur égale ou légèrement supérieure à celle du réservoir d'étuvage.

Comme les disques des raffineurs tournent à grande vitesse et que leur écartement n'est que d'une fraction de millimètre, il est essentiel d'empêcher l'introduction de grains de sable, de matières abrasives, d'éclats de métal et de saletés dans ces appareils. La plupart des installations de raffinage sont dotées de laveurs de copeaux et d'épurateurs destinés à extraire les corps étrangers de la matière ligneuse et à les éliminer par différence de densité et de taille. Les méthodes utilisées dans l'industrie font appel à un aimant, à un laveur de copeaux, à un épurateur pneumatique ou bien à une combinaison de ces trois pièces d'équipement.

3.3.3 Pâtes chimiques

Le procédé chimique de mise en pâte consiste à dissoudre en totalité ou en partie la lignine du bois à l'aide de produits chimiques et de chaleur, tout en conservant le plus possible la cellulose et les hémicelluloses dans leur intégralité. Les fibres obtenues à la suite de ce traitement chimique sont longues et uniformes. Selon le but visé, on peut éliminer une partie ou la quasi-totalité de la lignine. Le degré de délignification varie en fonction de la nature et de l'intensité du traitement chimique appliqué : plus le traitement est agressif, plus on élimine de lignine, mais on détruit en même temps une partie de la cellulose. En pratique, on arrive à dissoudre jusqu'à 95 % de la lignine présente dans le bois, mais on dégrade en même temps environ 75 % des hémicelluloses et une certaine quantité de cellulose. Par conséquent, il y a une perte considérable (de 50 à 60 %) de la matière première, raison pour laquelle le rendement du procédé est de 40 à 50 %.

Les pâtes chimiques sont constituées de fibres cellulosiques qui préservent très bien leurs caractéristiques morphologiques d'origine. Donc, ces pâtes peuvent être utilisées pour la fabrication de produits qui demandent une grande résistance mécanique tels que les papiers pour l'impression et l'écriture, les papiers fins ainsi que les papiers et cartons d'emballage. Elles servent aussi à augmenter la résistance de certains produits, comme les papiers spécialisés.

Le procédé chimique consiste à cuire des copeaux de bois avec les produits chimiques appropriés, dans une solution aqueuse ou organique, à une température élevée et dans des lessiveurs fermés, sous pression. L'action combinée de la chaleur et des produits chimiques permet de dissoudre la lignine, idéalement celle des lamelles moyennes, ainsi qu'une partie des hémicelluloses, et de libérer les longues fibres du bois sans les briser. Cette opération se réalise dans un appareil fermé appelé « lessiveur » (figure 3.15), d'où l'emploi des termes « cuisson » ou « lessivage » du bois. Selon leur conception, les lessiveurs peuvent fonctionner autant en mode discontinu qu'en continu. À la fin de l'opération de cuisson, les matières dissoutes dans la liqueur de cuisson sont concentrées et brûlées dans une chaudière comme source d'énergie. Il existe deux procédés chimiques principaux, le procédé au bisulfite, plus ancien et moins utilisé au Québec, et le procédé kraft (*force* en allemand et en suédois).

Aujourd'hui, le procédé kraft est le procédé de fabrication de pâte chimique le plus répandu dans le monde pour les raisons suivantes : il offre à la pâte de meilleures propriétés de résistance que le procédé au bisulfite; il s'applique à toutes les essences de bois; il a mené à la conception et à la mise en œuvre de systèmes efficaces de récupération des produits chimiques. Toutefois, la chimie de ce processus est indissociable d'un potentiel problème inhérent lié aux composés soufrés malodorants. La figure 3.16, à la page suivante, illustre de manière simplifiée le procédé kraft traditionnel.

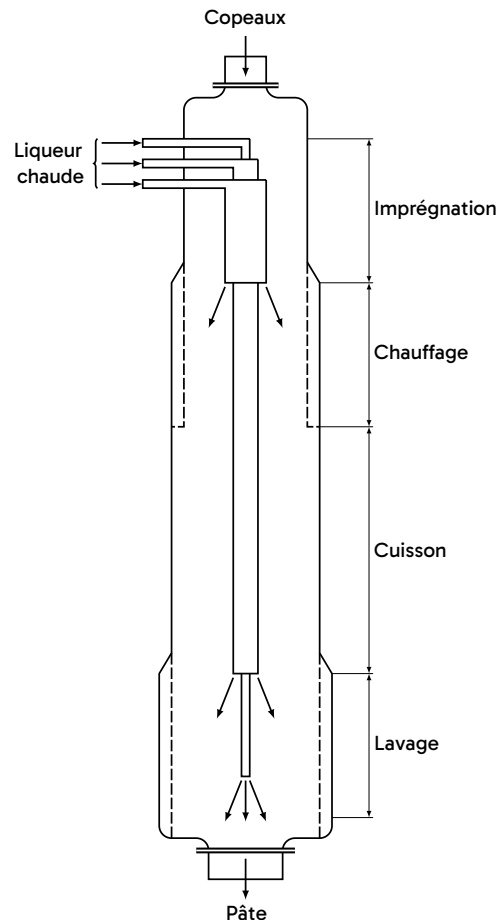


Figure 3.15 Schéma d'un lessiveur

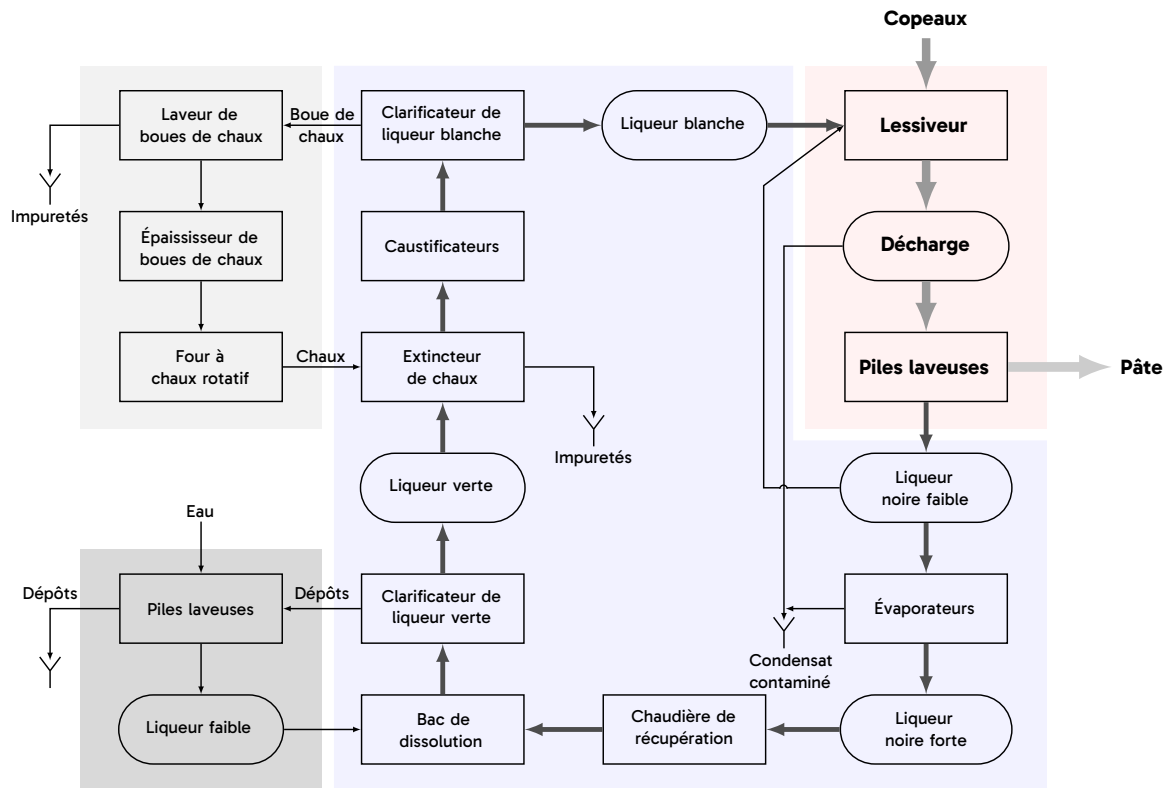


Figure 3.16 Schéma simplifié du procédé kraft

La liqueur blanche, qui contient des produits chimiques de cuisson actifs, le NaOH et le sulfure de sodium (Na_2S), est d'abord utilisée pour la cuisson des copeaux. La liqueur noire, ou liqueur résiduaire, qui contient les produits de réaction de la solubilisation de la lignine, est concentrée par évaporation, puis brûlée dans une chaudière de récupération pour obtenir un salin inorganique composé de carbonate de soude (Na_2CO_3) et de sulfure de sodium (Na_2S). Le salin est ensuite dissous pour former une liqueur verte, qui est caustifiée à la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour convertir le Na_2CO_3 en NaOH et régénérer la liqueur blanche initiale.

Dans une usine de pâte kraft, le circuit de récupération remplit trois fonctions :

- › La récupération des produits chimiques minéraux liés à la fabrication de la pâte
- › La destruction des matières organiques dissoutes et la récupération de l'énergie sous forme de vapeur de procédé et d'électricité
- › La récupération des sous-produits organiques valorisables

La valeur calorifique de la liqueur noire récupérable suffit généralement à assurer l'autonomie des usines de pâte kraft en chaleur et en électricité. Les sous-produits organiques ne jouent qu'un rôle économique limité dans la plupart d'entre elles.

Le **tableau 3.4** présente une comparaison des procédés de mise en pâte.

Tableau 3.4 Comparaison des procédés de mise en pâte

Mécanique	Hybride	Chimique
Mise en pâte à l'aide d'énergie mécanique (peu ou pas d'énergie chimique et de chaleur)	Combinaison de traitements chimiques et mécaniques	Mise en pâte à l'aide de produits chimiques et d'énergie (peu ou pas d'énergie mécanique)
Rendement élevé (de 90 à 95%)	Rendement moyen	Rendement faible (de 40 à 55%)
Fibres courtes contenant des impuretés	Qualité moyenne	Fibres longues et pures
Papier de faible résistance	S/O	Papier de résistance élevée
Bonne qualité d'impression	S/O	Faible qualité d'impression
Blanchiment difficile	S/O	Blanchiment facile



3.4 Traitements secondaires de la pâte

Il existe dans tous les procédés de réduction en pâte une séquence d'opérations appelées « traitements secondaires » qui visent à améliorer la qualité de la pâte. Il s'agit des opérations suivantes :

- 1) le classage;
- 2) l'épuration;
- 3) l'épaississement de la pâte;
- 4) le raffinage des refus de classage.

La **figure 3.17** illustre le circuit de la pâte et met en évidence ces quatre types de traitements.

- › Le **classage** consiste à séparer les éléments grossiers et homogènes des bonnes fibres cellulosiques.
- › L'**épuration** vise à éliminer les impuretés lourdes et hétérogènes (grains de sable, éclats de métal et matières abrasives) ainsi que les impuretés légères (débris d'écorce et mini-bûchettes) demeurées dans la pâte après le classage. Le classage et l'épuration se font à faible concentration de pâte. Pour cette raison, il faut épaissir la pâte avant qu'elle passe aux étapes suivantes de sa préparation.
- › L'**épaississement** permet la réutilisation de l'eau blanche et facilite le stockage de la pâte.
- › Le **raffinage des refus de classage** a comme objectif de récupérer et de fibriller les fibres agglomérées (amas).

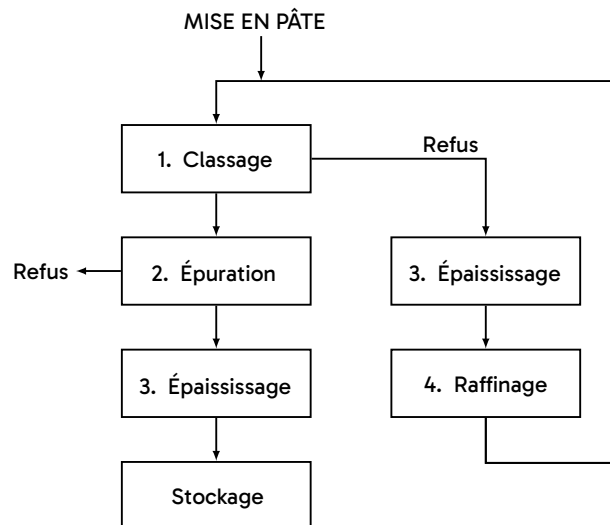


Figure 3.17 Schématisation des traitements secondaires de la pâte

Il y a une grande diversité d'équipements utilisés dans l'industrie pour effectuer les traitements secondaires de la pâte. La classification résumée dans le **tableau 3.5** se veut globale, mais elle n'est pas exhaustive.

Tableau 3.5 Classification des équipements utilisés pour effectuer les traitements secondaires de la pâte

Opération	Équipements
Classage	<ul style="list-style-type: none"> • Classeur centrifuge par gravité • Classeur centripète sous pression • Classeur centrifuge sous pression
Épuration	<ul style="list-style-type: none"> • Épurateur tourbillonnaire
Épaississement	<ul style="list-style-type: none"> • Épaississeur par gravité • Épaississeur à disques • Presse à vis
Raffinage des refus	<ul style="list-style-type: none"> • Raffineurs à disque

3.4.1 Classage

Le classage a pour but de séparer les particules grossières homogènes (bûchettes, agglomérations de fibres et nœuds) des bonnes fibres cellulosiques. L'appareil utilisé à cette fin est un classeur et il est habituellement composé d'une plaque métallique perforée appelée « tamis » et d'un dispositif de nettoyage qui empêche l'obstruction des perforations de cette plaque. Ces perforations ont une dimension qui varie selon le classage désiré. Elles peuvent être sous forme de fentes ou de trous. Le nettoyage peut se faire de façon continue ou intermittente; il consiste en un branlement, une vibration, un balayage hydraulique ou un rinçage ou, le plus souvent, une pulsation qui permet l'écoulement de pâte au moyen d'aubes mobiles, de pales ou de saillies.

Dans l'industrie des pâtes et papiers, il est nécessaire de traiter à peu de frais des volumes considérables de pâte et d'effectuer une séparation parfaite des fibres. Pour ce faire, on peut employer différents types de classeurs. Le **tableau 3.6**, à la page suivante, présente les schémas et les caractéristiques de quelques-uns d'entre eux, les plus utilisés par l'industrie papetière.

Tableau 3.6 Schémas simplifiés et caractéristiques de quelques classeurs

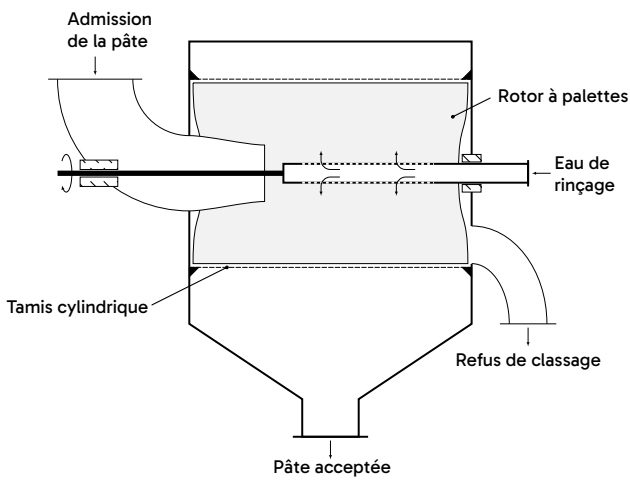
Type de classeur	Caractéristiques et représentation schématique
Centrifuge par gravité	<ul style="list-style-type: none"> • Il est composé d'un tamis cylindrique horizontal (stator), à l'intérieur duquel tourne un arbre muni de pales (rotor).  <ul style="list-style-type: none"> • Le tamis comporte des trous de deux tailles : les plus petits sont disposés sur les deux premiers tiers de sa longueur à partir de la zone d'alimentation de la pâte, et les plus gros sont sur le dernier tiers. • Les pales du rotor ont deux rôles : <ul style="list-style-type: none"> - assurer la distribution uniforme de la suspension fibreuse sur toute la surface du tamis; - transmettre aux fibres la force centrifuge nécessaire pour qu'elles traversent le tamis. • L'alimentation de la pâte se fait de manière axiale, à travers le rotor – son entraînement à l'intérieur force les fibres acceptables à traverser le tamis, tandis que les refus s'accumulent dans le rotor, sur les surfaces criblantes. • Principe de fonctionnement : Les bonnes fibres, complètement hydratées, ont une densité relative voisine de celle de l'eau. Ainsi, quand la pâte est mise en rotation par le rotor, elles ont tendance à suivre le sens de l'écoulement de l'eau, qui passe en majeure partie à travers le tamis. Les impuretés ne sont pas soumises à l'effet de la force centrifuge; elles sont plaquées sur la surface interne du tamis, puis entraînées vers la sortie des refus. • Ce type de classeur se comporte donc de façon semblable à une centrifugeuse à panier (aussi appelée « centrifugeuse-essoreuse »).

Tableau 3.6 Schémas simplifiés et caractéristiques de quelques classeurs (*suite*)

Type de classeur	Caractéristiques et représentation schématique
Centrifuge sous pression	<ul style="list-style-type: none"> • Il est composé d'un tamis cylindrique fixe (stator), à l'intérieur duquel tourne un tambour doté de saillies qui agit comme organe de nettoyage du tamis. <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <ul style="list-style-type: none"> • Principe de fonctionnement : La pâte est alimentée de façon tangentielle dans l'appareil et dirigée vers le tamis. Les fibres acceptables, soumises à la force centrifuge créée par l'alimentation en angle et la rotation du tambour central, traversent le matelas fibreux et le tamis. Les refus, qui se détachent du tamis, se déplacent en spirale vers le bas de l'appareil sous l'effet de la gravité. La concentration des refus augmente au cours de leur descente vers la sortie. • La pression d'alimentation varie entre 200 et 400 kPa. • L'efficacité maximale est atteinte quand la concentration de la pâte est de 1,5% au moment de l'alimentation.

3.4.2 Épuration

Le deuxième traitement secondaire de la pâte à papier est l'épuration. La pâte mécanique peut contenir de fines particules de corps étrangers (morceaux d'écorce, grains de sable, gravier, éclats de métal, matières abrasives). Du fait de leur petite taille, ces particules ne peuvent être éliminées de la pâte par le classage. Cependant, en raison de leur petite surface et de leur forte densité, on peut les séparer des fibres cellulosiques au moyen d'épurateurs tourbillonnaires (figure 3.18).

Les caractéristiques et le principe de fonctionnement d'un épurateur tourbillonnaire se résument comme suit :

- › Sa partie supérieure est constituée d'un corps cylindrique, et sa partie inférieure, d'un corps conique.
- › L'orifice permettant l'alimentation de la pâte est situé dans la partie supérieure de l'épurateur et celui pour l'évacuation des refus est à l'extrémité inférieure du cône.
- › L'alimentation de la pâte s'effectue à haute vitesse, de façon tangentielle, et ce trajet en spirale transmet à la pâte un mouvement tourbillonnaire qui fournit la force centrifuge suffisante pour produire un effet de cisaillement.
- › À mesure que la pâte descend dans l'appareil, elle prend de la vitesse, ce qui génère une force centrifuge plus élevée près du centre, et les particules plus denses sont entraînées vers l'extérieur.
- › Les fibres acceptables sont dirigées dans un mouvement ascendant vers la sortie réservée à la pâte acceptée.
- › La force centrifuge crée un noyau d'air ou de vide le long de l'axe principal de l'épurateur, tandis que la pâte circule en deux spirales ayant le même sens de rotation, celle située à l'extérieur se dirigeant vers le bas et celle à l'intérieur, vers le haut.
- › Les débris fins possédant une masse volumique plus grande que celle des fibres acceptables sont davantage soumis à la force centrifuge, qui les dirige vers la paroi de l'épurateur en un mouvement descendant.
- › La pâte épurée monte grâce au vortex pour sortir par l'orifice supérieur.
- › Ce type d'épurateur se comporte de façon semblable à un hydrocyclone; il est donc fréquent que plusieurs épurateurs de ce type soient installés en série pour augmenter l'efficacité du processus.

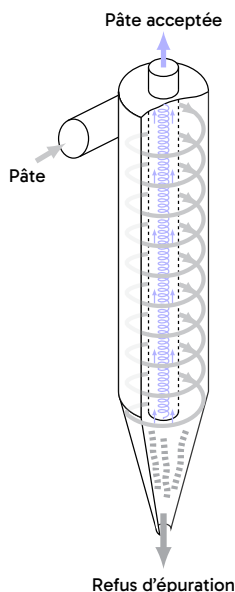


Figure 3.18 Schéma d'un épurateur tourbillonnaire

3.4.3 Épaississement

Après les traitements à faible concentration (de 0,5 à 2%) que sont le classage et l'épuration, il faut épaissir la pâte pour pouvoir la soumettre aux autres traitements de préparation. L'épaississement consiste à augmenter la concentration de la pâte à une valeur appropriée, qui peut aller de 4% jusqu'à plus de 20%. Ce pourcentage varie si les traitements subséquents sont effectués localement ou si la pâte doit être transportée sur une longue distance. L'épaississement facilite le stockage et le transport de la pâte et permet surtout le recyclage de l'eau blanche. En retournant cette eau dans le circuit de conditionnement de la pâte, il est ainsi possible de récupérer les bonnes fibres cellulosiques qu'elle contient et de réduire la consommation d'eau fraîche.

Il existe de nombreux types d'épaississeurs en usage dans l'industrie papetière, mais nous présentons les plus courants dans le [tableau 3.7](#).

Tableau 3.7 Schémas simplifiés et caractéristiques de quelques épaississeurs

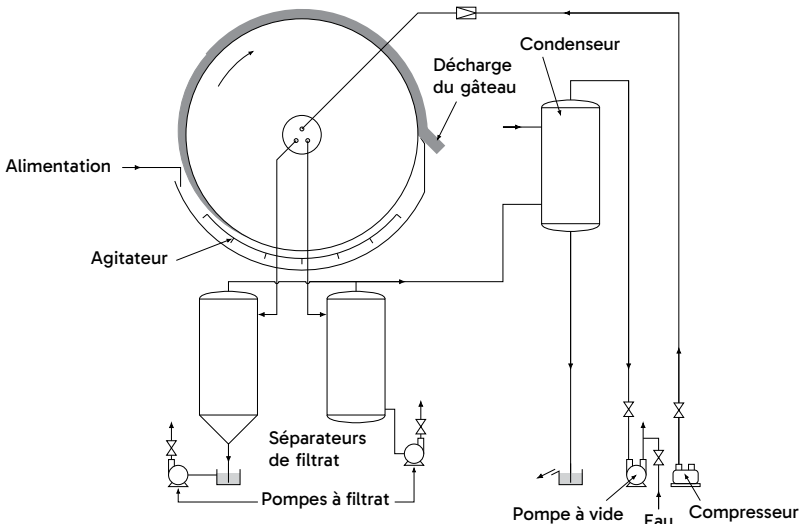
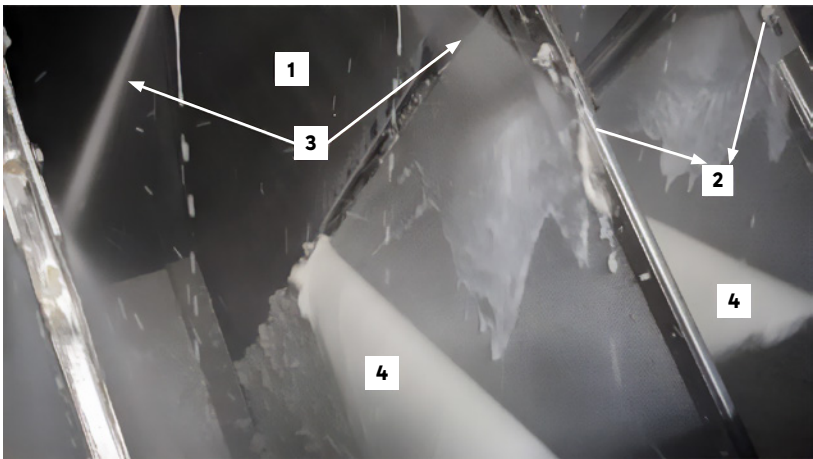
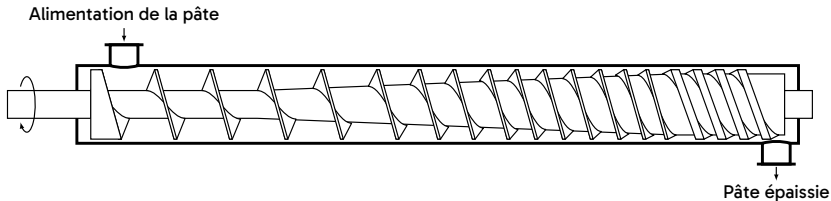
Type d'épaississeur	Caractéristiques et représentation schématique
Par gravité	<ul style="list-style-type: none"> • Il est composé d'un cylindre rotatif qui est muni d'un tamis ou d'une toile et qui tourne dans un bac contenant la pâte. • La pâte adhère à la surface du cylindre filtrant, tandis que l'eau passe à l'intérieur sous l'effet de gravité créé par la différence de niveau entre le liquide du bac et celui à l'intérieur du cylindre. • L'eau s'évacue par l'une des extrémités du cylindre; les fibres retenues sur le tambour filtrant forment un matelas de pâte qui est détaché par un rouleau leveur. • La concentration en fibres obtenue est inférieure à 10%, soit de 4 à 8%, et varie selon le type de pâte. • Un débit d'alimentation trop élevé peut diminuer l'efficacité de l'épaississeur par gravité, car la turbulence provoquée dans le bac empêche la formation du matelas fibreux sur le cylindre rotatif. 

Tableau 3.7 Schémas simplifiés et caractéristiques de quelques épaisseurs (*suite*)

Type d'épaisseur	Caractéristiques et représentation schématique
À disques	<ul style="list-style-type: none"> • Il comporte des disques filtrants aspirants qui tournent dans un bac rempli de pâte. Ces disques sont constitués de segments qui sont revêtus, sur leurs deux faces, d'un tamis fin ou d'une toile. Ils sont installés à la verticale sur un arbre creux qui est relié à une colonne barométrique. • Le vide n'est établi que dans la partie des disques qui se trouve immergée dans la pâte. Grâce à ce vide, les fibres forment sur les disques un matelas, que l'eau traverse pour s'écouler dans l'arbre creux vers la colonne barométrique. • Le filtrat est suffisamment exempt de fibres pour servir d'eau de rinçage. • Lorsque les disques émergent de la pâte, des rinceurs en détachent le matelas fibreux. • La concentration obtenue est de l'ordre de 10 à 12%.  <p>Épaisseur à disques de l'usine Fibres Sustana, à Breakeyville : 1 = enceinte du filtre à disques; 2 = disques; 3 = rinceurs; 4 = gâteau lavé (en train de se détacher de la surface des disques)</p>
Presse à vis	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les épaisir, on soumet habituellement les refus de classage à l'action d'une presse à vis afin d'en éliminer le plus d'eau résiduelle possible et d'en augmenter la concentration (à une teneur de 20% et plus) de façon à pouvoir les raffiner. • Elle permet d'extraire l'eau de la pâte en la comprimant au moyen d'une vis sans fin dans un cylindre perforé. 

3.4.4 Raffinage des refus

Ce procédé vise à récupérer les bonnes fibres contenues dans les refus. Pour ce faire, on utilise des raffineurs à disques, qui assurent la fibrillation des fibres récupérées. Ce raffinage s'effectue à haute concentration (teneur de 20 % et plus). La description et le schéma d'un raffineur à disques ont été présentés à la [section 3.3.1](#).

3.5 Blanchiment de la pâte

Le blanchiment est une étape absolument nécessaire à la fabrication d'un produit de qualité supérieure. Quelle que soit la méthode de mise en pâte employée, la matière obtenue présente une couleur tirant sur le marron. Toutes les pâtes peuvent donc être soumises à ce traitement pour gagner un degré de blancheur. Cette étape est d'une importance capitale dans la fabrication des papiers d'impression de qualité supérieure, car la blancheur permet un meilleur rendu des couleurs.

L'objectif principal du blanchiment consiste à éliminer la couleur d'une pâte sans en détériorer les propriétés mécaniques.

Il existe deux méthodes pour traiter les pâtes vierges :

- › **L'éclaircissement du papier** – Cette méthode consiste à utiliser des produits sélectifs qui détruisent certains groupements chromophores de la lignine, sans que celle-ci soit réellement dissoute ni éliminée. Elle s'applique aux pâtes mécaniques, à forte teneur en lignine. L'effet de cette méthode de blanchiment n'est pas permanent.
- › **Le blanchiment par dissolution** – Cette méthode vise à éliminer complètement la lignine résiduelle. Elle s'applique aux pâtes chimiques qui contiennent une teneur en lignine maximale de 5% et s'effectue dans une tour de blanchiment en plusieurs étapes. Chacune de ces étapes est suivie d'un lavage de la pâte.

La teneur en lignine est déterminée par l'indice de Roe ou l'indice Kappa. La blancheur d'une pâte est son aptitude à réfléchir une lumière monochromatique par comparaison à celle d'un étalon connu (MgO). Elle s'exprime au moyen d'un chiffre (de 0 à 100), 0 étant attribué au corps noir et 100, à l'étalon blanc. Les valeurs typiques de la blancheur initiale intrinsèque des pâtes sont présentées dans le [tableau 3.8](#).

Tableau 3.8 Blancheur initiale intrinsèque des pâtes

Pâte écru	Blancheur
Kraft	15 – 30
Bisulfite	40 – 50
Mécanique, sulfite, bisulfite	50 – 65

Le choix d'un agent de blanchiment parmi les nombreux réactifs offerts sur le marché est fonction de divers facteurs, comme la blancheur finale, qui dépend entre autres du type de pâte et, donc, de la blancheur initiale intrinsèque. Le **tableau 3.9** fait état des exigences en matière de qualité auxquelles doit satisfaire la pâte produite, selon l'usage prévu.

Tableau 3.9 Blancheur et exigences en matière de qualité pour différents types de papiers

Type de papier	Blancheur	Exigences en matière de qualité
Journaux et annuaires	58 – 62	Faible teinte jaune, haute opacité
Spécial (supercalandré, couché)	65 – 80	S/O
Impression et écriture	80 – 90	Blancheur stable, bonne coloration
Usage sanitaire et hygiénique	78 – 80	Belle apparence, propreté

Dans le **tableau 3.10**, nous présentons une synthèse des caractéristiques et des conditions opératoires d'usage des principaux agents de blanchiment de la pâte à papier.

Tableau 3.10 Caractéristiques et conditions opératoires des principaux agents de blanchiment de la pâte à papier

Agent de blanchiment	Caractéristiques	Conditions opératoires
Hypochlorite de sodium (NaOCl)	<ul style="list-style-type: none"> Il provoque une oxydation et un jaunissement de la lignine. Il est utilisé pour le blanchiment des pâtes à faible teneur en fibres mécaniques. 	<ul style="list-style-type: none"> Concentration de la pâte à 10 % Milieu alcalin (pH de 9,5) Température de 35 °C Durée de 60 min 1,5 % par rapport à la pâte anhydre
Chlore (Cl ₂)	<ul style="list-style-type: none"> Il est de moins en moins utilisé comme agent de blanchiment en raison de son effet néfaste sur l'environnement. 	<ul style="list-style-type: none"> Concentration de la pâte de 2,5 à 3,5 % Milieu acide (pH de 1,6 à 2,2) Température de 25 °C Durée de 10 à 15 min De 4 à 6 % par rapport à la pâte anhydre
Hydrosulfite (Na ₂ S ₂ O ₄)	<ul style="list-style-type: none"> Il est utilisé pour le blanchiment de tous les types de pâtes. 	<ul style="list-style-type: none"> Concentration de la pâte à 5 % Milieu acide (pH de 5,5 à 6) Température de 50 à 60 °C Durée de 30 à 60 min 0,8 % par rapport à la pâte anhydre
Peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂)	<ul style="list-style-type: none"> Il est utilisé pour le blanchiment de tous les types de pâtes. 	<ul style="list-style-type: none"> Milieu alcalin (pH de 10,5 à 11,5) Température de 70 °C Durée de 1 à 3 h

Tableau 3.10 Caractéristiques et conditions opératoires des principaux agents de blanchiment de la pâte à papier (suite)

Agent de blanchiment	Caractéristiques	Conditions opératoires
Ozone (O ₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Il est le plus puissant des agents oxydants de blanchiment. • Il est utilisé pour le blanchiment des pâtes chimiques uniquement, car il n'a aucun effet sur les pâtes mécaniques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Milieu alcalin (pH de 8,7 à 8,9) • Température de 65 à 80 °C • Durée de 1 à 3 min • Traitement préalable de la pâte pour en éliminer les ions métalliques
Oxygène (O ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Il est utilisé pour tous les types de pâtes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Milieu alcalin • Température de 60 °C • Durée de 5 à 10 min • Traitement préalable de la pâte pour en éliminer les ions métalliques
Acide foramidine sulfinique (NH ₂ C(NH)S(O)H)	<ul style="list-style-type: none"> • Il est très coûteux, mais très efficace. 	<ul style="list-style-type: none"> • Température de 60 à 70 °C • Durée de 1 h • De 0,3 à 1,6% d'acide par rapport à la pâte anhydre

3.5.1 Blanchiment des pâtes mécaniques

Le blanchiment des pâtes mécaniques repose sur des méthodes visant à décolorer les groupements chromophores de la lignine sans toutefois la solubiliser. De cette façon, le degré de blancheur de la pâte est d'abord augmenté en limitant au maximum la perte de solides secs et de rendement global du bois. L'effet de décoloration ne perdure pas, et le papier se met à jaunir avec le temps. Étant donné que le résultat n'est pas permanent, la pâte mécanique blanchie est plutôt destinée à la production de journaux, de magazines, de livres ou de papiers à conserver. Le blanchiment s'effectue en une ou deux étapes, en fonction du degré de blancheur final requis. Les étapes varient selon l'agent de blanchiment utilisé : hydrosulfite de sodium ou peroxyde d'hydrogène.

3.5.2 Blanchiment des pâtes chimiques

Le blanchiment de la pâte kraft se fait habituellement en plusieurs étapes, généralement au nombre de quatre à six. Dans les unités de traitement les plus modernes, le blanchiment démarre avec une délignification à l'oxygène, qui permet de réduire la consommation de produits chimiques coûteux et la quantité d'effluents rejetés. Le [tableau 3.11](#), à la page suivante, présente les traitements chimiques couramment utilisés pour le blanchiment ainsi que leurs abréviations.

Tableau 3.11 Traitements chimiques couramment utilisés pour le blanchiment

Traitement	Abréviation	Description
Chloration	C	Réaction avec du Cl ₂ en milieu acide
Extraction alcaline	E	Dissolution des produits de réactions à l'aide du NaOH
Hypochlorite	H	Réaction avec de l'hypochlorite en milieu alcalin
ClO ₂	D	Réaction avec du dioxyde de chlore (ClO ₂)
Cl ₂ et ClO ₂	CD	Ajout de ClO ₂ au chlore
O ₂	O	Utilisation d'oxygène moléculaire à haute pression en milieu alcalin
Extraction à l'oxygène	EO	Extraction alcaline avec de l'oxygène
Peroxyde	P	Réaction avec du peroxyde d'hydrogène en milieu alcalin
Chélatant	Q	Réaction avec un chélatant, EDTA ou DTPA, en milieu acide pour extraction des métaux
Ozone	Z	Utilisation d'ozone gazeux (O ₃)

En raison des pressions exercées par les organisations écologiques ainsi que de la toxicité importante des composés organochlorés, particulièrement les dioxines, plusieurs usines de pâtes et papiers sont passées à l'usage d'autres techniques de blanchiment :

- › Les techniques faibles en chlore (dioxyde de chlore au lieu de gaz chloré)
- › Le blanchiment à l'oxygène, à l'eau oxygénée ou à l'ozone
- › Le traitement aux enzymes avant le blanchiment

Le blanchiment des pâtes chimiques et mécaniques fait appel aux mêmes réactifs, mais le point d'addition, le dosage et les séquences de blanchiment utilisés dans chaque cas diffèrent. Le blanchiment classique des pâtes mécaniques à faible teneur en fibres (<20%) s'effectue à l'aide de chlore (C), d'hypochlorite (H) et de soude caustique (E), selon les séquences CH et CEH.

De nos jours, les producteurs ont tendance à utiliser des papiers mélangés de qualité de plus en plus variable, ce qui provoque souvent une augmentation de la teneur en fibres mécaniques et nécessite l'utilisation d'autres réactifs pour assurer l'efficacité du blanchiment tout en préservant le rendement de la matière. Le chlore et l'hypochlorite sont donc remplacés par de nouveaux agents de blanchiment, comme le peroxyde d'hydrogène (P), l'hydrosulfite de sodium (Y), l'ozone (Z) et l'oxygène (O).

3.6 Machines à papier

Les machines à papier modernes ont des dimensions considérables (généralement jusqu'à 100 m de long et jusqu'à 10 m de large) et une vitesse de roulement allant jusqu'à 1 800 m/min. Leurs composants de base sont les suivants :

- › La caisse d'arrivée (caisse de tête)
- › La table plate
- › Les presses
- › La sécherie
- › La lisse
- › L'enrouleuse

La **caisse d'arrivée** a pour fonction de récupérer la suspension (fibres de papiers dans l'eau) fournie par un répartiteur (pompe de mélange) et de faire passer l'écoulement provenant d'une conduite circulaire à une conduite rectangulaire qui s'étend sur la largeur de la machine à papier, et dont la vitesse est uniforme. Comme la formation et l'uniformité de la feuille finale dépendent de la qualité de la dispersion des fibres et des charges, la conception et le fonctionnement de la caisse d'arrivée sont des points cruciaux du système de fabrication du papier. Les principales fonctions de la caisse d'arrivée sont les suivantes :

- › Répartir uniformément la suspension dans le sens transversal de la machine.
- › Régulariser les courants transversaux et les variations de concentration.
- › Régulariser les gradients de vitesse dans le sens de marche.
- › Créer la turbulence nécessaire à la dispersion des floccs de la suspension.
- › Fournir par les lèvres un jet uniforme qui entre en contact avec la toile à un point précis, selon l'angle voulu.

La **table plate** est une bande sans fin maintenue par des rouleaux et des supports qui permet une première évacuation de l'eau par égouttage et conduit à la formation de la feuille. Cette bande est une toile finement tissée dont les mailles laissent passer l'eau tout en retenant les fibres. Elle peut être constituée de métal ou de plastique et elle se déplace continuellement entre trois rouleaux (figure 3.19) : 1) le rouleau de tête; 2) le rouleau aspirant de la toile; 3) le rouleau d'entraînement de la toile. Pour éliminer l'eau uniformément sur toute la toile, on dispose plusieurs organes d'égouttage (lames de racle ou *hydrofoils*) entre le rouleau de tête et le rouleau aspirant. À la sortie de la table plate, le taux d'humidité de la feuille est de l'ordre de 80 %.

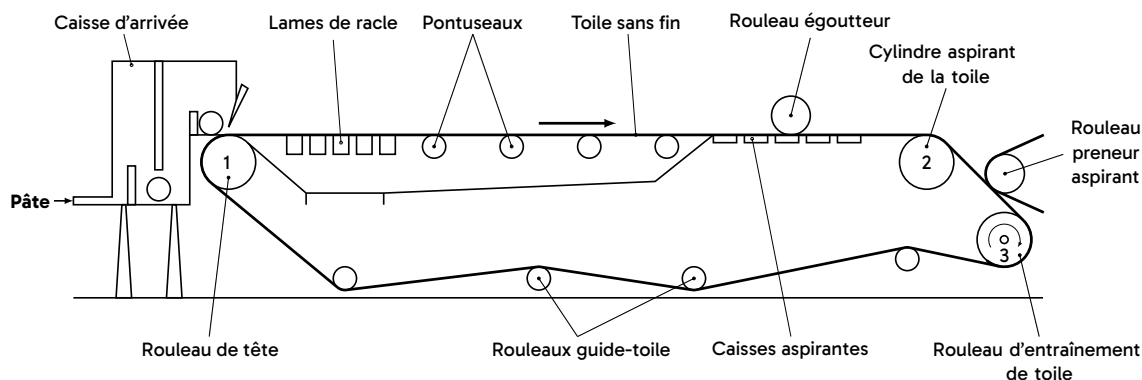


Figure 3.19 Schéma d'une table plate

Les presses ont pour rôle d'extraire le plus d'eau possible de la feuille et de consolider le matelas de fibres. Les autres objectifs des presses dépendent de besoins spécifiques propres au produit fabriqué : l'amélioration de l'état de surface, la diminution de l'épaisseur du papier et l'accroissement de la résistance du matelas fibreux en vue de son passage dans la sécherie. Le pressage est donc la suite du processus d'élimination de l'eau commencé sur la table plate. Comme il est beaucoup plus économique de procéder par des moyens mécaniques que par évaporation, le papetier cherche toujours de nouvelles méthodes pour améliorer l'efficacité du pressage et ainsi diminuer la quantité d'eau à évaporer en sécherie.

Au fil du temps, l'industrie a mis au point plusieurs types de presse : aspirante, à trous borgnes, à toile synthétique, à manchon rétractable, etc. La presse à sabot (figure 3.20), développée dernièrement, semble cependant être la meilleure. Ce type de presse a pour caractéristique une pince très longue qui permet de maintenir une pression sur la feuille beaucoup plus longtemps qu'avec les autres types de presse. Les éléments essentiels de cette presse sont le sabot, qui fournit une pression constante, et la bande imperméable en élastomère, qui constitue la base de la pince. À la sortie de la presse, le taux d'humidité de la feuille est de 60 %.

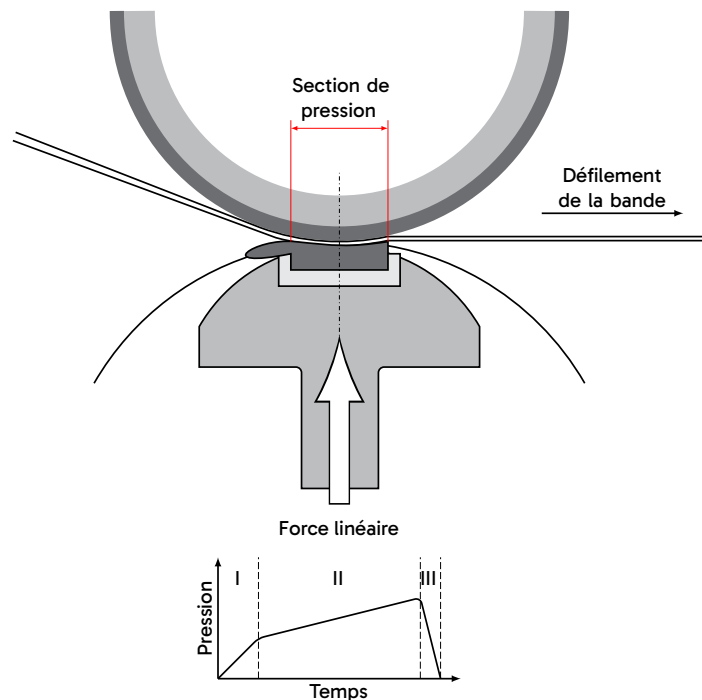


Figure 3.20 Schéma d'une presse à sabot

La sécherie est la partie de la machine à papier la plus coûteuse en matière d'investissement et de fonctionnement. L'objectif de cette étape est donc d'évaporer l'eau résiduelle de la feuille le plus possible grâce à une consommation minimale de vapeur. L'uniformité du séchage peut être mesurée par des jauges d'humidité qui effectuent un balayage transversal de la feuille à l'entrée et à la sortie de la sécherie. Le papier, qui sort des presses en affichant

un taux d'humidité de 60 %, circule sur une série de 3 ou 5 batteries de cylindres chauffés par de la vapeur vive (figure 3.21). Les diamètres les plus courants de cylindre se situent entre 1,5 et 1,8 m. Au contact du cylindre chauffé, l'eau contenue dans la feuille s'évapore, et la vapeur qui en résulte est entraînée par ventilation. La feuille est plaquée contre le cylindre au moyen d'une toile synthétique perméable appelée « feutre sécheur ». Ce feutre est installé entre deux cylindres à l'aide de rouleaux tendeurs. La vapeur vive, en cédant son énergie pour fournir la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau, se condense dans les cylindres. On élimine ces condensats en introduisant un siphon d'un type particulier à l'intérieur du cylindre.

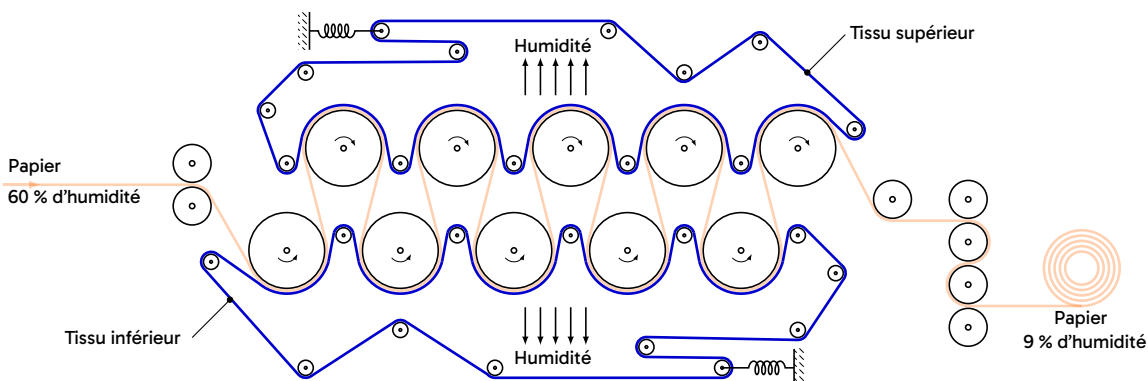


Figure 3.21 Schéma simplifié d'une sécherie

La lisse – Le lissage (calandrage) consiste à faire passer le papier dans une ou plusieurs pinces formées par un ensemble de rouleaux en fonte afin d'en réduire l'épaisseur jusqu'à la valeur choisie, de régulariser cette épaisseur (pour une bobine bien enroulée) et d'obtenir certaines propriétés de surface, en particulier le lissé. Les marques laissées par la toile et le feutre sont considérablement aplanies pendant cette étape.

L'**enrouleuse** est la dernière partie de la machine à papier. Elle enroule la feuille de papier pour former des bobines géantes (jusqu'à 4,5 m de diamètre et 8 m de largeur).

3.7 Désencrage et recyclage du papier

En raison des mouvements écologiques et de facteurs économiques, le recyclage est réglementé, et les fibres cellulosiques recyclées entrent dans la composition de tous les papiers et cartons fabriqués actuellement, à l'exception des papiers haut de gamme. De nos jours, on utilise de plus en plus de papiers recyclés, pour protéger l'environnement, en réutilisant les fibres cellulosiques encore bonnes qui se trouvent dans les journaux, les magazines, le papier de bureau, le carton et d'autres types de papier usagé. Afin de récupérer ces fibres, on se sert du procédé appelé « désencrage », qui est une succession d'opérations consistant à décrocher de leur surface toutes les sortes de produits appliqués aux papiers, en particulier les particules d'encre, puis à les éliminer de la suspension des fibres. Le désencrage des vieux papiers est nécessaire, car tous les produits initialement incorporés à leur fabrication sont considérés comme des contaminants et ont une incidence négative sur les propriétés optiques des papiers recyclés.

Étant donné la diversité des papiers recyclés, le papetier se trouve devant une multitude de possibilités en ce qui a trait aux supports (pâte mécanique, chimique ou mélange des deux), aux encres et aux procédés d'impression :

- › La proportion de pâte mécanique influence directement la capacité de désencrage du papier : la présence de lignine dans les fibres cellululosiques semble conduire à un meilleur accrochage de l'encre aux fibres. Par conséquent, plus le taux de pâte mécanique est important, plus le désencrage est difficile.
- › Contrairement aux colorants et aux azureurs optiques, qui doivent être neutralisés par voie chimique, les encres et les pigments colorés doivent d'abord être décrochés de façon mécanique, par trituration, puis séparés des fibres par lavage ou par flottation.
- › Les nouvelles technologies d'impression utilisent des encres et des vernis UV. Pendant le séchage, elles permettent de réticuler les polymères contenus dans l'encre sous l'action des rayons UV afin d'obtenir un séchage quasi instantané et un scellage parfait de l'encre sur le support. Si cette méthode est très efficace pour la fabrication initiale des papiers, elle l'est moins pour les papiers recyclés, car le scellage entre les polymères et les fibres est trop solide et rend très difficile le désencrage.

3.7.1 Revue des contaminants usuels des vieux papiers

Une vue d'ensemble des contaminants usuels des vieux papiers et cartons est présentée à la [figure 3.22](#) et permet d'en relever les cinq grandes catégories.

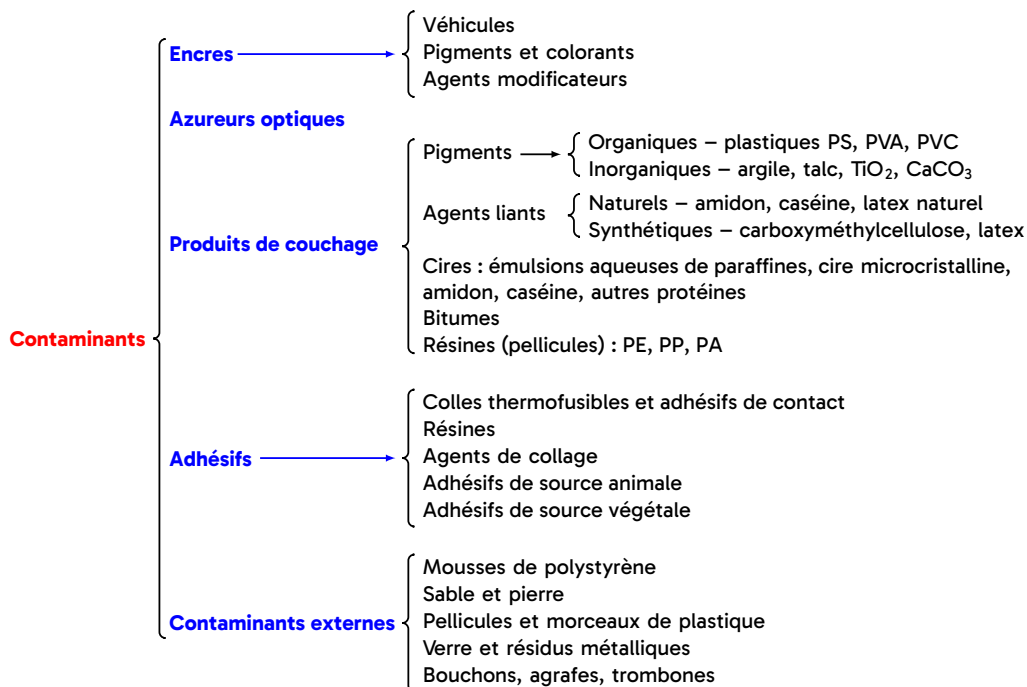


Figure 3.22 Principaux contaminants des vieux papiers

Le [tableau 3.12](#) présente une description sommaire de chacune des catégories de contaminants des vieux papiers.

Tableau 3.12 Caractéristiques des contaminants des vieux papiers

Contaminants	Caractéristiques
Encres	<ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit de substances fortement teintées qui servent à marquer le papier. • La chimie des encres est très complexe, mais il est reconnu qu'elles sont composées, de manière simplifiée, de trois catégories de produits : le véhicule, les pigments et l'agent modificateur. • Le véhicule représente la partie majoritaire de l'encre; il constitue sa phase fluide. Son rôle est double : transporter le pigment sur le support et l'y fixer. • Le pigment (noir de carbone, pigments colorés, etc.) peut représenter de 5 à 25 % du poids de l'encre; il établit la coloration du papier. • L'agent modificateur représente environ 10 % de l'encre; il permet d'optimiser les caractéristiques pendant et après l'impression en : <ul style="list-style-type: none"> - renforçant ou atténuant les propriétés physico-chimiques du véhicule; - réglant la vitesse de séchage; - réglant la résistance à l'arrachage.
Azureurs optiques	<ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit des composés organiques fluorescents capables d'absorber la lumière UV et de la réémettre dans la partie bleue du spectre. • Ils masquent la teinte jaunâtre du papier sans en diminuer la luminosité, car la lumière bleue s'additionne à la couleur initiale intrinsèque du papier pour lui donner une apparence plus blanche à l'œil nu. • Leur présence est indésirable, car elle est incompatible avec leur réintroduction dans certaines sortes de papier destinées à l'impression et à l'écriture.
Produits de couchage	<ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit des pigments, des cires, des bitumes et des pellicules de plastique qui ont été utilisés pour augmenter l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : le lustre, la blancheur, l'opacité, le lissé ou la qualité de l'impression.
Adhésifs	<ul style="list-style-type: none"> • Ils sont de plusieurs catégories : les colles thermofusibles et les adhésifs de contact; les résines; les agents de collage; les adhésifs de source animale ou végétale. • Ils ont tendance à s'agglutiner partout sur les feutres, les toiles, les rouleaux de calandre ainsi que le papier et ils constituent le plus sérieux des problèmes éprouvés par les papetiers.
Contaminants externes	<ul style="list-style-type: none"> • On appelle « contaminants externes » tous les corps étrangers présents dans les balles de vieux papiers et cartons : mousse de polystyrène, sable et pierres, pellicules et morceaux de plastique, etc. • Ils proviennent des déchets issus des collectes sélectives, des produits d'emballage et des produits utilisés au bureau. • S'ils sont solides et denses, ils peuvent facilement être éliminés dans la poire d'extraction du triturateur ou au moyen d'épurateurs à haute densité.

3.7.2 Remise en pâte

La **trituration** est l'étape où les vieux papiers sont transformés en une pâte plus ou moins épaisse par action mécanique. On y sépare l'encre et les autres contaminants des fibres. L'appareil qui sert à désintégrer les vieux papiers s'appelle le « tritrateur » (figure 3.23).

Dans sa partie supérieure, il a une ouverture ménagée pour permettre l'alimentation en vieux papiers. Dans sa partie inférieure, il est doté d'un ou de plusieurs rotors qui génèrent l'agitation nécessaire à la désintégration des papiers. Sur les parois du tritrateur sont placées des chicanes, qui ont pour rôle de ralentir la circulation de la pâte dans la cuve du tritrateur. Le mouvement de la suspension fibreuse est alternativement accéléré (au centre, près du rotor) et décéléré (en périphérie). Les gradients de vitesse engendrent des forces de cisaillement qui servent à affaiblir les liaisons entre les fibres et à désintégrer les vieux papiers en fibres individuelles. Quand le procédé est continu, la désintégration est partielle et produit des amas de fibres; quand il est discontinu, elle est totale.

L'alimentation du tritrateur s'effectue à l'aide d'un convoyeur, dont l'aire de chargement est généralement située au niveau du plancher de travail, mais elle peut aussi être surélevée ou, lorsque le papier est reçu en vrac, légèrement surbaissée. Une fois les balles chargées sur le convoyeur, les fils d'attache et les feuilards sont coupés et généralement retirés en vue de leur mise au rebut. Le convoyeur d'alimentation d'un tritrateur peut être à commande manuelle, mais la plupart du temps il est automatisé. Des dynamomètres piézoélectriques mesurent le poids du papier qui est déposé sur la courroie transporteuse, et un moteur entraîne cette courroie de manière à faire basculer la bonne quantité de papier dans le tritrateur.



Figure 3.23 Tritrateur industriel à l'usine Fibres Sustana de Breakeyville

Il existe une multitude de modèles de tritrateurs sur le marché. Pour les comparer, on peut utiliser deux types de critères :

- › La concentration de la pâte : tritrateurs à basse et à haute concentration
- › Le mode de fonctionnement de l'appareil : tritrateurs en continu ou en discontinu

Tritrateur à haute concentration (de 12 à 18 %)

Cet appareil s'est imposé au milieu des années 80 dans la presque totalité des nouvelles usines de désencrage. Son rotor a une forme hélicoïdale (figure 3.24), ce qui permet d'imprimer à la pâte un mouvement axial vers le fond de la cuve : la pâte remonte ensuite le long des parois, puis revient au centre. Ce dispositif se distingue du rotor traditionnel, qui propulse la pâte dans le sens radial et tangentiel. Le mouvement axial que procure le rotor hélicoïdal permet d'agiter la pâte ayant une concentration élevée sans nécessiter un apport énergétique considérable. La vitesse de rotation du rotor est modérée (d'environ 250 rotations par minute).



Figure 3.24 Rotor hélicoïdal d'un pilote de pâtes et papiers au Cégep de Lévis

Dans le cas d'un rotor hélicoïdal, son interaction avec les fibres serait en grande partie responsable du défibrage du papier. Plus la concentration de la pâte est élevée, plus la fraction de la suspension pouvant entrer en contact avec le rotor est grande. Les tritrateurs à haute concentration ont le pouvoir de défibrer rapidement les papiers sans réduire la taille des contaminants (styromousse, pellicules plastiques, etc.). La conduite des opérations de nettoyage ultérieures s'en trouve donc facilitée.

L'effet de cisaillement entre les particules permet le décrochage et la dispersion des encres. Même les encres dures telles que les encres xérogaphiques sont fragmentées au moyen de ce genre de trituration. Les tritrateurs à haute concentration fonctionnent tous en discontinu.

Même si le tritrateur à rotor hélicoïdal s'impose actuellement comme une référence dans le monde, plusieurs constructeurs ont uni leurs efforts pour bâtir un appareil qui fonctionne en continu. Le tambour de trituration en est un exemple.

Le tambour de trituration (figure 3.25) a été mis au point en Finlande. Les vieux papiers, l'eau et les produits chimiques sont introduits dans un tambour rotatif de manière à obtenir une pâte ayant une concentration d'environ 15%. La première partie du tambour comporte des chicanes ou vanes qui soulèvent le papier mouillé au cours de sa rotation. Le papier retombe ensuite au fond du tambour. L'agitation qui résulte de ce brassage est suffisamment intense pour défibrer en grande partie les vieux papiers et en décrocher l'encre, mais pas assez pour déchiqueter les contaminants. La légère inclinaison du tambour permet à la pâte de descendre vers une section de classage comportant des perforations de 4 à 10 mm. Avant le classage, la pâte est diluée à une concentration de 5% au moyen de rinceurs situés à l'extérieur du tambour. Du même coup, les perforations sont continuellement nettoyées et débarrassées de toute obstruction. Les contaminants et les papiers non triturés sortent à l'autre extrémité du tambour en tant que refus. Les flocons de pâte qui passent au travers des perforations sont par la suite défibrés par une pompe spéciale agissant comme un dépastilleur. Le temps de rétention à l'intérieur du tambour est de 20 à 25 min.

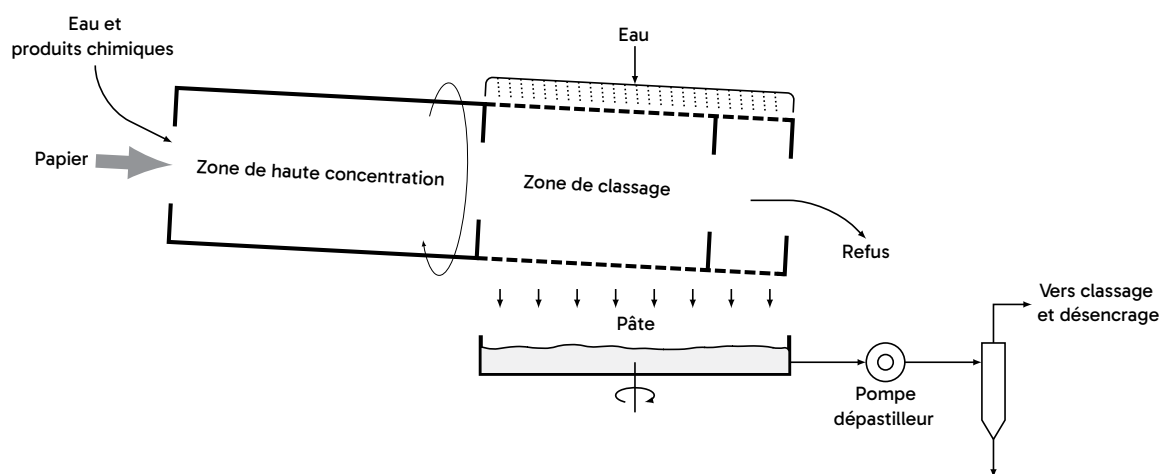


Figure 3.25 Schéma simplifié d'un tambour de trituration

3.7.3 Paramètres de la trituration

La trituration est l'étape de remise en pâte, mais aussi de « décrochage » de l'encre et des autres contaminants. Ce décrochage est favorisé par une action mécanique alliée à un traitement chimique approprié. Pour certains papiers, des additifs qui facilitent la désintégration sont requis. Ainsi, plusieurs paramètres influent sur la trituration, comme indiqué dans le [tableau 3.13](#).

Tableau 3.13 Paramètres pouvant influencer la trituration

Paramètres	
Action mécanique	<ul style="list-style-type: none">• Température• Temps• Concentration de la pâte• Vitesse du rotor
Type de papier	<ul style="list-style-type: none">• Pourcentage de charges minérales• Type d'encre• Type de fibres
Action chimique	<ul style="list-style-type: none">• Soude (NaOH)• Agents de désintégration• Surfactants (savons)• Agents de blanchiment

Les effets de la température, du temps et de la concentration de la pâte sur la trituration se résument ainsi :

- › La température de trituration doit être réglée en fonction du type de papier à recycler, de la nature et de l'intensité du traitement chimique ainsi que des spécifications de la pâte finale.
- › La trituration des papiers faits de pâte chimique s'effectue à une température de 60 à 70 °C durant 10 à 15 min. Quelques usines de désencrage préfèrent employer une température plus basse (de 40 à 50 °C) pour éviter de ramollir les matières agglomérantes. Cette diminution de température doit être compensée par un temps de trituration plus long et l'ajout d'une plus grande quantité de produits chimiques.
- › Les papiers riches en pâte mécanique sont triturés à une température voisine de 40 °C, durant 10 min si la pâte a une concentration de 14 % et durant 30 min si elle a une concentration de 5%.
- › Si on en élève la concentration, la pâte se désintègre plus uniformément et l'activité des produits chimiques est généralement accrue. Mais au-delà d'une concentration critique, la pâte dans la cuve circule de façon irrégulière et se désintègre mal.
- › Le temps de trituration doit permettre une désintégration adéquate des papiers, mais il ne doit pas être trop long, car on favorise le fractionnement des contaminants, qui sont alors plus difficiles à éliminer.

En règle générale, toute diminution de température, de temps ou de concentration peut être compensée par l'augmentation de la valeur d'au moins l'une des deux autres variables.

3.7.4 Effet des additifs chimiques

Plusieurs réactifs chimiques peuvent être incorporés à la pâte lors de la trituration. Certains ont pour fonction d'en favoriser la désintégration, tandis que d'autres ont celle de stabiliser les particules d'encre dispersées (savons) et de les empêcher d'adhérer de nouveau aux fibres. Les principaux additifs chimiques utilisés par l'industrie papetière sont les suivants :

- › Les **agents de désintégration** – L'ajout de soude (NaOH) est nécessaire pour entraîner le gonflement des fibres et, par le fait même, favoriser le détachement de l'encre. Cet ajout saponifie et/ou hydrolyse les liants des encres et agit aussi comme agent de désencrage. Le seul inconvénient, c'est que la soude provoque un jaunissement alcalin si elle est utilisée sans agent de blanchiment.

- › Les **agents de désencrage** – Des additifs doivent être utilisés pour faciliter le décrochage de l'encre et empêcher qu'elle adhère de nouveau aux fibres. Étant donné que la majorité des encres commerciales sont composées en partie d'huiles, les produits qui permettent de les stabiliser sont des surfactants (savons).
- › Les **agents de blanchiment** – Leur ajout au tritrateur permet de compenser le phénomène de jaunissement des pâtes mécaniques (la lignine présente dans les pâtes mécaniques est colorée par le NaOH). L'emploi de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et de silicate de sodium (Na_2SiO_3) avec un agent chélatant, comme l'EDTA, constitue un moyen efficace pour lutter contre la perte de blancheur des pâtes mécaniques. Les pâtes chimiques n'ont pas à être blanchies lors de la trituration.

3.7.5 Désencrage par flottation

La flottation est souvent considérée comme étant au cœur des installations de désencrage destinées à la production d'une pâte de qualité. Elle consiste à séparer les particules d'encre de la suspension de pâte à l'aide d'une phase gazeuse, généralement de l'air. Cette phase est constituée de bulles d'air dont la résistance mécanique a été renforcée et dont les propriétés de surface ont été modifiées par l'addition d'un surfactant afin de favoriser l'accrochage des particules d'encre. Étant donné qu'elle est moins dense que la suspension, la phase gazeuse subira une poussée verticale vers le haut, conformément au principe d'Archimède. L'encre et les autres particules de faible densité demeurent ainsi à la surface sous la forme d'une écume qui est raclée en continu. Un exemple de cellule industrielle de flottation est présenté à la [figure 3.26](#).



Figure 3.26 Cellule de flottation dans l'usine de désencrage Fibres Sustana de Breakeyville

3.8 Exercices

A Exercices de révision

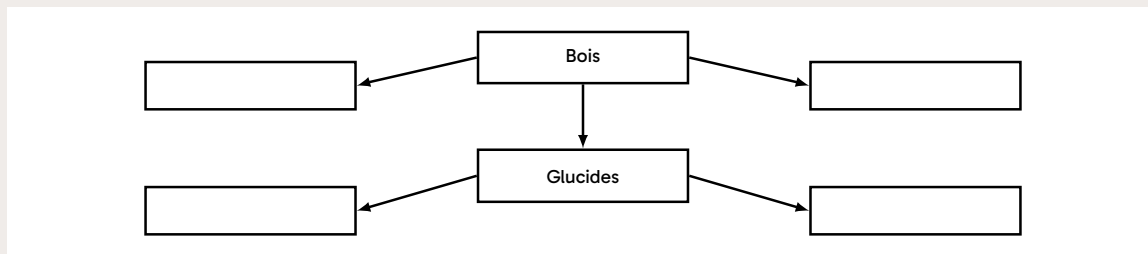
- A.1** Comment appelle-t-on la substance qui cimente les fibres cellulosiques entre elles? Cette substance possède deux propriétés fondamentales pour la fabrication de la pâte à papier. Nommez-les.
- A.2** Énumérez les cinq grandes étapes de la fabrication du papier.
- A.3** Énumérez les quatre grandes classes de produits qui composent le bois et décrivez en détail l'une d'entre elles.
- A.4** Nommez sept caractéristiques qui rendent les fibres cellulosiques propres à la fabrication du papier.
- A.5** Qu'entend-on par « traitements secondaires de la pâte »? Faites un schéma les illustrant.
- A.6** Quels sont les buts de l'épaississage? Décrivez le fonctionnement de l'épaississeur de votre choix.
- A.7** Pour quelle raison et de quelle façon réalise-t-on le blanchiment de la pâte?
- A.8** Quels sont les composants de base d'une machine à papier moderne?
- A.9** Quel est le pourcentage approximatif d'eau résiduelle dans une feuille de papier?
- A.10** Pourquoi l'étape de la presse est-elle si importante? Décrivez brièvement le procédé de pressage.
- A.11** Qu'est-ce que le calandrage? Quels en sont les objectifs et de quelle façon cette étape est-elle exécutée?
- A.12** Les encres constituent le principal contaminant à décrocher du papier. De quoi sont-elles constituées? Donnez le nom des trois catégories de produits ainsi que leur rôle.
- A.13** Que sont les azureurs optiques et à quoi servent-ils?
- A.14** Qu'est-ce que la flottation? De quelle façon peut-on la réaliser?

B Exercices de réflexion

- B.1** À quoi sert le siphon dans la sécherie?
- B.2** Pourquoi utilise-t-on davantage le bois de résineux que celui des feuillus dans les usines de pâtes et papiers?

C Exercices d'application

- C.1** Le schéma ci-dessous représente les principaux composants du bois. Remplissez chacune des cases vides.



- C.2** Présentez, sous forme de tableau, une comparaison des pâtes mécaniques et chimiques (principe de fabrication, caractéristiques des fibres, avantages et désavantages, facilité de blanchiment, usage, etc.).
- C.3** Nommez les différentes parties de la machine à papier en précisant leur rôle et décrivez le fonctionnement de la table plate.

Chapitre 4

Productions de bioproduits



Biomasse en attente de distillation au laboratoire de Techniques de procédés industriels du Cégep de Lévis

Sommaire

4.1 Introduction	102
4.1.1 Définitions et terminologie	102
4.1.2 Généralités	103
4.2 Transformation de la biomasse en énergie	106
4.2.1 Bioénergie et biocarburants	106
4.2.2 Voie sèche de production de bioénergie	108
4.2.3 Voie humide de production de bioénergie	109
4.3 Production de biocarburants liquides	112
4.3.1 Production du bioéthanol	112
4.3.2 Production du biodiesel	118
4.4 Matériaux biosourcés	120
4.4.1 Biopolymères	120
4.4.2 Biocomposites	122
4.5 Notions de santé et de sécurité	125
4.6 Productions industrielles de bioproduits	125
4.6.1 Production de bioéthanol au Canada et au Québec	125
4.6.2 Production de biocarburants dans le monde	126
4.7 Exercices	128

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les productions de bioproduits, qui constituent des solutions de rechange renouvelables à de nombreux produits dérivés des ressources fossiles. Nous commencerons par la présentation de la terminologie et des définitions spécifiques aux bioproduits, puis nous enchaînerons avec leurs particularités et quelques considérations théoriques les concernant. La transformation de la biomasse en énergie, la production de biocarburants liquides ainsi que les matériaux biosourcés y seront également présentés en détail. Quelques productions industrielles de bioproduits seront ensuite énumérées. À la fin du chapitre, pour la mise en application des notions abordées concernant les bioproduits, quelques exercices de révision, de réflexion et d'application seront proposés.

4.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique aux productions de bioproduits et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Amylacée* = *Amidonnée* = caractéristique d'une ressource végétale qui est composée d'amidon;
- › *Bagasse* = résidu solide (sous-produit) issu de l'industrie de la canne à sucre;
- › *Biomasse* = ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant être transformées en énergie ou servant à nourrir les êtres vivants;
- › *Biocombustible* = produit élaboré à partir de la biomasse et qui, par combustion (réaction en présence d'oxygène), génère de l'énergie;
- › *Biocarburant* = biocombustible utilisé dans les moteurs à explosion;
- › *Biodiesel* = diesel produit à partir de la biomasse;
- › *Bioéthanol* = éthanol produit à partir de la biomasse;
- › *Bioénergie* = énergie produite à partir de la biomasse;
- › *Biogaz* = gaz combustible produit dans un réacteur de méthanisation par fermentation anaérobie de la biomasse;
- › *Biohydrogène* = hydrogène obtenu à partir de la biomasse;
- › *Biopolymère* = macromolécule biodégradable d'origine biologique;
- › *Bioproduit* = *Produit biosourcé* = produit d'usage courant obtenu à partir de la biomasse (matières premières biologiques ou renouvelables);
- › *Bioprocédé* = *Biotraitement* = ensemble de méthodes ou techniques qui utilisent les micro-organismes vivants ou leurs dérivés dans le but de produire des biens d'usage courant ou de fournir des services à la société;
- › *Bioraffinerie* = complexe industriel qui assure la conversion optimale de la biomasse en bioproduits variés;
- › *Carburant fossile* = carburant issu du raffinage du pétrole;
- › *Cellulose* = biopolymère majoritaire de la paroi cellulaire de nombreux végétaux et source de carbone renouvelable la plus abondante de notre planète;
- › *Drèche* = résidu solide (sous-produit) issu de l'industrie brassicole et des usines de bioéthanol;
- › *Enzyme* = catalyseur biologique qui accélère les réactions biochimiques;
- › *Fermentation aérobie* = procédé biochimique réalisé en présence d'air ou d'oxygène;
- › *Fermentation anaérobie* = procédé biochimique réalisé en absence d'air et d'oxygène;
- › *Lignine* = biopolymère qui contient du phénol et qui cimente les fibres cellulosiques dans les parois de cellules végétales;

- › *Lignocellulosiques* = matières qui contiennent de la lignine et de la cellulose;
- › *Méthanisation* = fermentation anaérobie des déchets organiques qui produit majoritairement du méthane;
- › *Oléagineux* = végétal riche en matières grasses (huiles);
- › *Pouvoir calorifique* = quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de masse (kg) ou de volume (L) d'un produit;
- › *Pouvoir calorifique inférieur (PCI)* = représente l'énergie de combustion (en kJ) rapportée à la masse (en kg) d'un combustible brûlé en présence d'un excès d'air et dont la chaleur de condensation de l'eau a été soustraite;
- › *Sucre = Glucide* = composé biochimique qui se forme naturellement dans les végétaux au cours du processus complexe de photosynthèse;
- › *Vinasse* = résidu de la distillation des liquides sucrés après fermentation alcoolique.

4.1.2 Généralités

La **biomasse** désigne l'ensemble des matières organiques biodégradables qui sont produites par l'activité végétale, animale et humaine et qui peuvent se transformer en **bioproduits**, y compris différentes formes d'énergie. Il s'agit d'une ressource énergétique naturelle exceptionnelle, car elle est abondante, renouvelable à l'infini et accessible en permanence, contrairement aux ressources fossiles, qui prennent des milliers d'années à se former. Les caractéristiques de la biomasse peuvent être résumées comme suit :

- › Elle est produite par la photosynthèse, lorsqu'il est question de la biomasse végétale, ou par des réactions biochimiques complexes, lorsqu'il est question de la biomasse animale.
- › Elle est considérée comme une ressource carbonée renouvelable, car elle est produite dans un court laps de temps, contrairement aux ressources carbonées tirées des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel).
- › Elle est constituée de biopolymères (macromolécules complexes formées de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote), de phosphore et de soufre (en faibles proportions) ainsi que d'éléments inorganiques.
- › Elle se présente sous forme solide, liquide ou gazeuse. À l'heure actuelle, les biomasses solide et liquide sont les plus utilisées pour produire de l'énergie.
- › Elle peut être produite de manière directe (biomasse primaire ou brute) ou indirecte (biomasse secondaire ou déchets). La biomasse primaire se trouve à l'état naturel ou fait l'objet de filières de production (exploitation forestière, élevage et cultures agricoles dédiées). La biomasse secondaire est constituée par toutes les formes de déchets issus de l'industrie, de l'agriculture, de la nature (tourbières) et des collectivités humaines.
- › Elle constitue la forme la plus ancienne d'énergie, car elle est utilisée depuis la préhistoire, moment où elle a permis de découvrir et de produire le feu.
- › Sa valorisation énergétique, sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburant, s'appelle « bioénergie » (voir la [section 4.2.1](#)) et elle peut s'effectuer par voie sèche (voir la [section 4.2.2](#)) ou humide (voir la [section 4.2.3](#)).
- › Sa valorisation durable, et donc la plus complète possible, y compris la bioénergie, s'effectue par bioraffinage et vise l'obtention de bioproduits.

Les **bioraffineries** sont des complexes industriels qui transforment la **biomasse primaire et secondaire** de manière durable en **bioénergie** et en une gamme de produits chimiques à valeur ajoutée, tout en minimisant la formation de déchets et l'émission de gaz à effet de serre. Les principales caractéristiques d'une bioraffinerie sont les suivantes :

- › Son modèle de fonctionnement est semblable à celui d'une raffinerie pétrolière, qui utilise le pétrole brut pour le convertir en produits intermédiaires à l'intention de l'industrie chimique et en produits finis.
- › Elle est une alternative prometteuse à la pétrochimie, car les produits obtenus peuvent se substituer aux carburants fossiles.
- › Ses objectifs de fabrication visent l'obtention de bioproduits, ce qui signifie la production couplée d'énergie (biocarburants gazeux ou liquides) et de matériaux (produits chimiques, denrées alimentaires destinées à la consommation humaine et aliments pour animaux).
- › Son fonctionnement repose sur la combinaison de trois groupes d'opérations unitaires :
 - dissociation physique des molécules;
 - fractionnement des entités constitutives d'un mélange;
 - fonctionnalisation (modification) d'une molécule pour lui conférer des propriétés réactionnelles spécifiques à un produit ou un bien d'usage courant.

Les bioproduits peuvent être regroupés en trois filières :

- › La **filière bioénergétique**, qui inclut tous les biocarburants et biocombustibles solides, liquides ou gazeux.
- › La **filière des produits chimiques biosourcés**, qui est constituée des intermédiaires chimiques, des biofertilisants, des biolubrifiants, des biosolvants, des biodétergents, des biosurfactants, des biocatalyseurs, des bio-ingrédients pour l'alimentation humaine et animale, des bio-insecticides, des peintures et encres biodégradables, etc.
- › La **filière des matériaux biosourcés**, qui est composée des bioplastiques, des biocomposites, des produits biopharmaceutiques, des biocosmétiques, etc.

Parmi les trois filières de valorisation de la biomasse, à l'exception de la production destinée à la consommation humaine (alcools ou ferments pour la fabrication de pain et la transformation du lait), la production de biocarburants est la plus développée actuellement sur les plans technologique et commercial. La valorisation de la biomasse dans le but d'obtenir des bioproduits s'est considérablement accélérée à l'échelle mondiale dans les dix dernières années en raison de multiples enjeux économiques, environnementaux et sociaux auxquels les sociétés industrialisées font face, dont voici quelques exemples :

- › La diminution des réserves de pétrole facilement exploitables et, par conséquent, l'augmentation du prix du pétrole
- › La demande mondiale en énergie de plus en plus croissante et dépendante des ressources fossiles
- › L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique
- › La recherche de la sécurité énergétique locale
- › La crise des revenus chez les producteurs agricoles

La fabrication de bioproduits s'avère une alternative moins polluante et plus économique que celle qui est employée pour obtenir leurs équivalents à base de pétrole ou de gaz naturel. L'engouement pour la fabrication et l'usage des bioproduits se justifie par les nombreux avantages qu'ils apportent comparativement à leurs homologues provenant des ressources fossiles. Une énumération non exhaustive des avantages liés à l'usage de bioproduits est présentée dans le **tableau 4.1**. Les inconvénients liés aux bioproduits (surtout ceux liés aux biocarburants) y sont également présentés.

Tableau 4.1 Avantages et inconvénients liés au développement des bioproduits

Avantages

Socio-économiques :

- Conception de nouveaux produits et émergence de nouvelles industries
- Diversification agricole due à l'utilisation des déchets de la biomasse
- Meilleure distribution géographique de la biomasse que les ressources fossiles
- Augmentation des ressources économiques pour les collectivités rurales, donc amélioration de la situation des agriculteurs
- Indépendance énergétique locale, ce qui équivaut à une moins grande dépendance aux combustibles fossiles non renouvelables

Environnementaux :

- Valorisation des rejets qui se seraient retrouvés dans l'environnement en les transformant en différents produits ou sources d'énergie
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre durant la fabrication de certains bioproduits, comparativement aux produits équivalents à base de pétrole
- Sécurité accrue pour l'environnement, car la toxicité est réduite et la biodégradabilité est augmentée
- Production durable, car les matières premières biologiques sont renouvelables et disponibles

Médicaux :

- Fabrication de produits biologiques, non toxiques et inoffensifs pour la santé humaine comparativement aux produits fossiles équivalents
- Conception de nouveaux produits médicaux qui ne peuvent pas être créés à partir des sources traditionnelles

Inconvénients

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre contestée mondialement
- Possibles déséquilibres environnementaux à cause de l'utilisation excessive de la biomasse
- Réduction des surfaces de terres cultivables et donc destinées à l'alimentation humaine
- Possible déclenchement d'une crise alimentaire mondiale si l'essor des biocarburants de première génération (produits à partir de sources alimentaires) est privilégié
- Coût de production assez élevé

4.2 Transformation de la biomasse en énergie

4.2.1 Bioénergie et biocarburants

La biomasse, qui peut être convertie en énergie, est variable d'un pays à l'autre et elle peut provenir de différentes sources :

- › Les **cultures énergétiques** – Il s'agit de cultures non alimentaires, ligneuses ou herbacées, qui sont expressément destinées à la production d'énergie (ex. : érable argenté, saule, frêne vert, panic raide, bambou, etc.)
- › Les **résidus de cultures agricoles** (ex. : tiges, feuilles, pulpe, paille, bagasse, etc.)
- › Les **résidus de la biomasse forestière** de toutes sortes (ex. : troncs, tiges, feuilles, coupes, copeaux, etc.)
- › Les **résidus urbains** de toutes sortes

Selon le type de biomasse utilisé et les techniques de transformation employées, la valorisation énergétique de la biomasse peut conduire à trois formes différentes d'énergie :

- › La chaleur
- › L'électricité
- › Le biocarburant

La transformation de la biomasse peut se faire par voie sèche et humide. La voie sèche est essentiellement constituée des **méthodes thermochimiques** de valorisation : combustion, gazéification et pyrolyse. Ces méthodes seront décrites en détail à la [section 4.2.2](#). La voie humide implique principalement la **méthanisation**, une méthode biochimique de transformation qui sera présentée à la [section 4.2.3](#). La production des biocarburants s'effectue également par voie humide, mais de manière chimique, biochimique ou combinée; elle sera présentée à la [section 4.3](#).

Les biocarburants sont les produits conçus à partir de la biomasse renouvelable. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- › Ils ne sont pas d'origine fossile, mais ils peuvent se substituer aux carburants traditionnels et permettent donc de ralentir l'épuisement des énergies fossiles.
- › Ils sont obtenus sous forme solide, liquide ou gazeuse et ils sont destinés principalement au transport et à l'usage domestique.
- › Les biocarburants solides sont densifiés à partir de la biomasse sous forme d'agglomérés ou de granulés, en vue de leur combustion directe pour chauffer les immeubles résidentiels ou commerciaux.
- › Le bioéthanol et le biodiesel sont les principaux biocarburants liquides produits pour un usage commercial. Ils sont mélangés à l'essence (le premier) ou au diesel pétrochimique (le deuxième) en vue de leur usage comme carburant de transport.
- › Le méthane constitue le principal biocarburant gazeux.

Il existe, à l'heure actuelle, trois générations de biocarburants :

- 1) La **première génération** correspond aux biocarburants conventionnels, qui sont obtenus à partir de sources alimentaires telles que l'amidon des céréales, le sucre (de la canne à sucre) ou l'huile végétale provenant des grains de blé ou de maïs et des graines de colza ou de tournesol.

- 2) La **deuxième génération** de biocarburants a été conçue à partir de résidus non alimentaires tels que la biomasse des déchets, des tiges de blé, du maïs et des macroalgues.
- 3) La **troisième génération** de biocarburants a été mise au point à partir de l'hydrogène produit par des micro-organismes ou à partir de l'huile générée par des microalgues.

Les biocarburants de première génération ont atteint un niveau de maturité technologique élevé (les avancements futurs ne laissent espérer que de faibles améliorations de rendement et de productivité) et ils sont déjà commercialisés mondialement. Pour leur production, on n'utilise qu'une petite fraction de la plante : l'amidon, les sucres et les huiles végétales.

Les biocarburants de deuxième et de troisième génération ne sont pas commercialisés actuellement, car leur production n'en est qu'au stade de la recherche ou du pilote industriel. Leur développement est justifié par les deux avantages majeurs qu'ils présentent :

- › Les biomasses pour les produire n'occupent pas une surface agricole destinée à la production de l'énergie; elles n'entrent donc pas en compétition avec la production d'aliments.
- › Tous les éléments lignocellulosiques de la plante sont utilisés pour les produire.

Il existe diverses techniques pour produire des biocarburants, selon la matière première utilisée (type de biomasse ou nature des déchets) et le produit final envisagé. Une représentation schématique des possibilités de transformation de la biomasse en différents types de biocarburants est présentée à la **figure 4.1**.

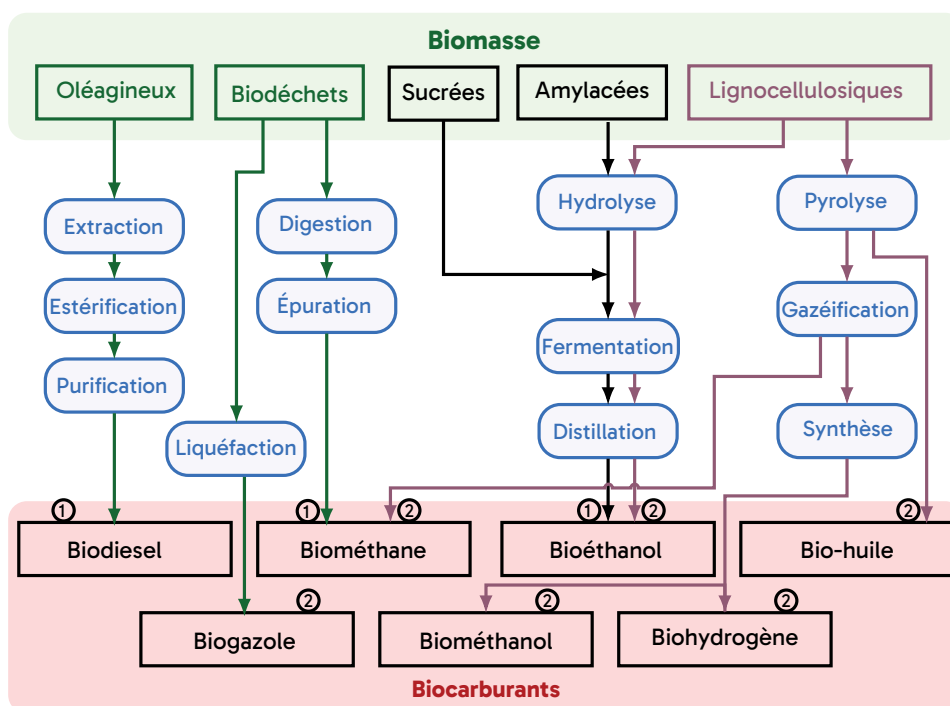


Figure 4.1 Schéma des possibilités de transformation de la biomasse en biocarburants (1 = biocarburants de première génération; 2 = biocarburants de deuxième génération)

Les observations suivantes se dégagent de la **figure 4.1** :

- › Il existe cinq types de biomasse utilisables pour produire des biocarburants : les oléagineux (qui contiennent de l'huile), les biodéchets (toutes sortes de déchets organiques), les plantes sucrées (qui contiennent des sucres fermentescibles), les plantes amylacées (qui contiennent de l'amidon) et les végétaux lignocellulosiques (qui contiennent de la lignine et de la cellulose).
- › Il est possible d'employer diverses techniques (encadrées en bleu dans la **figure 4.1**) pour transformer les cinq types de biomasses utilisables en sept sortes de biocarburants : le biodiesel, le bioéthanol, le biométhane, le biométhanol, le biohydrogène, la biohuile et le biogazole.
- › Selon la technologie de transformation employée, le bioéthanol, qui est le biocarburant le plus produit et le plus utilisé dans la vie courante, peut être obtenu à partir de trois types différents de biomasse : les plantes sucrées, les plantes amylacées et les végétaux lignocellulosiques. Pour ces deux derniers types de biomasse végétale, l'étape de l'hydrolyse, qu'elle soit de nature chimique ou enzymatique, convertit la cellulose ou l'amidon en glucose.
- › Dans le cas de la biomasse lignocellulosique, la cellulose et la lignine sont tellement amalgamées qu'un prétraitement est nécessaire pour rendre accessible la cellulose en vue de l'hydrolyse.
- › Selon le cas, un seul type de biomasse peut conduire à la production d'un seul biocarburant, ou de plusieurs.

4.2.2 Voie sèche de production de bioénergie

La transformation de la biomasse en énergie par voie sèche est basée sur des phénomènes thermochimiques et elle regroupe les techniques de combustion, de pyrolyse et de gazéification. Le **tableau 4.2** présente les caractéristiques de ces techniques thermochimiques ainsi que le type d'énergie qu'elles produisent.

Tableau 4.2 Techniques de transformation de la biomasse en énergie par voie sèche

Méthode	Caractéristiques	Énergie produite
Combustion	<ul style="list-style-type: none"> • La réaction d'oxydation complète de la biomasse a lieu en général en présence d'un excès d'air. • Les réactions qui y sont associées sont multiples, mais la plus représentative du processus est celle qui conduit à la formation du dioxyde de carbone et à la vapeur d'eau. • La chaleur qui s'en dégage est utilisée pour le chauffage urbain et pour la production simultanée de chaleur et d'électricité (cogénération). • La vapeur d'eau ainsi produite peut être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'électricité. 	<p>Chaleur</p> <p>Électricité</p>

Tableau 4.2 Techniques de transformation de la biomasse en énergie par voie sèche (*suite*)

Méthode	Caractéristiques	Énergie produite
Gazéification	<ul style="list-style-type: none"> • La transformation chimique et thermique de la biomasse se produit en absence d'air dans un réacteur spécifique, le gazogène. • La réaction a lieu entre le carbone de la biomasse et l'oxygène provenant soit du dioxyde de carbone, soit de la vapeur d'eau. • Le résultat est la formation d'un gaz de synthèse (<i>syngas</i>) composé d'hydrogène (H₂), de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂) et de vapeur d'eau (H₂O). • Le gaz de synthèse peut servir à la production de gaz combustible ou à la synthèse de biocarburants. 	<p>Chaleur</p> <p>Électricité</p> <p>Biocarburant</p>
Pyrolyse	<ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit d'une méthode de conversion thermochimique effectuée à haute température (de 350 à 1000 °C) et en absence totale d'oxygène. • Le résultat est la production d'une biohuile liquide, de gaz non condensables et de coke pyrolytique (carbone et résidus inertes). • Les gaz non condensables peuvent être brûlés aux fins de chauffage. • Le coke pyrolytique peut être brûlé tel quel pour produire de la chaleur ou il peut être converti par gazéification en un gaz combustible. 	<p>Chaleur</p> <p>Biocarburants</p>

4.2.3 Voie humide de production de bioénergie

La **méthanisation** est un procédé biologique de dégradation de la biomasse fermentescible (ou biodégradable) qui mène à la production d'un biogaz par l'action de bactéries anaérobies dans un digesteur dépourvu d'oxygène.

Un schéma de la production du biogaz et de la valorisation du biométhane est présenté à la **figure 4.2**, à la page suivante.

La biomasse peu ou non lignocellulosique provenant de résidus urbains (déchets ménagers, boues de stations d'épuration, etc.), de déchets industriels (déchets de brasseries, de sucreries, de laiteries, de fromageries, de distilleries, d'abattoirs, etc.) et d'effluents d'élevage (fumier, lisier, etc.) peut faire l'objet de la méthanisation.

Ce procédé comporte les étapes suivantes :

- 1) La collecte de la biomasse et son transport jusqu'au site de méthanisation
- 2) Le tri de la biomasse pour garder la matière fermentescible
- 3) Le stockage de la matière fermentescible
- 4) Le conditionnement de la biomasse à ajouter dans le digesteur (cuve en acier ou en béton)
- 5) L'introduction de la charge dans le digesteur
- 6) Le brassage et le chauffage de la biomasse fermentescible

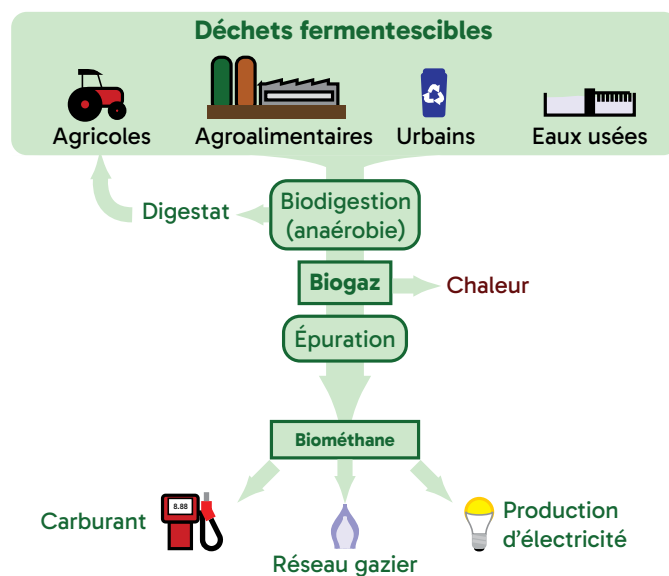
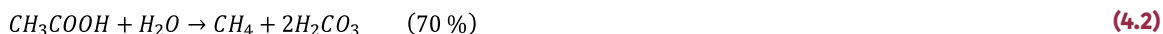


Figure 4.2 Schéma de la méthanisation et de la valorisation du biométhane

La méthanisation s'opère sur une période d'une vingtaine de jours, au moyen de bactéries adaptées à chacune de ses quatre phases, qui sont les suivantes :

- 1) L'**hydrolyse** – Elle transforme les molécules complexes (cellulose, lipides, protéines) en monomères, molécules plus simples de type sucre fermentescible (glucose), acides aminés et acides gras.
- 2) L'**acidogénèse** – Les monomères se transforment en ammoniac (NH_3), en hydrogène (H_2) et en acides gras volatils (AGV) comportant de 2 à 5 atomes de carbone.
- 3) L'**acétogénèse** – Il y a production d'acétates, d'hydrogène (H_2), de gaz carbonique (CO_2) et de sulfure d'hydrogène (H_2S).
- 4) La **méthanogénèse** – Les bactéries méthanogènes forment le méthane à partir de l'hydrogène, du gaz carbonique et des acétates, selon les réactions suivantes :



Une fois la méthanisation terminée, à la sortie du digesteur, on retrouve :

- › Le digestat – Il s'agit d'un produit solide et humide, composé de matière organique difficilement biodégradable.
- › Le biogaz – Il s'agit d'un produit gazeux.

Le digestat peut être utilisé comme fertilisant (par épandage agricole), car il contient des éléments nutritifs (N, P et K), ou il peut être incinéré. Le biogaz produit comporte les éléments qui suivent :

- › De 55 à 65% de méthane (CH_4)
- › De 35 à 45% de gaz carbonique (CO_2)
- › Quelques traces d'impuretés sous forme d'ammoniac (NH_3) et de sulfure d'hydrogène (H_2S)

Il peut être utilisé tel quel pour générer de la chaleur ou il peut subir une épuration poussée (par adsorption, absorption, séparation membranaire ou épuration cryogénique) afin de produire du biométhane, un biocombustible qui présente des spécificités techniques semblables à celles du gaz naturel. Avant d'être injecté dans le réseau gazier, le biométhane passe par plusieurs étapes :

- › L'odorisation – On ajoute du tétrahydrothiophène (THT) au biométhane afin de le rendre décelable lors d'une fuite de gaz.
- › Le contrôle de la qualité – Le biométhane doit respecter plusieurs spécifications techniques comme le pouvoir calorifique supérieur (PCS), la densité ainsi que la teneur en soufre et en gaz carbonique.
- › La régulation de la pression – Il est souhaitable que le biométhane soit prioritaire sur le réseau pour être consommé en premier.

Le biométhane peut servir comme :

- › Carburant pour les automobiles (biométhane pour les véhicules)
- › Combustible pour les chaudières
- › Combustible pour les moteurs à cogénération (chaleur et énergie)

Avec un pouvoir calorifique inférieur (PCI) moyen compris entre 20 et 23 MJ/m³, le biogaz affiche de belles performances qui sont cependant inférieures à celles d'autres gaz comme le gaz naturel, le propane ou le butane. Les équivalences entre le biogaz (méthane) et d'autres sources d'énergie sont présentées à la [figure 4.3](#).

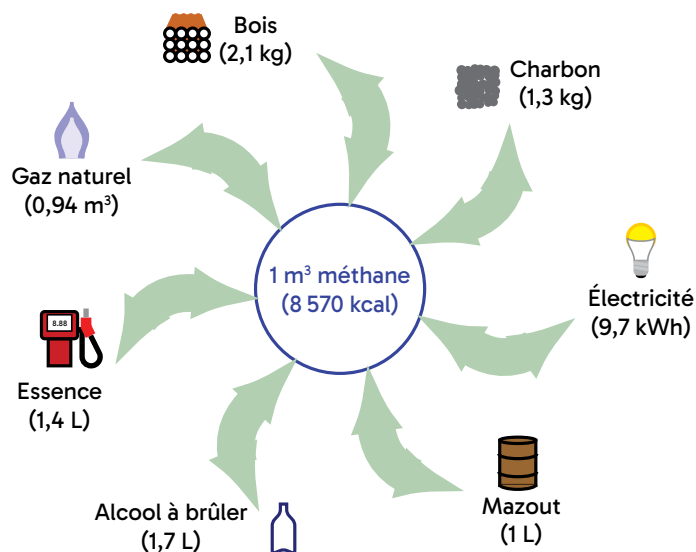


Figure 4.3 Schéma des équivalences énergétiques entre le biogaz (méthane) et d'autres sources d'énergie

4.3 Production de biocarburants liquides

Les biocarburants liquides sont employés en mélange avec les carburants pétroliers usuels dans des proportions faibles, qui ne doivent pas affecter les réglages des moteurs des véhicules. Toutefois, la mise en place de la technologie à polycarburant (*flex-fuel*) permet l'emploi d'un mélange d'essence à forte proportion de biocarburant (jusqu'à 85%) sans mettre en danger le fonctionnement du moteur.

Étant donné que l'éthanol et le biodiesel sont les deux biocarburants liquides qui sont les plus couramment produits et utilisés pour le transport et le chauffage domestique, une description détaillée de leurs techniques de fabrication est donnée aux sections 4.3.1 et 4.3.2.

4.3.1 Production du bioéthanol

L'éthanol fait partie des biocarburants de première et de deuxième génération. Le schéma de la figure 4.4 permet de constater que, selon le type de biomasse de départ et les techniques de transformation employées, l'éthanol peut être obtenu de trois manières différentes.

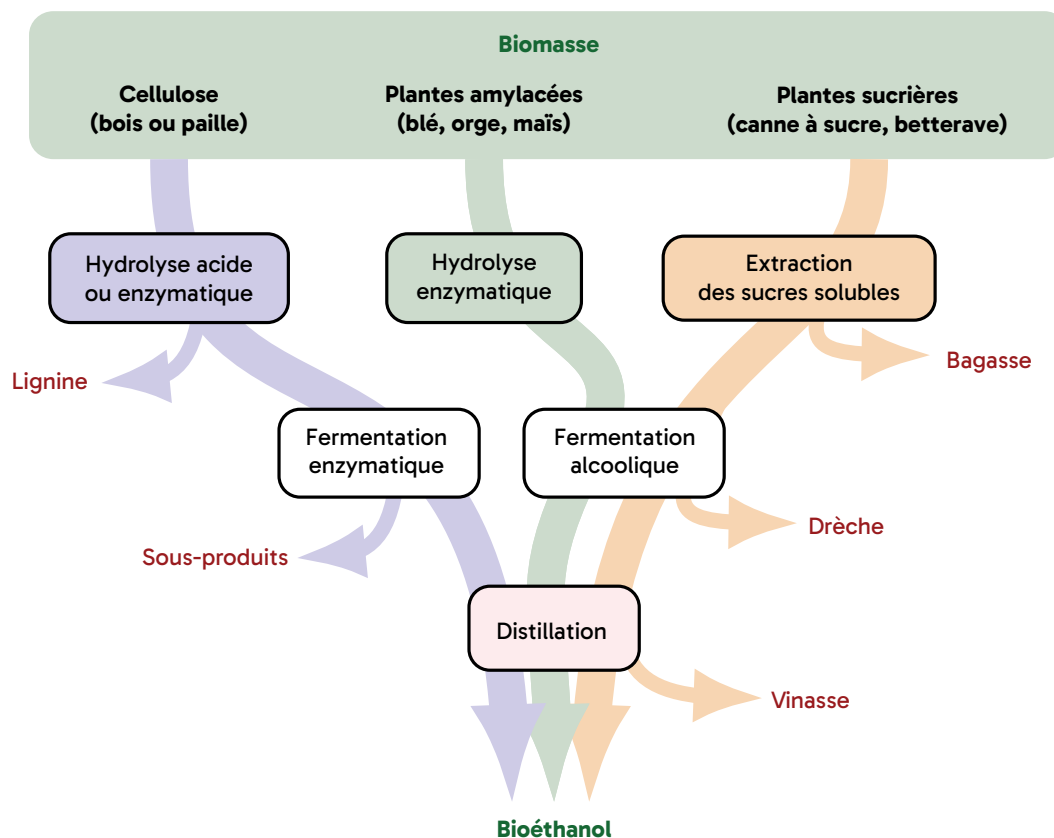


Figure 4.4 Schéma de la production du bioéthanol de première et de deuxième génération

Les plantes sucrières (canne à sucre, betterave), dont la composition est riche en glucose (sucre fermentescible), peuvent être transformées directement en bioéthanol via un processus de fermentation alcoolique suivi d'une distillation. Dans le cas des plantes amylacées (blé, orge, maïs) et de la biomasse cellulosique, le glucose n'est pas directement accessible à la fermentation alcoolique par les micro-organismes; il doit être obtenu par l'hydrolyse enzymatique ou acide des sucres complexes (amidon et cellulose) qui composent ces deux types de biomasse. Le processus d'hydrolyse consiste à fragmenter les sucres complexes (non fermentescibles) en sucres simples (fermentescibles). Si l'hydrolyse enzymatique de l'amidon est relativement simple et bien maîtrisée, celle de la cellulose est beaucoup plus complexe en raison de la constitution de la biomasse lignocellulosique, laquelle est formée d'une matrice rigide qu'il est difficile de déstructurer. Un prétraitement doit donc être effectué pour rendre accessibles les fibres de cellulose que cette matrice contient. Compte tenu du degré de maturité technologique des procédés de transformation et du développement commercial, le bioéthanol est dit :

- › de **première génération** s'il est produit à partir des plantes sucrières et amylacées, pour lesquelles le procédé de transformation est très bien maîtrisé et déjà implanté à grande échelle dans plusieurs usines à travers le monde;
- › de **deuxième génération** s'il est obtenu à partir de la biomasse lignocellulosique, pour laquelle la technique de transformation présente encore des défis sur le plan technologique.

Le bioéthanol, ou l'alcool éthylique, de formule chimique brute $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$, est actuellement produit à partir de différentes sources de biomasse :

- › Les grains de blé, de maïs, d'orge et de seigle – dans plusieurs pays de l'Europe et en Amérique du Nord
- › Les betteraves – dans plusieurs pays de l'Europe
- › La canne à sucre – au Brésil
- › La vigne – en Espagne
- › Le bois – en Suède

Selon la littérature spécialisée, la canne à sucre et la betterave sont les biomasses qui fournissent le meilleur rendement en bioéthanol par hectare cultivé ([tableau 4.3](#)).

Tableau 4.3 Rendement moyen de production de bioéthanol par hectare cultivé à partir de différents types de biomasse

Biomasse cultivée	Rendement (L/ha)
Betterave	5 000
Canne à sucre	6 000
Blé	2 500
Orge	2 000
Sorgho sucré	4 500
Maïs	3 000

Le bioéthanol est un biocarburant unique qui présente les mêmes caractéristiques physiques et thermiques, quels que soient la biomasse de départ et le procédé utilisé pour le produire ([tableau 4.4](#), à la page suivante).

Tableau 4.4 Propriétés physiques et thermiques du bioéthanol

Propriété	Valeur
Masse volumique à 20 °C	789 kg/m ³
Température d'ébullition (pur)	78,4 °C
Chaleur latente d'évaporation	854 kJ/kg
Viscosité à 20 °C	1,2 mPa·s
Solubilité dans l'eau	100 %
Indice de réfraction	1,3623
Tension de vapeur à 20 °C	5,85 kPa
Capacité thermique	2,5 kJ/kg
Chaleur de combustion	29693 kJ/kg
Indice d'octane recherché (RON)	120
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	26,8 MJ/kg

Production de bioéthanol de première génération

La fabrication de l'éthanol à partir d'une source de sucre fermentescible est un procédé connu depuis très longtemps et bien maîtrisé technologiquement. Le procédé industriel le plus utilisé mondialement implique des traitements physiques, thermiques, chimiques et biochimiques et il permet la production de bioéthanol à partir de l'amidon des grains ou des tubercules. Un schéma du procédé industriel de la production du bioéthanol de première génération à partir de la biomasse de type amylicée, privilégié en Amérique du Nord, est illustrée à la [figure 4.5](#).

Les caractéristiques techniques et opératoires du procédé industriel de fabrication du bioéthanol sont les suivantes :

- Le **broyage** – Les grains de céréales ou de maïs sont broyés dans un premier temps pour obtenir une mouture (farine à fine granulométrie) qui contient de l'amidon, un sucre complexe non fermentescible (polymère de glucose).
- La **saccharification** – La farine contenant l'amidon (teneur de 65 à 70 %) est mélangée avec de l'eau bouillante (température de 120 à 150 °C) et des enzymes spécialisées dans une cuve cylindrique thermorégulée appelée « cuve de saccharification ». L'ajout des enzymes se fait en deux étapes :
 - 1) d'abord, à haute température (autour de 120 °C), on ajoute les enzymes de type *alpha-amylase*, qui ont le rôle de rompre la longue chaîne d'amidon en plus petites chaînes de dextrine;
 - 2) ensuite, on refroidit la bouillie à environ 60 °C et on y incorpore des enzymes de type *glucoamylase*, qui briseront à leur tour les chaînes de dextrine en glucose, un sucre simple fermentescible.

- › La **fermentation** – La bouillie de farine contenant le glucose ($C_6H_6O_{12}$) est transférée dans le réacteur de fermentation thermorégulé. L'ajout à la bouillie de levures de type *Saccharomyces cerevisiae* provoque la fermentation du sucre simple en éthanol (C_2H_5OH) et crée du gaz carbonique (CO_2), via un processus biochimique exothermique. L'équation de cette réaction de fermentation peut être représentée de manière simplifiée, comme suit :



- › La **distillation** – La liqueur fermentée ainsi créée contient de 10 à 15 % d'éthanol. Pour séparer la liqueur de l'éthanol, plusieurs colonnes de distillation sont employées.
- › La **déshydratation** – En raison de l'azéotrope éthanol-eau, le bioéthanol séparé par distillation contient 4 % d'eau, ce qui ne convient pas pour sa commercialisation ni son usage. L'élimination de cette eau (déshydratation) se fait par passage à travers des tamis moléculaires (colonnes remplies avec des billes absorbantes qui retiennent l'eau et laissent passer l'éthanol pur). Le bioéthanol déshydraté est dit « anhydre ».
- › La **dénaturation** – Un dénaturant (essence) est ajouté en faible quantité (teneur de 2 à 5 %) au bioéthanol anhydre afin d'éviter qu'il soit commercialisé pour la consommation alimentaire.
- › L'**évaporation et le séchage** – La liqueur de fermentation, séparée du bioéthanol par distillation, est évaporée et séchée afin que soit récupérée la drèche, matière solide composée de protéines, d'huile, de fibres et d'amidon résiduel. La drèche est généralement utilisée comme ingrédient dans la préparation de moulée pour les animaux d'élevage.

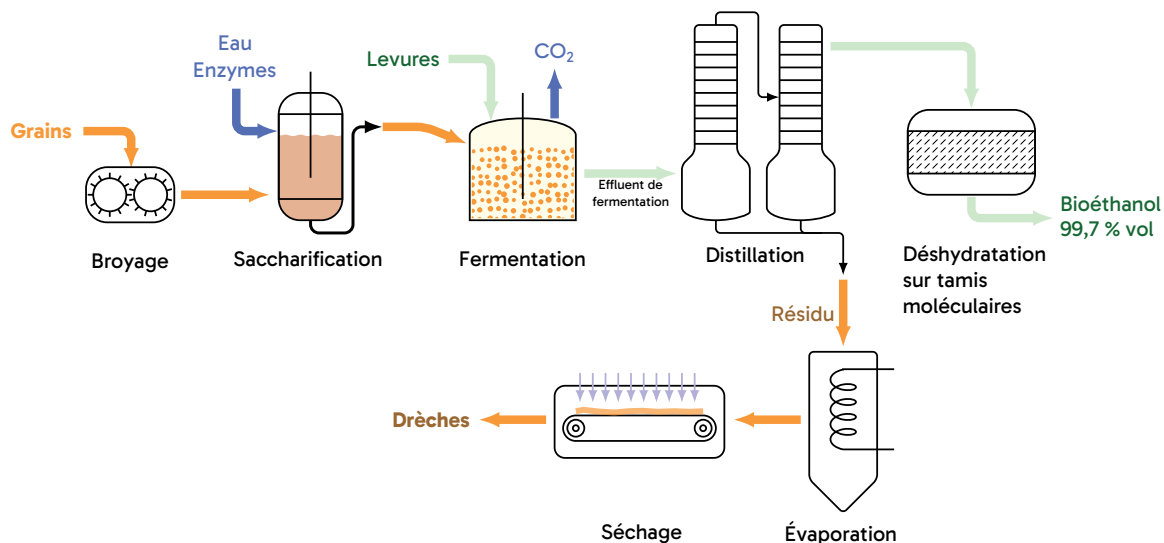


Figure 4.5 Schéma du procédé industriel de la production du bioéthanol de première génération

La **figure 4.6**, à la page suivante, résume les intrants et les extrants du procédé de fabrication de bioéthanol de première génération, ainsi que les étapes techniques qu'il nécessite. Les usages des extrants en question sont présentés dans le **tableau 4.5**, à la page suivante. À titre d'exemple, la transformation d'une tonne de grains de maïs permet de produire, en moyenne, entre 350 et 450 L de bioéthanol, entre 300 et 325 kg de drèche et environ 350 kg de gaz carbonique. Plus de détails relativement à la production du bioéthanol au Québec, au Canada et dans le reste du monde seront donnés à la **section 4.6**.

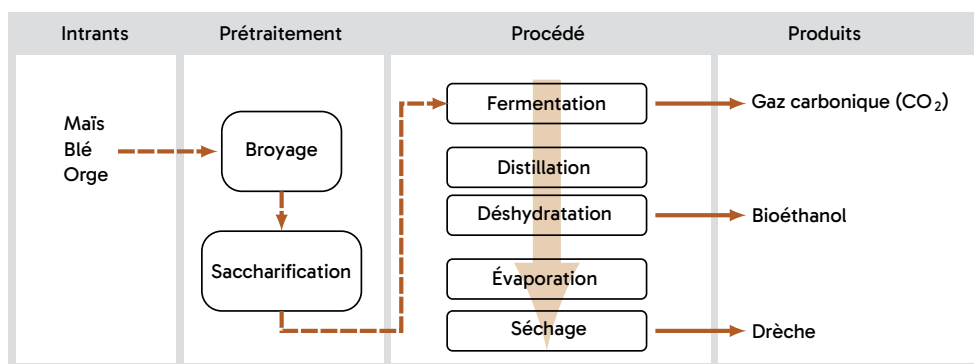


Figure 4.6 Schéma des intrants, des extraits et des étapes du procédé de fabrication du bioéthanol de première génération

Tableau 4.5 Usages des extraits du procédé de fabrication du bioéthanol de première génération

Produit	Usages
Bioéthanol	<ul style="list-style-type: none"> • Substitut de l'essence à l'état pur • Substitut de l'essence en mélange : E5, E10, E85 (Le chiffre indique le pourcentage d'éthanol mélangé à l'essence.)
Gaz carbonique (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de la glace sèche • Fabrication de boissons gazeuses • Refroidissement rapide des aliments
Drèche	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentation animale • Extraction de l'huile de maïs

Production de bioéthanol de deuxième génération (cellulosique)

La production du bioéthanol cellulosique est un processus plus complexe que celui réalisé à partir de plantes sucrières ou amylacées, car la cellulose doit d'abord être extraite de la matrice cellulosique cimentée par des lignines (qui sont très résistantes et qui se désagrègent difficilement) et ensuite décomposée en molécules fermentescibles. Plusieurs procédés ont été développés pour produire l'éthanol cellulosique :

- › L'hydrolyse acide
- › L'hydrolyse enzymatique
- › Le procédé thermochimique (gazéification)

Parmi ces procédés, l'hydrolyse enzymatique de la biomasse agricole est le seul à être utilisé à l'échelle industrielle au Canada. Les étapes de la production du bioéthanol cellulosique par hydrolyse enzymatique sont semblables à celles du procédé de production du bioéthanol de première génération, mais les techniques et les micro-organismes employés sont très différents. Ces étapes sont les suivantes :

- 1) Le **prétraitement** – La matière cellulosique est d'abord prétraitée au moyen d'un procédé de défibrage par explosion de vapeur afin d'augmenter l'accessibilité des fibres aux enzymes utilisées dans les prochaines étapes.
- 2) L'**hydrolyse enzymatique** – La matière cellulosique défibrée est mise en contact avec des enzymes précises, les cellulases, afin qu'elles décomposent la cellulose non fermentescible en sucres élémentaires fermentescibles. Comme les cellulases coûtent beaucoup plus cher que les amylases et qu'elles ont une cinétique d'hydrolyse plus lente, cette étape est la plus dispendieuse et la plus longue (plusieurs jours sont nécessaires pour la décomposition).
- 3) La **séparation** – Les sucres fermentescibles issus de l'hydrolyse enzymatique doivent être séparés de la lignine (colle lignocellulosique) qui est demeurée intacte. La lignine déshydratée peut être valorisée pour produire de l'énergie thermique ou électrique, des absorbants, des adhésifs, etc.
- 4) La **fermentation** – La liqueur sucrée séparée de la lignine est mise en fermentation à l'aide de levures. Comme les étapes de prétraitement et d'hydrolyse enzymatique génèrent des composés inhibant la fermentation (notamment le furfural), il est difficile d'obtenir une liqueur fermentée dont la teneur en éthanol dépasse les 6%. À l'heure actuelle, l'industrie cherche à remplacer les levures par des bactéries pour accélérer la fermentation et améliorer le rendement de la biomasse.
- 5) La **distillation** – La liqueur fermentée contient seulement de 5 à 6% de bioéthanol; elle sera donc distillée afin de produire un alcool pur à 96% (l'éthanol forme un azéotrope avec l'eau : éthanol à 96% et eau à 4%).
- 6) La **déshydratation et la dénaturation** – Cette étape est identique à celle qui est appliquée au bioéthanol de première génération. Elle consiste à :
 - déshydrater le produit en le faisant d'abord passer par des sites moléculaires (c'est ainsi que l'éthanol anhydre est obtenu);
 - ajouter au bioéthanol un dénaturant (l'essence) en faible proportion (de 2 à 5%) afin de le rendre impropre à la consommation alimentaire.

La littérature spécialisée indique qu'environ 75% de la cellulose et de l'hémicellulose contenues dans la matière lignocellulosique peuvent être transformées en éthanol. L'efficacité de la transformation dépend de plusieurs facteurs :

- › Le taux de récupération de la cellulose et de l'hémicellulose
- › L'efficacité de leur conversion en sucres fermentescibles
- › L'efficacité de la fermentation du glucose en éthanol

La production du bioéthanol cellulosique est plus complexe et donc plus coûteuse que celle du bioéthanol de première génération, ce qui limite actuellement sa production. Cependant, elle a l'avantage de ne pas utiliser de la biomasse ou de la surface cultivable destinées à l'alimentation humaine et elle permet de revaloriser les résidus des industries agricole et forestière.

4.3.2 Production du biodiesel

Le biodiesel ou biogazole est un mélange constitué d'esters méthyliques ou éthyliques d'huile végétale (EMHV ou EEHV) ou de gras animal de formule $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{COO}-\text{CH}_3$, avec n voisin de 16. Ses caractéristiques peuvent se résumer comme suit :

- › C'est un liquide jaune ambré qui présente des caractéristiques semblables au pétrodiesel. Contrairement à ce dernier, qui est formé d'hydrocarbures composés uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène, le biodiesel contient du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène.
- › C'est un produit naturellement biodégradable, ce qui n'est pas le cas du pétrodiesel.
- › Sa combustion produit moins de poussières et de composés sulfurés que celle du pétrodiesel.
- › Sa masse volumique et sa viscosité à température ambiante sont comparables à celles du pétrodiesel.
- › Son PCI moyen est de 37 MJ/kg; il est donc inférieur à celui du pétrodiesel, qui est de 42,8 MJ/kg.
- › Il s'obtient par une réaction de transestérification entre un ester de type triglycéride (huile de canola, de soya ou de tournesol) et un alcool (méthylique ou éthylique) pour obtenir un ester d'alcool simple (linéaire) et du glycérol (glycérine). L'équation de cette réaction est représentée à la [figure 4.7](#).

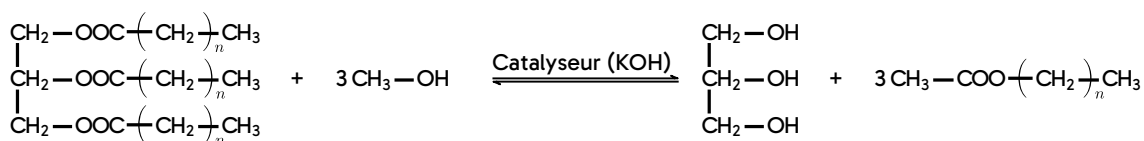


Figure 4.7 Schéma de l'équation de transestérification d'une huile végétale avec du méthanol

Le processus de fabrication du biodiesel à partir de grains oléagineux comprend deux phases importantes :

- › La production de l'huile végétale à partir de la biomasse végétale. Cette phase est identique à celle qui est nécessaire pour produire l'huile végétale destinée à la consommation humaine. Elle peut se réaliser par : a) pressage à froid; b) pressage à chaud; c) extraction à l'aide d'un solvant.
- › La transformation de l'huile végétale en biodiesel par transestérification.

Un schéma du procédé industriel de transestérification de l'huile végétale avec formation de biodiesel est présenté à la [figure 4.8](#).

Les caractéristiques techniques et opératoires du procédé industriel de production du biodiesel sont les suivantes :

- › Les huiles végétales sont prétraitées par filtration et dessiccation avant d'être envoyées dans le réacteur de transestérification.
- › Un alcool (méthanol ou éthanol) est combiné par agitation avec un catalyseur (hydroxyde de potassium ou hydroxyde de sodium) dans un mélangeur.
- › Le mélange d'alcool et de catalyseur est combiné à l'huile prétraitée dans un réacteur fermé et thermorégulé, à une température comprise entre 40 et 65 °C, et la réaction de transestérification commence; cette étape dure entre une et huit heures. Les produits de cette transformation sont le biodiesel (ester) et le glycérol, auxquels s'ajoutent l'alcool en excès et éventuellement l'huile non transformée.
- › La séparation gravitaire par décantation des produits formés (voir photo présentée à la [figure 4.9](#)) – Le glycérol, plus dense que le biodiesel, se dépose au fond et il peut être soutiré en premier par le bas du réservoir de décantation.

- › Le lavage – Le biodiesel ainsi séparé du glycérol est débarrassé de l'alcool en excès et d'autres impuretés par lavage à l'eau chaude. Le biodiesel humide est ensuite soit évaporé, soit distillé.
- › La valorisation du glycérol – Le glycérol est un coproduit de la réaction de transestérification qui sort du réacteur en étant considéré « impur ». Il est d'abord mélangé à un acide pour neutraliser les traces de catalyseur (KOH) non utilisé, puis il est distillé pour enlever les impuretés comme l'eau, les savons ou l'alcool.
- › Le rendement de la transestérification avoisine les 100%. Ainsi, il est possible de produire 400 kg de biodiesel et 40 kg de glycérol lorsque la matière de départ est constituée de 1000 kg de grains de canola, qui contiennent en moyenne 40% d'huile.

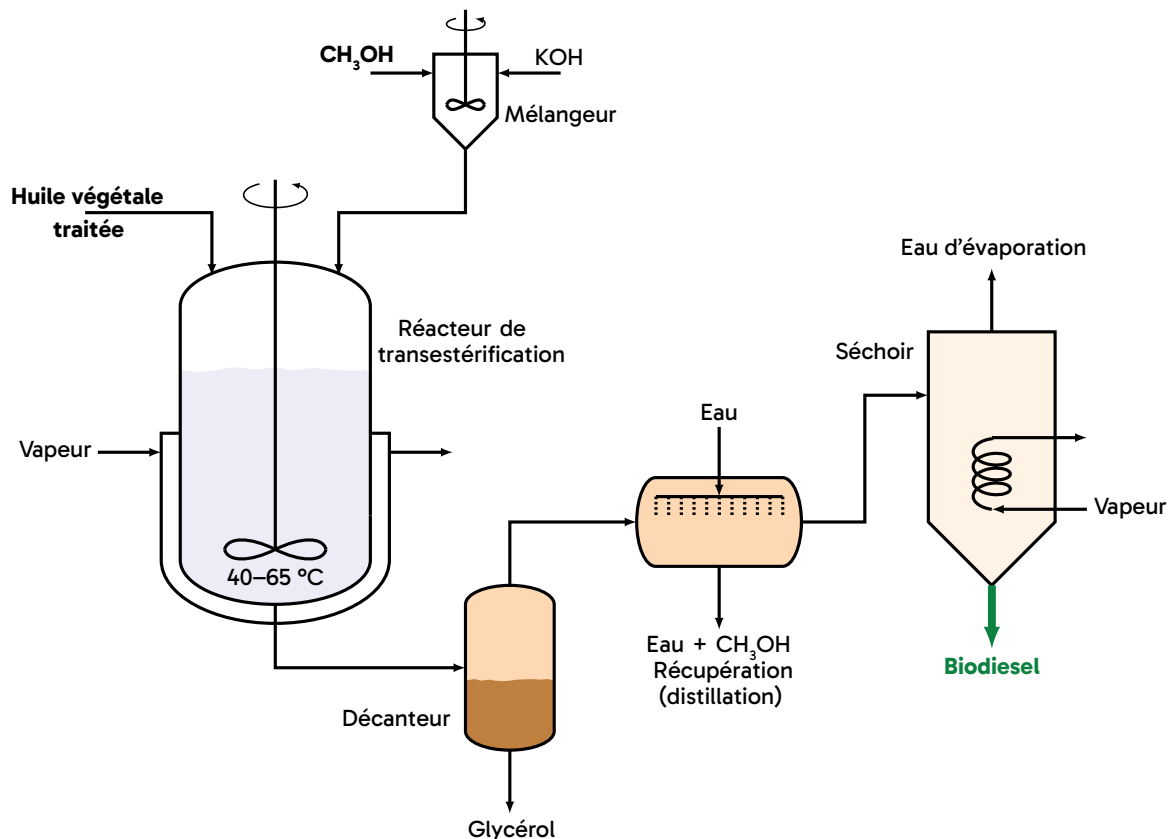


Figure 4.8 Schéma du procédé industriel de la production du biodiesel

Comme pour la production d'éthanol lignocellulosique, il est préférable de valoriser des triglycérides usés (huiles de cuisson usagées provenant de l'industrie alimentaire) plutôt que d'utiliser ceux destinés à la consommation humaine ou animale.



Figure 4.9 Séparation de phases lors de la transestérification partielle de l'huile de canola avec le méthanol et l'hydroxyde de potassium dans les laboratoires du programme *Techniques de procédés industriels* du Cégep de Lévis (1 et 3 = réacteurs de transestérification; 2 et 4 = décanteurs de phases)

4.4 Matériaux biosourcés

Un produit est qualifié de biosourcé si son origine est partiellement ou totalement végétale, animale ou microbienne. Les produits biosourcés peuvent provenir de diverses sources : plantes agricoles (betterave, canne à sucre, blé, chanvre, etc.), bois, cellulose et ses dérivés, plantes aquatiques (algues), résidus et déchets de la biomasse. Ils sont obtenus grâce à une panoplie de techniques de transformation et visent à remplacer les matières premières fossiles. Leurs applications sont de plus en plus nombreuses et s'étendent aux secteurs suivants :

- › Du bâtiment, comme matériaux de construction : ossature, insonorisation, toiture, isolation thermique et acoustique, etc.
- › Des matériaux plastiques
- › Des matériaux composites destinés au transport, au sport et aux loisirs, etc.
- › Des produits d'entretien technique : colles, peintures, lubrifiants, etc.
- › Des produits de nettoyage
- › Des produits d'hygiène corporelle
- › Des produits d'emballage et d'usage courant

Étant donné que les matériaux biosourcés sont extrêmement nombreux, leur description et leur caractérisation intégrale dépasseraient le cadre de ce manuel. Toutefois, aux sections 4.41 et 4.42, nous allons décrire deux catégories de produits biosourcés, les biopolymères et les biocomposites, afin d'en expliquer la conception et les usages.

4.4.1 Biopolymères

Les biopolymères sont des macromolécules d'origine biologique issues de ressources renouvelables comme les plantes, les algues et les animaux. Nombre d'entre eux sont biodégradables, ce qui est un avantage majeur comparativement au caractère non biodégradable de leurs homologues pétroliers. Leurs propriétés, inférieures à celles des polymères pétroliers, ainsi que leur coût de production, très élevé, constituent les actuels obstacles majeurs d'un développement industriel de cette catégorie de produits.

Les biopolymères sont classés en trois grandes catégories, selon leur origine et leur procédé de fabrication :

- › Les **biopolymères de catégorie A** – Il s’agit de polymères naturels, tels que l’amidon, la cellulose, les acides aminés, etc., qui sont extraits directement de la biomasse. Ils sont tous biodégradables.
- › Les **biopolymères de catégorie B** – Ils sont biosynthétisés à partir de micro-organismes et de plantes. Ils sont biodégradables. Exemples : polyhydroxyalkanoates (PHA), acide polylactique (PLA), etc.
- › Les **biopolymères de catégorie C** – Ce sont des polymères classiques synthétisés à partir de monomères biosourcés. Ils ne sont pas biodégradables. Exemples : polyéthylène (PE) et polyéthylène téréphtalate (PET).

Ils trouvent des applications commerciales dans de nombreux domaines : emballage, pharmaceutique, agriculture, agroalimentaire, médecine, automobile, électronique, construction, etc. Le **tableau 4.6** présente quelques applications des principaux biopolymères ainsi que leurs producteurs.

Tableau 4.6 Producteurs et applications commerciales des principaux biopolymères

Biopolymère	Applications	Producteurs
Acétate de cellulose	<ul style="list-style-type: none"> • Montures de lunettes • Poignées d’outils • Emballages alimentaires et non alimentaires • Textiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Celanese • Baker Hugues • Solvay • Kemira
Amidon	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages flexibles • Biens de consommation • Agriculture 	<ul style="list-style-type: none"> • Futerro • Novamont • Biome
Acide polylactique (PLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages souples et rigides • Biens de consommation • Fils chirurgicaux de suture • Implants médicaux • Impression 3D 	<ul style="list-style-type: none"> • NatureWorks • Evonik • Total Corbion PLA
Polyhydroxyalkanoates (PHA)	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages souples et rigides 	<ul style="list-style-type: none"> • Yield10 Bioscience • Tianjin GreenBio Materials Co. • Bio-on
Polybutylène adipate téréphtalate (PBAT)	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages souples • Agriculture 	<ul style="list-style-type: none"> • Algix • BASF
Polybutylène succinate (PBS)	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages souples et rigides • Agriculture 	<ul style="list-style-type: none"> • Roquette • Mitsubishi Chemical Group • Succinity
Polyéthylène (PE)	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages souples et rigides 	<ul style="list-style-type: none"> • Neste • LyondellBasell Industries
Polyéthylène téréphtalate (PET)	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages rigides 	<ul style="list-style-type: none"> • Toray Industries • Coca-Cola • M&G Chemicals

4.4.2 Biocomposites

Les biocomposites sont des matériaux constitués de plusieurs composants de nature différente dont au moins un provient d'une source renouvelable. Les technologies modernes font appel à des matériaux dotés de propriétés exceptionnelles (légèreté, robustesse, rigidité et résistance aux chocs, à l'abrasion ou à la corrosion) que les matériaux traditionnels (bois, métaux, céramiques, polymères) ne peuvent pas offrir. En combinant divers types de matériaux normalement non miscibles et en contrôlant leur morphologie ainsi que leur répartition, on obtient des biocomposites, dont les propriétés sont très différentes de celles de leurs composants de base.

De manière très simpliste, on peut considérer que les composites comportent deux phases (figure 4.10) : une phase continue, la **matrice**, qui enveloppe l'autre, le **matériau de renfort**. Les propriétés des composites dépendent des propriétés et des proportions de leurs deux phases ainsi que de la géométrie (forme, taille, répartition, orientation ou concentration) du matériau de renfort.

Exemples de biocomposites : bois-polymères, biopolymères-fibres de verre, etc.

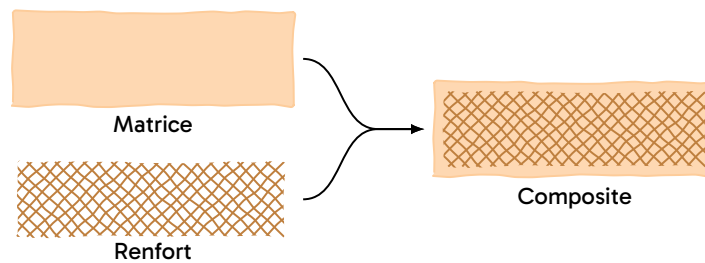


Figure 4.10 Schéma d'un biocomposite

La matrice d'un biocomposite remplit fondamentalement trois rôles :

- › Elle lie les fibres ensemble, répartit les contraintes exercées sur les composites et les transmet aux fibres, en ne conservant qu'une petite partie de la charge.
- › Elle protège les fibres contre les dommages superficiels dus à l'abrasion et aux réactions chimiques causées par le milieu ambiant.
- › Elle isole les fibres les unes des autres et, par sa ductilité et sa plasticité, elle bloque la propagation (d'une fibre à l'autre) des fissures, ce qui pourrait autrement entraîner la rupture brutale du composite.

Le rôle principal des fibres du matériau de renfort est de renforcer la résistance et la rigidité du composite. Ces fibres de renfort peuvent être longues ou courtes, orientées dans la même direction ou orientées de manière aléatoire. La littérature spécialisée énonce les faits suivants :

- › Une fibre renforce sensiblement la résistance et la rigidité d'un biocomposite si elle a une longueur minimale, dite « longueur critique ». Cette longueur minimale doit être de 1 mm, soit de 20 à 150 fois le diamètre de la fibre.
- › La répartition uniforme des fibres dans la matrice donne des biocomposites aux propriétés optimales.
- › Les biocomposites à fibres alignées ont des propriétés optimales dans la direction longitudinale (le sens des fibres); dans la direction transversale, le renforcement est presque nul.

Le matériau de renfort et la matrice doivent être compatibles; ils sont solidarisés grâce à une interface. La liaison entre la matrice et les fibres doit être assez forte pour réduire le plus possible les risques de déchaussement des fibres. La résistance d'un composite à la rupture est étroitement liée à la force de cette liaison. Une adhérence optimale maximise le transfert de charge entre la matrice, qui est relativement faible, et les fibres, qui sont résistantes.

Comme tous les autres matériaux, les biocomposites présentent des avantages et des inconvénients. Parmi leurs avantages, on peut compter les suivants :

- › La légèreté – Ils diminuent grandement le poids des pièces et donc, la consommation de carburant.
- › La stabilité chimique – Ils sont insensibles aux huiles et aux liquides hydrauliques.
- › La polyvalence – Ils peuvent être créés sous toutes les formes et en de multiples épaisseurs, en fonction de la demande. Ils offrent de grandes possibilités de façonnage.
- › Ils se déforment peu en fonction de la température et de la pression, ce qui est l'un des gros enjeux des matériaux utilisés en aviation commerciale.
- › Ils sont peu sensibles à la chaleur et à la corrosion.

Parmi les inconvénients des biocomposites, on compte ceux qui suivent :

- › Ils sont très sensibles aux impacts. Une petite faille peut engendrer de grosses déformations.
- › La détection de ces problèmes est difficile, ce qui entraîne une rigueur extrême dans leur fabrication et leur assemblage.
- › La mise en œuvre des réparations est beaucoup plus complexe que pour les matériaux traditionnels.

Le **tableau 4.7** présente quelques exemples de biocomposites, leurs usages, leurs producteurs et les avantages qu'ils présentent comparativement aux matériaux traditionnels.

Tableau 4.7 Exemples de biocomposites commerciaux et leurs caractéristiques

Biocomposite	Producteurs et usages	Avantages
Acide polylactique – fibres de kénaïf	<ul style="list-style-type: none"> • Toyota – domaine automobile • Panneaux de portières des voitures • Tableaux de bord • NEC – domaine électronique • Remplacement des pièces électroniques habituellement en ABS/PC 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande légèreté • Bonne résistance • Meilleure insonorisation (que l'acrylonitrile butadiène styrène [ABS] qui était auparavant utilisé) • Évitement des coûts de traitement des déchets électroniques
Bois-plastique	<ul style="list-style-type: none"> • Chine – panneaux de particules • États-Unis – panneaux de particules • Russie – panneaux d'aggloméré • Allemagne – panneaux de particules • Canada – panneaux de contreplaqué 	<ul style="list-style-type: none"> • Esthétique • Résistance et durabilité • Caractère imputrescible • Caractère antitache
Caoutchouc-amidon	<ul style="list-style-type: none"> • Novamont – domaine du transport • Additif dans la fabrication de pneus 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la résistance au roulement • Réduction de la consommation de carburant
Chanvre-polyéthylène	<ul style="list-style-type: none"> • Innofibre • Emballages alimentaires • Domaine de la construction 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible empreinte écologique • Développement durable
Polyester-lin	<ul style="list-style-type: none"> • Mercedes-Benz Travego • Enceintes 	<ul style="list-style-type: none"> • Légèreté • Isolation acoustique

4.5 Notions de santé et de sécurité

Même si les conditions de production sont généralement plus douces que dans l'industrie chimique, les enjeux de sécurité liés à la production, au stockage et à l'utilisation des bioproduits, et en particulier des biocombustibles, sont néanmoins très importants. Les travailleurs qui fabriquent et manipulent les biocarburants ainsi que les produits servant à leur synthèse doivent connaître les conditions de sécurité permettant de prévenir ou de combattre les risques de toutes natures, tant au niveau des procédés (broyage, distillation, fermentation, etc.) que des systèmes de manutention et de stockage, selon les propriétés physicochimiques et les caractéristiques de sécurité propres à chaque type de composant traité. Il faut ainsi tenir compte de ce qui suit :

- › Les biocombustibles sont par nature des produits destinés à libérer de l'énergie dans les moteurs à combustion; ils sont donc inflammables et présentent un risque d'incendie élevé s'ils sont manipulés et fabriqués dans des conditions non appropriées.
- › Tous les produits de la biomasse, les coproduits de la fabrication de biocarburants ainsi que les déchets (différents selon les filières – drêche de blé, tourteau, glycérine, huile, etc.) présentent eux aussi des risques d'incendie à des degrés variables. Ils peuvent être mobilisés dans des explosions (risque en milieu confiné) ou des incendies accidentels (risque en milieu ouvert) selon divers processus connus : auto-échauffement, inflammation spontanée de liquides gras sur support poreux, explosion de poussières, etc.
- › L'utilisation d'acides, de bases, de catalyseurs, d'agents de nettoyage, etc., pendant le processus de fabrication des biocarburants, engendre des risques classiques, notamment de corrosion et de libération de chaleur.
- › Le dégagement de gaz durant la fabrication ou l'entreposage du biogaz et du biodiesel peut conduire à la formation d'atmosphères explosives hybrides (combinaison de vapeurs et de poussières) ou asphyxiantes (CO₂) ayant des effets néfastes sur la production et les travailleurs.

Autres problèmes associés aux bioprocédés :

- › Présence de micro-organismes pouvant potentiellement contaminer les travailleurs et l'environnement.
- › La fréquente allergénicité de certains composés (par exemple, les protéases).

4.6 Productions industrielles de bioproduits

Selon les données publiées par le Consortium de recherche et innovations en bioprocédés industriels au Québec (CRIBIQ), il existe plus de 200 entreprises spécialisées dans la fabrication de bioproduits au Québec. Les trois filières mentionnées à la [section 4.1.2](#) sont en plein essor au Québec. Une énumération non exhaustive des bioproduits qui sont fabriqués actuellement au Québec est présentée à la [figure 4.11](#), à la page suivante.

4.6.1 Production de bioéthanol au Canada et au Québec

La production canadienne, qui totalise près de 1,6 milliard de litres de bioéthanol par année, est actuellement assurée par 15 usines : 7 dans les Prairies (Alberta, Saskatchewan et Manitoba), qui utilisent le blé comme matière première, et 8 autres dans le sud de l'Ontario (secteur du lac Huron et du lac Érié) et au Québec (Varenes), qui utilisent le maïs.

Actuellement, Greenfield Global est le plus important producteur de bioéthanol au Canada. L'entreprise possède 4 usines en fonction (3 en Ontario et 1 au Québec). Son biocarburant est commercialisé dans plus de 1500 stations-service canadiennes.

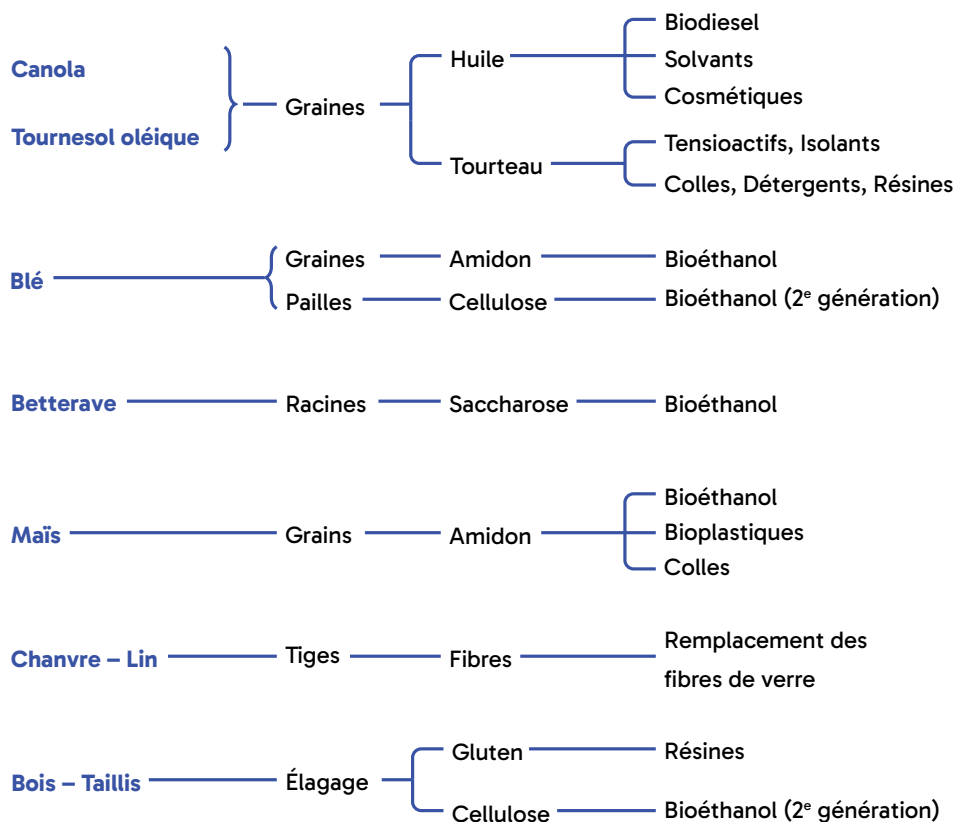


Figure 4.11 Schéma des bioproduits obtenus à partir de différentes sources de biomasse

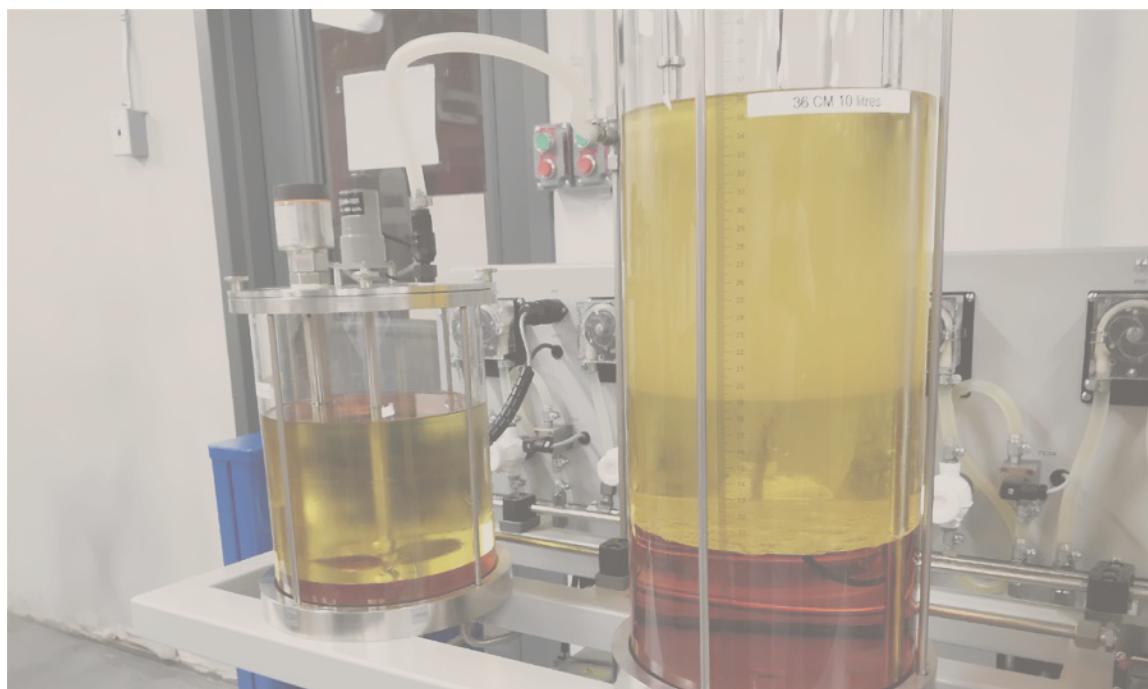
4.6.2 Production de biocarburants dans le monde

D'après les projections publiées dans la littérature spécialisée, la production mondiale de bioéthanol et de biodiesel, les deux biocarburants les plus fabriqués mondialement, pourrait atteindre 140 milliards de litres et 55 milliards de litres par année, respectivement, en 2031.

Le **tableau 4.8** présente les principaux producteurs de biocarburants à l'échelle mondiale ainsi que les principales sources de biomasse utilisées pour leur production.

Tableau 4.8 Classement des producteurs mondiaux de biocarburants et principales sources de biomasse

Pays	Rang		Matières premières	
	Bioéthanol	Biodiesel	Bioéthanol	Biodiesel
États-Unis	1	2	Maïs	Huile de soja, huiles de cuisson usagées
Union européenne	4	1	Betterave, blé, maïs	Huile de canola, huile de palme, huiles de cuisson usagées
Brésil	2	4	Canne à sucre, maïs	Huile de soja
Chine	3	8	Maïs, manioc	Huiles de cuisson usagées
Inde	5	14	Mélasses, canne à sucre, maïs, blé, riz	Huiles de cuisson usagées
Canada	6	13	Maïs, blé	Huile de canola, huiles de cuisson usagées, huile de soja
Thaïlande	7	7	Mélasses, manioc, canne à sucre	Huile de palme
Argentine	8	5	Mélasses, canne à sucre, maïs	Huile de soja



4.7 Exercices

A Exercices de révision

- A.1** Énumérez les caractéristiques de la biomasse.
- A.2** Quel est le rôle d'une bioraffinerie? Énumérez-en les caractéristiques.
- A.3** Énumérez les avantages et les inconvénients liés à la conception de bioproduits.
- A.4** Sous quelles formes réalise-t-on la valorisation énergétique de la biomasse?
- A.5** Combien de générations de biocarburants existe-t-il, et quelles sont les caractéristiques de chacune d'elles?
- A.6** Nommez les techniques actuellement employées pour transformer la biomasse en énergie par voie sèche.
- A.7** Qu'est-ce que le biogaz?
- A.8** Quelles sont les utilités du biogaz?
- A.9** Qu'est-ce que le digestat?
- A.10** Quelle technologie est actuellement employée pour transformer la biomasse en énergie par voie humide?
- A.11** De quelle manière réalise-t-on la méthanisation? Détaillez votre réponse le plus possible.
- A.12** Nommez les deux biocarburants liquides les plus fabriqués industriellement à l'échelle mondiale.
- A.13** Comment fabrique-t-on le bioéthanol de première génération?
- A.14** Décrivez de manière sommaire la production du bioéthanol de deuxième génération.
- A.15** Quelle est l'équation de la réaction de fermentation alcoolique?
- A.16** Quelles sont les différences entre les procédés de fabrication du bioéthanol de première et de deuxième génération?
- A.17** Quels autres produits valorisables obtient-on dans le processus de fabrication du bioéthanol, à part le bioéthanol? Nommez-les et indiquez de quelle manière ils sont valorisés par l'industrie.
- A.18** Qu'est-ce que le biodiesel?
- A.19** Comment le biodiesel est-il produit par l'industrie? Écrivez l'équation de la réaction qui sert à sa production.
- A.20** Quel est le nom du sous-produit qui résulte de la production du biodiesel? De quelle manière ce sous-produit pourrait-il être valorisé?
- A.21** Pourquoi est-il important de développer des biocarburants?
- A.22** Quelle est la signification du terme « biocomposite »? Donnez quelques exemples de biocomposites.
- A.23** Quelle est la signification du terme « produit biosourcé »? Donnez quelques exemples de ce genre de produits.

B Exercices de réflexion

- B.1** Est-ce que l'utilisation du biométhane comme biocarburant gazeux à la place d'autres sources d'énergie (essence, mazout, etc.) est une pratique correcte et économiquement viable? Justifiez votre réponse.
- B.2** De quelle manière une biomasse humide pourrait-elle être valorisée?
- B.3** Est-ce que les termes « biogaz » et « biométhane » ont la même signification, ou y a-t-il une différence entre les deux?
- B.4** Pourquoi l'industrie a-t-elle procédé à la conception des biocarburants de deuxième génération?
- B.5** Est-il plus facile ou plus difficile de produire le bioéthanol de deuxième génération que de produire celui de première génération?

C Exercices d'application

- C.1** Un technicien de procédés industriels qui travaille pour une municipalité a comme tâche d'évaluer l'implantation d'un digesteur pour produire du biogaz à partir de déchets organiques domestiques et industriels. Pour ce faire, il doit effectuer quelques calculs et estimations :
 - a)** Calculez le volume total de biogaz produit quotidiennement, sachant que la municipalité produit 1 tonne de déchets organiques par semaine. On estime la production de biogaz à 0,25 m³ par kg de déchets organiques traité.
 - b)** Sachant que la conversion de 1 m³ de biogaz peut fournir environ 6 kWh d'énergie, calculez la quantité totale d'énergie qui peut être générée quotidiennement à partir du biogaz produit par la municipalité.
 - c)** Sachant que la municipalité a besoin de 65 000 kWh d'énergie par jour pour faire fonctionner ses bâtiments publics, calculez la fraction des besoins énergétiques de cette municipalité qui pourra être couverte par l'utilisation du biogaz produit chaque jour.
 - d)** Sachant que la combustion du biogaz produit environ 60 % moins de gaz carbonique (CO₂) que celle des combustibles fossiles, calculez la réduction des émissions de CO₂ si le biogaz est utilisé à la place des combustibles fossiles pour produire 65 000 kWh d'énergie par jour.
 - e)** Estimez si l'implantation du digesteur est justifiable sur les plans économique et environnemental.

Chapitre 5

Productions de matières plastiques



Division Plastiques Cascades de Kingsey Falls

Sommaire

5.1 Introduction	132
5.1.1 Définitions et terminologie	132
5.1.2 Généralités	133
5.2 Structure des matières plastiques	136
5.2.1 Assemblage des monomères	136
5.2.2 Morphologie des polymères (structure au niveau microscopique)	139
5.3 Classification des matières plastiques	144
5.4 Propriétés des matières plastiques	150
5.5 Procédés de polymérisation	150
5.5.1 Polycondensation	150
5.5.2 Polyaddition	152
5.6 Méthodes industrielles de polymérisation	154
5.6.1 Polymérisation en masse	154
5.6.2 Polymérisation en solution	156
5.6.3 Polymérisation en suspension (ou en perles)	156
5.6.4 Polymérisation en émulsion	157
5.7 Techniques de mise en forme des matières plastiques	159
5.7.1 Adjuvants	159
5.7.2 Plastifiants	159
5.7.3 Stabilisants	160
5.8 Recyclage et valorisation des matières plastiques	167
5.8.1 Recyclage des thermoplastiques	167
5.8.2 Valorisation des matières plastiques	167
5.9 Notions de santé et de sécurité	171
5.9.1 Risques liés à la toxicité et aux conditions de travail dans les usines de transformation	171
5.9.2 Risques liés à la toxicité des produits finis lors de leur usage	171
5.10 Production industrielle	172
5.11 Exercices	175

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposerons la production de matières plastiques et l'industrie qui s'y intéresse, la plasturgie, car elles sont actuellement indissociables de notre environnement et leur impact sur notre vie quotidienne est considérable. Pour une caractérisation aussi complète que possible de ce domaine vaste de l'industrie, nous verrons d'abord la terminologie et les définitions spécifiques aux matières plastiques, quelques-unes de leurs particularités et des considérations théoriques les concernant. Ensuite, nous présenterons plusieurs informations pratiques sur les méthodes de polymérisation industrielle, les techniques de mise en forme ainsi que le recyclage et la valorisation des matières plastiques. Étant donné le contexte industriel de l'usage vaste des matières plastiques, nous aborderons les notions de santé et de sécurité entourant la fabrication et l'usage des matières plastiques au quotidien ainsi que des exemples d'applications dans différents aspects de la vie. Les exercices et les problèmes d'application proposés à la fin du chapitre permettront ensuite de réviser et de mettre en pratique les notions théoriques présentées.

5.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique aux productions de matières plastiques et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Calandrage* = procédé de fabrication d'une feuille ou d'un film thermoplastique par laminage (passage entre les cylindres d'une calandre, lesquels sont chauffés et disposés en parallèle);
- › *Copolymère* = polymère constitué par l'enchaînement covalent de deux ou de plusieurs structures de base répétitives;
- › *Effet stérique* = ensemble d'interactions entre les nuages électroniques des éléments ou groupes d'atomes qui constituent une molécule.
- › *Élastomère* = matériau obtenu par synthèse chimique qui présente une élasticité élevée et peut s'allonger sans se rompre;
- › *Extrusion* = procédé continu de mise en forme des thermoplastiques qui a comme résultat la production de profilés (objets finis ou semi-ouvrés);
- › *Homopolymère* = polymère constitué par l'enchaînement covalent d'une même structure moléculaire répétitive;
- › *Injection* = procédé de mise en forme des thermoplastiques comportant trois phases : remplissage d'un moule, compactage de son contenu et éjection de la pièce finale;
- › *Matière plastique* = matière synthétique constituée d'un polymère, d'additifs (plastifiants, charges, renforts, etc.) et d'adjuvants (stabilisants, colorants, pigments, etc.) qui peut être moulée ou modelée;
- › *Monomère* = unité de base qui se répète pour former une molécule organique géante (macromolécule = polymère);
- › *Plasturgie* = industrie qui s'occupe de la mise en forme des matières plastiques et leur recyclage;
- › *Polyaddition* = réaction en chaîne dans laquelle les monomères se « soudent » ensemble pour former un polymère sans qu'il y ait élimination de résidus de synthèse;
- › *Polycondensation* = réaction par étapes entre les groupements fonctionnels des monomères pour former un polymère et un résidu simple (p. ex. : H_2O , HCl , etc.);
- › *Polymère* = macromolécule organique obtenue par l'enchaînement covalent de monomères identiques ou différents;
- › *Polymérisation* = réaction chimique liant les monomères entre eux pour obtenir un polymère;

- › *Rotomoulage* = procédé de fabrication d'un produit fini thermoplastique à partir d'un moule chauffé qui effectue une rotation autour de deux axes perpendiculaires;
- › *Thermodurcissable* = macromolécule qui durcit de manière permanente (irréversible) lors de sa mise en œuvre;
- › *Thermoformage* = procédé de fabrication d'un produit fini thermoplastique à partir de feuilles ou de plaques préchauffées et ensuite appliquées sur un moule dédié;
- › *Thermoplastique* = ensemble de macromolécules pouvant passer de l'état solide à l'état fondu, et vice versa, sous l'action de la température;
- › *Transition vitreuse* = passage d'un polymère dur et cassant à une forme liquide très visqueuse (état caoutchouteux);

5.1.2 Généralités

Les matières plastiques ont envahi notre quotidien et elles se sont graduellement substituées aux matériaux conventionnels (verre, métal, bois, céramique, etc.) pour des raisons de polyvalence, d'esthétique et de marketing, mais, surtout, pour leur large gamme de propriétés physiques et chimiques, notamment leur faible densité. Les matières plastiques se sont imposées dans tous les domaines de nos activités : des objets les plus banals jusqu'aux applications techniques sophistiquées, en passant par les produits hygiéniques et alimentaires. Bien que les matières plastiques soient très variées, trois grandes utilisations dominent :

- › L'emballage
- › Les articles de construction et de travaux publics
- › Les composants techniques (automobiles, conduites électriques, électroménagers, textiles, etc.)

C'est la nature particulière de leurs molécules, assemblées en forme de chaîne, ainsi que la variété de leurs modes d'assemblage, qui est à l'origine de cette diversité. Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturelles, les matières plastiques doivent cet essor à leur gamme de caractéristiques : dures, molles ou élastiques, transparentes ou opaques, isolantes et quelquefois conductrices, plus ou moins résistantes à un usage intensif, toujours légères. Les caractéristiques que l'on peut leur donner sont quasi infinies et souvent inégalables. Les matières plastiques ont cependant deux défauts :

- 1) Leur synthèse repose sur l'utilisation du pétrole, qui est un produit fossile non renouvelable.
- 2) Arrivées au stade de déchet, elles posent d'énormes problèmes, car elles ne sont pas biodégradables et leur durée de vie peut s'étaler sur des centaines d'années.

L'émergence du concept de **développement durable** vers la fin des années 1980 a conduit à la naissance de la notion du **cycle de vie** des produits industriels, dont les matières plastiques font partie. Une schématisation du cycle de vie des matières plastiques est présentée à la **figure 5.1**. Ce cycle est composé de trois étapes principales :

- 1) La conception
- 2) L'usage
- 3) La fin de vie du produit

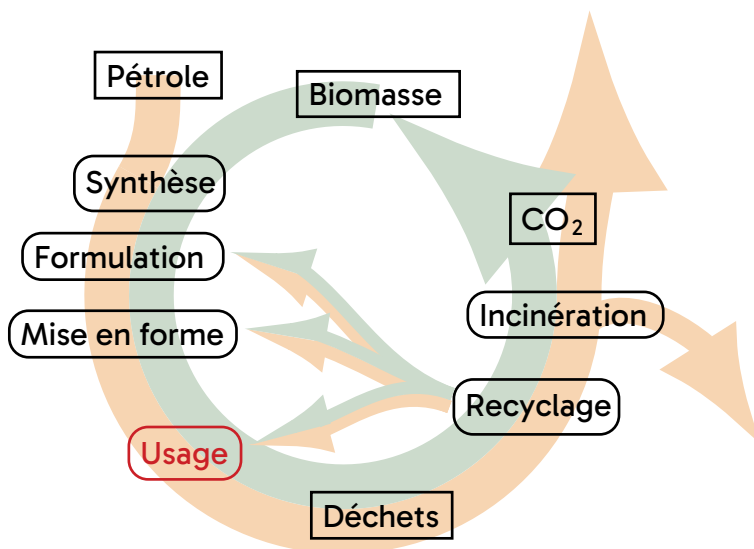


Figure 5.1 Schématisation du cycle de vie des matières plastiques

Les matières plastiques sont, pour la plupart, synthétisées par **polymérisation** à partir d'hydrocarbures (séparés par distillation du pétrole brut) et, en plus faible proportion, par **modification chimique des polymères naturels** contenus dans la biomasse. Les procédés de polymérisation consistent à obtenir des molécules de haut poids moléculaire par l'enchaînement covalent, linéaire ou tridimensionnel d'un grand nombre de petites molécules (monomères) contenues dans les hydrocarbures pétroliers ou synthétisées à partir de ceux-ci. Ces procédés de polymérisation seront décrits en détail dans la **section 5.5**.

Après leur synthèse, les polymères ne sont jamais utilisés tels quels. On procède à leur **formulation** en y ajoutant différents composés afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques, physiques ou chimiques. La mise en forme des matières plastiques peut se faire de diverses manières, en utilisant des techniques de moulage appropriées aux polymères de départ et aux usages prévus pour le produit final. La description détaillée de ces techniques de mise en forme sera faite dans la **section 5.7**.

Comme les matières plastiques sont des produits polyvalents à faible coût de production, il en résulte une grande utilisation pour des applications souvent éphémères telles que l'emballage. Les contenants et les emballages en plastique devenant rapidement désuets, ils peuvent se retrouver rapidement dans les sites d'enfouissement après

leur usage. Étant donné que les matières plastiques sont très peu dégradables, il en résulte un encombrement progressif et massif de ces sites. Les solutions à cette situation sont le recyclage et la valorisation des matières plastiques, aspects qui seront décrits en détail dans la [section 5.8](#).

Les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation des matières plastiques par rapport aux matériaux conventionnels sont résumés dans le [tableau 5.1](#).

Tableau 5.1 Avantages et inconvénients liés à l'usage des matières plastiques

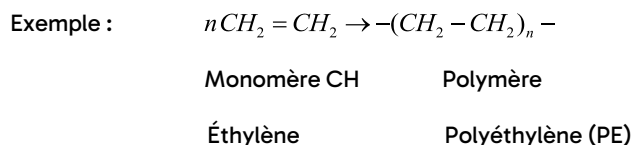
Avantages	Inconvénients
<p>Légereté :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Économie de poids • Économie d'énergie • Préférence de l'industrie du transport terrestre et de l'aéronautique 	<p>Résistance thermique :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible • Mauvaise tenue au froid (-40 °C) • Faible tenue face aux changements de température (maximum 70 – 100 °C)
<p>Choix de l'aspect :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fini luisant et uni • Surface rugueuse, texturée ou antidérapante • Large gamme de dureté (sec et dur, mou et soyeux) 	<p>Fluage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relâchement progressif des tensions internes qui peut mener à une déformation permanente • Taux de fluage variable selon le grade du plastique
<p>Isolation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thermique • Électrique 	<p>Module d'élasticité faible en comparaison avec d'autres matériaux</p>
<p>Mise en forme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Différents procédés de moulage (injection, extrusion, etc.) • Formes diversifiées – taille et complexité 	<p>Inflammabilité et toxicité :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilité à s'enflammer et à brûler • Fumée toxique dégagée par la combustion
<p>Aucune corrosion</p> <p>Résistance chimique spécifique, selon les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nature du solvant ou de l'agent corrosif • Concentration et température d'utilisation • Durée d'exposition et conditions environnementales • Nature du plastique choisi • Contraintes exercées durant le moulage 	<p>Coût :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Large échelle de coût selon le type et le grade du plastique • Variation liée aux performances du plastique • Utilisation du pétrole, qui est un produit fossile • Énormes problèmes au stade de déchet

Malgré la très grande diversité de polymères, les six formes synthétiques suivantes représentent environ 90 % de la production mondiale : le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polyuréthane (PU).

5.2 Structure des matières plastiques

Le mot « polymère » vient du grec *polus*, qui signifie « nombreux », et *meros*, qui signifie « partie ». Donc, un polymère est constitué de plusieurs parties, chaque partie étant constituée d'un motif ou d'une unité répétitive – un **monomère**. Ces monomères constituent les éléments de base de tous les polymères de masse moléculaire élevée, qu'il s'agisse de macromolécules biologiques qu'on trouve dans les organismes vivants (protéines, ADN, ARN, collagène), de polymères synthétiques (plastiques, élastomères) ou de polymères naturels (caoutchouc, cellulose, etc.).

Un polymère est donc une macromolécule obtenue par l'enchaînement covalent de monomères qui sont identiques ou différents les uns des autres.



Le nombre moyen de monomères (n) dans les molécules finales (les polymères) s'appelle le « degré de polymérisation ». Lorsqu'il est élevé, on parle de « hauts polymères »; lorsqu'il est faible, on parle d'« oligomères ».

La masse moléculaire de ces molécules dépasse souvent largement 100 000 g/mol, ce qui veut dire qu'on peut enchaîner 10 000 monomères ou plus. Les liaisons covalentes constituant le squelette macromoléculaire sont le plus souvent de type C-C. Il existe des polymères dans lesquels ces liaisons sont remplacées par :

- › des liaisons C-O, par exemple dans les polyéthers, les polyesters, etc.;
- › des liaisons C-N, comme dans les polyamides;
- › ou même remplacer le C par Si et créer un enchaînement Si-O, comme dans les polysilanes et les polysiloxanes (silicones).

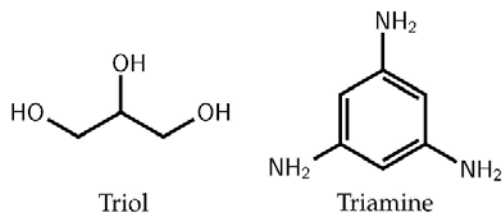
5.2.1 Assemblage des monomères

L'enchaînement des monomères peut se faire de différentes façons :

- › En formant comme un collier de perles (en maillons) – dans ce cas, on parle de « polymères linéaires ».
- › En présentant de courtes ramifications aléatoires – dans ce cas, on parle de « polymères ramifiés ».
- › En s'étendant dans les trois directions de l'espace – on obtient un « polymère réticulé » (en réseau).

Une macromolécule peut être constituée d'un seul type de motif ou de motifs différents. Quand la macromolécule est constituée d'un seul type de motif, on parle d'« homopolymères ». Quand plusieurs motifs différents sont répétés, on parle de « copolymères ». On en distingue plusieurs types suivant la façon dont sont organisés les divers monomères qui les composent. Quand ils se répètent en alternance, on parle d'un « copolymère alterné ». Dans la majorité des cas, on a un **copolymère statistique**, où les monomères se mélangent au hasard. Quand les monomères s'enchaînent les uns après les autres en formant des blocs d'au moins deux unités répétitives de même type, on parle de « copolymères séquencés » (à blocs).

Le **tableau 5.2** montre la disposition de monomères dans les divers types de polymères possibles. Les propriétés du polymère varieront en fonction de l'agencement de ses monomères.

2) $f = 3$ (molécules trifonctionnelles)

Au sein d'une chaîne, les monomères peuvent être disposés de différentes façons les uns par rapport aux autres. Par exemple, pour les monomères vinyliques de formule générale $(\text{CH}_2 = \text{CH}-\text{R})$, les enchaînements possibles (figure 5.2) sont les suivants :

- a) tête à queue
- b) tête à tête
- c) queue à queue

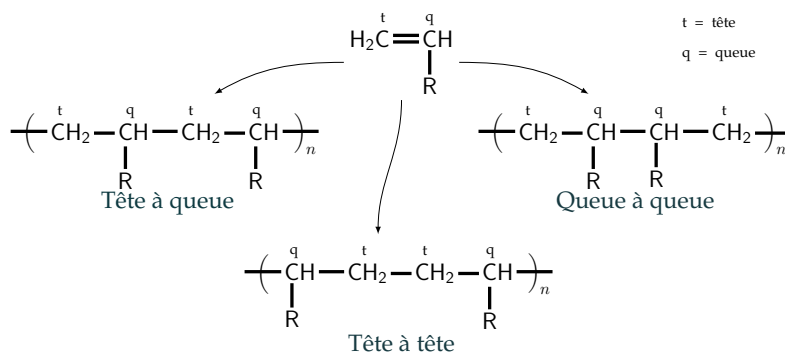


Figure 5.2 Enchaînements de monomères vinyliques

L'enchaînement de tête à queue est prépondérant pour des raisons de résonance et d'effet stérique. Les substituants y sont séparés par un groupe méthylène : on évite ainsi les problèmes d'encombrement stérique.

Tacticité (figure 5.3) – Dans les polymères vinyliques, la présence de carbone sp^3 tétrasubstitué avec quatre substituants différents induit une activité optique due à ce carbone asymétrique.

Les isomères peuvent être :

- › **isotactiques** – Tous les substituants R sont disposés du même côté du plan défini par les atomes de la chaîne principale.
- › **syndiotactiques** – Les substituants R sont alternativement disposés d'un côté et de l'autre de ce plan.
- › **atactiques** – Il s'agit d'un enchaînement aléatoire, sans aucun ordre dans la disposition des substituants R.

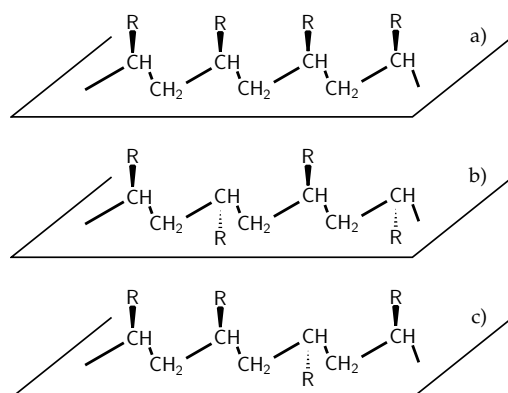


Figure 5.3 Différents types d'enchaînements de monomères vinyliques :
 a) isotactique; b) syndiotactique; c) atactique

Règle générale : La stéréorégularité de la chaîne augmente les possibilités de cristallisation du polymère.

5.2.2 Morphologie des polymères (structure au niveau microscopique)

La morphologie d'un polymère est déterminée par :

- › la régularité moléculaire (structure);
- › les forces intermoléculaires;
- › les conditions d'accès à l'état solide.

À l'état solide, les chaînes polymères peuvent prendre une forme cristalline (ordonnée) ou une forme amorphe (désordonnée).

État cristallin – Généralement, les chaînes polymères sont flexibles, elles ont donc une tendance à s'allonger en ligne droite les unes à côté des autres, comme les crayons neufs dans une boîte. Elles s'ordonnent encore mieux si elles sont linéaires et si les groupements latéraux se répartissent uniformément autour de la chaîne principale. En raison des forces intramoléculaires, les chaînes se replieront sur elles-mêmes avant de s'allonger sur une courte distance, tel qu'illustré à la [figure 5.4a](#), à la page suivante. Sous l'effet des forces intermoléculaires, les chaînes de polymères peuvent s'empiler les unes sur les autres et former une lamelle cristalline ou un cristal ([figure 5.4b](#)). Ces cristaux ne se développent cependant qu'à une taille très limitée, inférieure au micromètre, c'est pour cette raison qu'on les appelle « cristallites ». Si elles comportent des défauts ou si l'intensité des forces intermoléculaires n'est pas assez grande pour entraîner leur empilement, les chaînes polymères s'enchevêtrent et forment des zones désordonnées. Dans la plupart des cas, les cristallites sont enrobées de matière désordonnée, et ce mélange s'appelle une « sphérolite », car sa croissance s'effectue de façon radiale ([figure 5.4c](#)).

Règle générale : Plus la chaîne polymère est simple, et donc moins elle comporte de ramifications, plus la cristallinité est élevée.

État amorphe – Les molécules de certains polymères sont disposées complètement au hasard (elles sont dites « désordonnées »), à peu près comme une masse de spaghettis cuits. Autrement dit, à l'état amorphe, les chaînes polymères sont entremêlées n'importe comment, ce qui se traduit par une distance moyenne plus élevée entre les chaînes que dans l'état cristallin.

Les polymères sont souvent décrits comme étant cristallins ou amorphes, alors qu'il est plus exact de les décrire par leur degré de cristallinité. Aucun polymère n'est cristallin à 100 %. Autrement, sa structure très organisée l'empêcherait de se dissoudre. Par conséquent, il vaut mieux classer les polymères en deux catégories : amorphes et semi-cristallins.

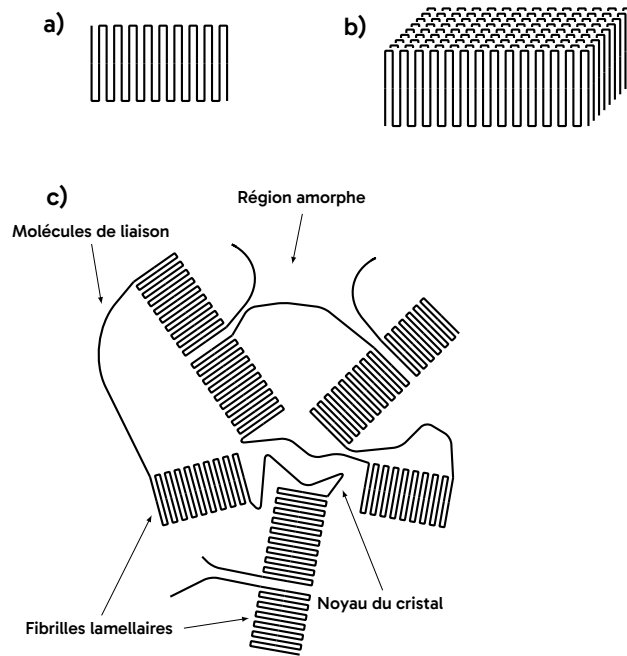


Figure 5.4 Schéma de la morphologie des polymères

La présence simultanée de zones cristallines et de zones amorphes dans un polymère a une influence importante sur ses propriétés, notamment sur ses propriétés thermomécaniques. Afin d'évaluer cette influence, on définit un taux de cristallinité (X_c), qui peut être exprimé en volume ou en masse.

- 1) Taux de cristallinité exprimé en volume (X_v)

$$X_v = \frac{V_c}{V} = \frac{\text{volume des zones cristallines}}{\text{volume total}} \quad (5.1)$$

- 2) Taux de cristallinité exprimé en masse (X_m)

$$X_m = \frac{M_c}{M} = \frac{\text{masse des zones cristallines}}{\text{masse totale}} \quad (5.2)$$

où :

$$M = M_c + M_a$$

$$V = V_c + V_a \quad (5.3)$$

$M_a (V_a)$ = masse (volume) de la portion amorphe

$M_c (V_c)$ = masse (volume) de la portion cristalline

Suivant la valeur du taux de cristallinité, la nature du polymère change, et ses propriétés physiques aussi. Quelques caractéristiques associées aux polymères amorphes et semi-cristallins sont présentées dans le [tableau 5.3](#).

Tableau 5.3 Quelques caractéristiques des polymères amorphes et semi-cristallins

Caractéristiques	
Polymères amorphes	Polymères semi-cristallins
Transparents	Translucides ou opaques
Étirement difficile	Bonne possibilité d'étirement
Retrait faible (de 0,2 à 1 %), bonne stabilité dimensionnelle	Retrait important (de 1,5 à 3 %)
Existence d'une plage de ramollissement	Point de fusion net
Faible résistance mécanique	Bonne résistance mécanique
Faible résistance sous contrainte	Bonne résistance sous contrainte
Faible tenue face aux hydrocarbures	Bonne tenue face aux hydrocarbures

Si la cristallinité d'un polymère augmente, ses propriétés peuvent être influencées de manière positive ou négative par rapport à celles d'un polymère amorphe. Les propriétés qui s'accroissent à la suite d'une augmentation de la cristallinité sont la densité, la rigidité, la résistance en tension, la résistance face aux changements de température, le retrait au moulage. Les deux seules propriétés qui diminuent si la cristallinité d'un polymère donné augmente sont la transparence et la résistance à l'impact.

Les mouleurs de matières plastiques s'intéressent de près au comportement des polymères face à la chaleur. Les polymères sont très sensibles aux changements de température et, lors de leur chauffage, deux transformations (transitions) différentes peuvent être observées :

- 1) Une **transition vitreuse**, qui est liée à la phase amorphe contenue dans le polymère.
- 2) Une **fusion**, qui est liée à la phase cristalline existante dans le polymère.

Quand on chauffe un polymère cristallin à une vitesse constante, sa température croît à une vitesse constante (figure 5.5.a). La quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un gramme de polymère d'un degré Celsius est appelée « capacité calorifique ». La température augmente jusqu'à ce que le polymère atteigne son point de fusion.

Pendant la fusion, la température reste constante même si on ajoute de la chaleur, car la chaleur sert à défaire les liaisons existantes entre les chaînes, et non à chauffer le matériau. Cette chaleur s'appelle « chaleur latente de fusion ». Une fois que tout le polymère est fondu, la température augmente à nouveau. La fusion s'accompagne donc d'un changement de capacité calorifique et d'une absorption d'énergie sous forme de chaleur latente.

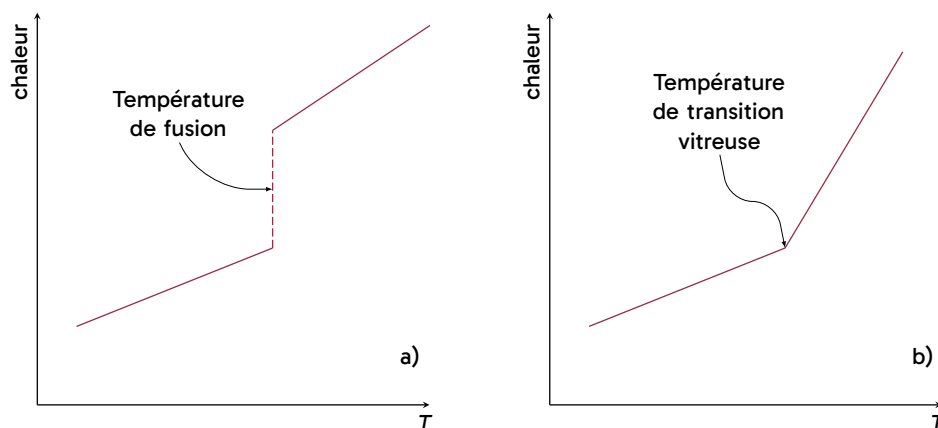


Figure 5.5 Comportement thermique des polymères

(a = fusion des zones cristallines; b = transition vitreuse des zones amorphes)

Dans le cas d'un polymère amorphe, à basse température, les chaînes se déplacent peu, car elles sont enchevêtrées comme dans une pelote de laine et les forces intermoléculaires participent à la cohésion du système. Après le chauffage, une partie des forces intermoléculaires disparaissent et le polymère se « ramollit ». Ce ramollissement est observé au-dessus d'une certaine température, dite de « transition vitreuse ». Cela s'explique par le fait qu'à partir de ce seuil, les chaînes polymères peuvent glisser les unes sur les autres comme un plat de spaghettis chauds. On obtient une matière plastique molle qui devient de plus en plus fluide à mesure que la température augmente. Il n'existe pas de chaleur latente de transition vitreuse, car le polymère ne change pas de phase. Sa solidité évolue avec le chauffage : il passe d'un état dur et cassant à un état visqueux (caoutchouteux ou élastomérique).

Dans le **tableau 5.4**, nous présentons les températures de transition vitreuse et les points de fusion des polymères les plus usuels.

Tableau 5.4 Températures de transition vitreuse et de fusion de quelques polymères

Abréviation	Polymère	Température de transition vitreuse (°C)	Point de fusion (°C)
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène	110	–
BR	Polybutadiène	-85	–
CA	Acétate de cellulose	100 – 130	–
ETFE	Éthylène tétrafluoroéthylène	-61	270
NR	Néoprène	-50	–
MF	Mélatamine formaldéhyde	110 – 230	–
IR	Polyisoprène (caoutchouc naturel)	-75	–
PA	Polyamide amorphe	160	196
PA11	Polyamide 11	30	185
PA12	Polyamide 12	55	178
PA6	Polyamide 6	55	230
PAN	Polyacrylonitrile	95	–
PC	Polycarbonate	150	230 – 250
PEBD	Polyéthylène basse densité	-90	115
PEHD	Polyéthylène haute densité	-80	130
PET (PETE)	Polyéthylène téréphtalate	70	250
PP	Polypropylène	-20	170
PS	Polystyrène atactique amorphe	90 – 100	80 – 100
PS	Polystyrène isotactique	100	263
PVC	Polychlorure de vinyle rigide	75 – 85	165
PVC	Polychlorure de vinyle souple	0 – 40	150

5.3 Classification des matières plastiques

Même si le nombre de polymères qu'il est possible de fabriquer à l'échelle industrielle est très grand, on peut les classer, suivant leurs propriétés thermomécaniques, en trois grandes familles :

- › Les thermoplastiques
- › Les thermodurcissables
- › Les élastomères

Les **thermoplastiques** possèdent les caractéristiques suivantes :

- › Ils comportent de très longues chaînes polymériques libres qui portent très peu de liaisons intermoléculaires susceptibles de restreindre leur liberté de mouvement, ou ils n'en comportent aucune.
- › Ils ramollissent et se déforment sous l'effet de la chaleur (figure 5.6), car leurs chaînes glissent les unes par rapport aux autres. Lors du ramollissement, ils deviennent souples, ce qui permet leur moulage (déformation et mise en forme). Une fois qu'ils ont refroidi, la forme donnée demeure figée.
- › Leur thermoplasticité initiale est réversible et ils ne subissent aucune modification chimique, ce qui permet de les ramollir et de les remodeler un grand nombre de fois sans que leurs propriétés en soient altérées. Cela signifie qu'ils sont recyclables.
- › Ils présentent une durée de vie de plusieurs centaines d'années, ce qui signifie qu'ils ne sont pas biodégradables.



Figure 5.6 Ramollissement des thermoplastiques

À eux seuls, les thermoplastiques représentent près de 90 % du total des matières plastiques fabriquées industriellement. Ils existent sous différentes variations : rigides ou souples, sous forme de feuilles très minces, ou de revêtement, expansés ou allégés, etc. La gamme de couleurs possibles lors de la fabrication est très étendue. De plus, les thermoplastiques sont résistants à l'humidité, aux parasites et aux moisissures. Ils présentent cependant une série d'inconvénients :

- › Fluage élevé
- › Sensibilité aux rayons ultraviolets
- › Coefficient de dilatation linéaire élevé, ce qui entraîne un retrait important au moulage
- › Combustibilité

Les représentants les plus importants de cette famille de matières plastiques ainsi que leurs caractéristiques sont énumérées dans le [tableau 5.5](#).

Tableau 5.5 Thermoplastiques courants et leurs caractéristiques

Thermoplastiques de grande diffusion	
Nom (abréviation)	Caractéristiques
Polyéthylène (PE)	<ul style="list-style-type: none"> Deux types : polyéthylène haute densité (PEHD) et polyéthylène basse densité (PEBD) Opaque sous forme compacte et transparent sous forme de film Imperméable à l'eau, à l'air et aux hydrocarbures Sensible aux chocs Résistant au froid Facile à manier et à mettre en forme Bonne stabilité chimique Excellent isolant électrique
Polypropylène (PP)	<ul style="list-style-type: none"> Un des plus légers thermoplastiques Rigidité élevée à température ambiante Très grande stabilité chimique Excellent isolant électrique Retrait important au moulage Facile à mettre en forme
Polystyrène (PS)	<ul style="list-style-type: none"> Trois types : polystyrène standard, polystyrène choc et polystyrène expansé Polystyrène standard : transparent, brillant, rigide et cassant, résistance chimique faible, stabilité dimensionnelle excellente Polystyrène choc : translucide à opaque, stabilité dimensionnelle excellente, faible tenue thermique, résistance chimique faible
Polychlorure de vinyle (PCV)	<ul style="list-style-type: none"> Bonne rigidité à la température ambiante Excellente résistance à l'abrasion Fragilité au froid Bonne résistance chimique Bon isolant électrique



Tableau 5.5 Thermoplastiques courants et leurs caractéristiques (*suite*)

Thermoplastiques techniques	
Nom (abréviation)	Caractéristiques
Polyamide (PA)	<ul style="list-style-type: none"> • Différents types de PA distingués par des chiffres • Bonnes caractéristiques mécaniques • Bonne tenue face aux changements de température • Bon compromis entre les caractéristiques mécaniques, thermiques et chimiques • Hydrophile
Polycarbonate (PC)	<ul style="list-style-type: none"> • Excellentes propriétés mécaniques • Bonne résistance thermique • Transparent • Mauvaise résistance aux contacts prolongés avec l'eau, les agents chimiques et les rayons UV
Polyester	<ul style="list-style-type: none"> • Amorphe et transparent • Imperméable aux gaz • Résistant à la fatigue, à l'eau et aux solvants
Thermoplastiques de haute performance	
Nom (abréviation)	Caractéristiques
Résine fluorée	<ul style="list-style-type: none"> • Résistant à la fatigue, à l'eau et aux solvants • Résistant à presque tous les agents chimiques • À l'épreuve du temps • Ininflammable • Bonne flottabilité
Polysulfone (PS)	<ul style="list-style-type: none"> • Transparent • Allie résistance à la température, propriétés mécaniques et électriques élevées

Les **thermodurcissables** présentent les caractéristiques suivantes :

- › Ils sont obtenus la plupart du temps par condensation. Dans ce cas, les liaisons se forment dans l'espace (réseau tridimensionnel) pour donner un polymère hautement réticulé.
- › Une fois mis en forme, il n'est plus possible de les déformer ni de les remodeler par chauffage. Ils gardent leur état solide de manière irréversible (*figure 5.7*).
- › Ils sont durs, infusibles et insolubles; ils sont également insolubles dans les solvants.
- › Ils présentent une bonne tenue face aux températures élevées (> 200 °C).
- › Ils offrent une meilleure résistance au fluage (conservent une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps) que les thermoplastiques.
- › Ils présentent une bonne rigidité.

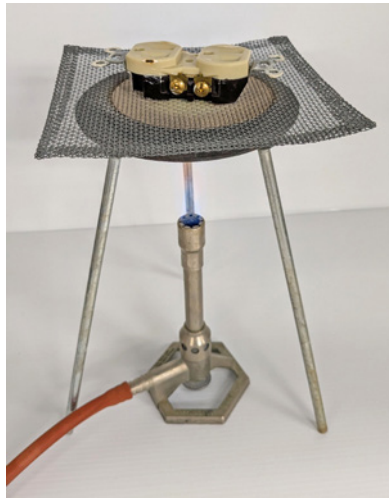


Figure 5.7 Thermodurcissables intacts malgré le chauffage

La mise en œuvre des thermodurcissables est moins pratique et plus lente que celle des thermoplastiques, mais elle produit des matériaux très solides et très résistants aux agressions chimiques et à la chaleur. Les cadences de fabrication sont assez faibles.

Les plus importants représentants de cette famille de matières plastiques sont énumérés avec leurs caractéristiques dans le [tableau 5.6](#).

Tableau 5.6 Thermodurcissables courants et leurs caractéristiques

Nom (abréviation)	Caractéristiques
Polyuréthane (PU)	<ul style="list-style-type: none"> • Grande diversité de duretés et de textures en fonction des associations chimiques des différents monomères
Phénoplaste (PF)	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance aux produits chimiques • Bonne résistance à la chaleur • Isolant électrique • Transformable par moulage et par compression • Souvent coloré en brun foncé
Aminoplaste (AF)	<ul style="list-style-type: none"> • Deux types principaux : urée-formaldéhyde (UF) et mélamine formaldéhyde (MF) • Dureté et rigidité exceptionnelles • Peu sensible à l'hydrolyse et à la lumière • Résistance à l'abrasion • Bonne tenue face aux solvants • Difficilement inflammable • Peut être produit en teintes claires

Les **élastomères** présentent une série de caractéristiques qui peuvent se résumer comme suit :

- › Il s'agit de polymères élastiques, à structure faiblement réticulée (de l'ordre d'une réticulation par plus de 100 motifs de répétition).
- › Leurs structures réticulées à mailles larges sont formées non pas par des liaisons chimiques, mais par des liaisons physiques d'attraction.
- › Ils présentent une grande déformabilité, ou capacité à s'allonger sans se rompre (ils peuvent atteindre de 6 à 8 fois leur longueur initiale). Cette caractéristique est due aux longues chaînes macromoléculaires repliées sur elles-mêmes qui peuvent se déployer sous l'action d'une contrainte externe.
- › Ils retrouvent leur géométrie initiale lorsqu'ils sont libérés de la contrainte exercée.
- › Ils présentent une série de propriétés spécifiques : grande élasticité, fort pouvoir amortissant, faible rigidité.



Figure 5.8 Reprise de la forme des élastomères après compression


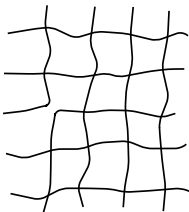
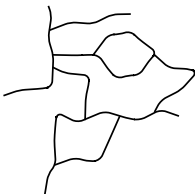
Les élastomères les plus représentatifs sont présentés avec leurs caractéristiques dans le **tableau 5.7**.

Tableau 5.7 Élastomères représentatifs et leurs caractéristiques

Nom (abréviation)	Caractéristiques
Caoutchouc Naturel = cis-1,4-polyisoprène (NR) Polyisoprène synthétique (IR)	<ul style="list-style-type: none"> • Grande extensibilité • Propriétés d'amortissement • Excellente résistance au déchirement • Faible résistance à l'huile • Faible résistance à l'ozone
Spéciaux Butadiène-acrylonitrile Polychloroprène	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance aux produits pétroliers et aux solvants • Résistance aux produits chimiques corrosifs • Résistance au vieillissement • Résistance à l'oxydation et aux intempéries
Élastomère fluoré Polyacrylate	<ul style="list-style-type: none"> • Hautes performances chimiques : résistance aux carburants, à l'huile et à l'ozone • Imperméable aux gaz • Peu sensible à l'hydrolyse et à la lumière • Résistance au vieillissement • Stabilité de la couleur

Les principales différences entre les trois catégories de matières plastiques sont énumérées et mises en évidence dans le **tableau 5.8**.

Tableau 5.8 Principales différences entre les trois catégories de matières plastiques

Thermoplastiques	Élastomères	Thermodurcissables
Partiellement cristallins	Peu cristallins	Amorphes
Module moyen, assez élastique	Module bas, très élastique	Module haut, peu élastique
Solubles	Insolubles mais gonflables	Insolubles
Fusibles	Infusibles	Infusibles
Recyclables	Peu recyclables	Pas recyclables
		
Pelote statistique	Réticulé ($\approx 1\%$)	Très réticulé

5.4 Propriétés des matières plastiques

Le succès des matières plastiques et leur substitution à d'autres matériaux conventionnels sont dus à leurs propriétés particulières :

- › Elles ont une masse volumique faible; elles servent donc à la fabrication de produits finis légers. Cette caractéristique provient du faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (C et H). Cette masse volumique varie entre 0,9 et 1,1 g/cm³ pour les polymères linéaires simples (polyéthylène, polypropylène, etc.) et peut augmenter à 1,5 g/cm³ pour les polymères contenant du chlore, du fluor ou de l'oxygène.
- › Elles offrent une faible conductivité thermique.
- › Elles présentent une forte viscosité.
- › Certaines matières, comme les polyesters aromatiques, présentent une bonne stabilité dimensionnelle.
- › Elles ont une plasticité très variable, des plus rigides, dures et cassantes, aux plus molles ou élastiques (élastomères).
- › Leur capacité de déformation est considérable, comparativement aux métaux ou aux céramiques.
- › Elles sont faciles à mettre en œuvre, car elles sont très malléables, et il est donc possible d'obtenir des formes géométriques complexes et des cadences élevées de production.
- › Elles ont une excellente capacité d'absorption des chocs (dans le cas des élastomères) grâce à leur élasticité.
- › Ce sont d'excellents isolants électriques dans des conditions variées. L'ajout de charges telles que le graphite (en poudre ou en fibres) ou le nickel (en fibres) peut en faire des conducteurs électriques.
- › Leur comportement chimique est variable et lié à leur structure. Globalement, il a été constaté que les matières plastiques ne sont pas attaquées par les acides et les bases, mais qu'elles sont vulnérables aux oxydants puissants.
- › Ce sont des isolants acoustiques lorsqu'elles peuvent être mises en œuvre sous forme de mousse ou sous forme alvéolaire.

5.5 Procédés de polymérisation

On utilise deux types de réactions pour obtenir des macromolécules : la polycondensation et la polyaddition.

5.5.1 Polycondensation

La polycondensation (figure 5.9) fait intervenir des réactions classiques de la chimie organique avec élimination d'un résidu simple : H₂O, NH₃, CO₂, HCl. La croissance des macromolécules résulte de réactions entre les groupes fonctionnels réactifs des précurseurs (monomères). Pour que la réaction de polymérisation puisse progresser, il faut donc que chaque monomère comporte au moins deux groupes fonctionnels réactifs. La réaction se produit par simple chauffage ou en présence d'un catalyseur. La masse moléculaire croît par étapes successives ou par réaction des macromolécules entre elles. Si les précurseurs en question comportent deux groupes fonctionnels, le polymère est linéaire; s'ils en comportent plus de deux, le polymère est tridimensionnel.

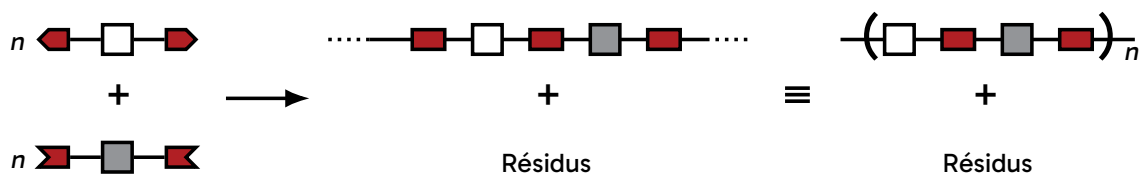
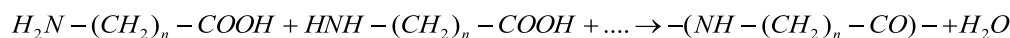


Figure 5.9 Schéma de la réaction de polycondensation

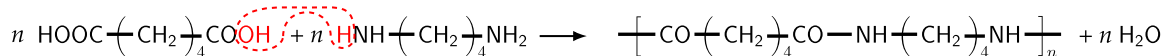
Polycondensation linéaire

Si les deux groupes fonctionnels sont présents sur le même précurseur, la polycondensation se produit comme suit :



On observe que la macromolécule croît par un enchaînement de tête à queue pour former un homopolymère linéaire.

Si les deux groupes fonctionnels sont portés par deux précurseurs différents, la polycondensation aura lieu selon la réaction suivante :



Dans ce cas, chaque précurseur peut réagir avec les fonctionnalités de l'autre précurseur pour former un copolymère alterné.

Polycondensation tridimensionnelle

Lorsqu'au moins l'un des précurseurs possède plus de deux groupes fonctionnels, la macromolécule formée n'est plus linéaire. Au cours de la croissance des chaînes, des réticulations, ou pontages, apparaissent et conduisent à un réseau tridimensionnel. Par exemple, la polycondensation entre le phénol et le formaldéhyde conduit à un réseau complexe, tel qu'illustré à la figure 5.10, à la page suivante.

Quand le réseau est suffisamment complexe, la viscosité croît brusquement et conduit à la « prise en masse » du polymère. Sur le plan pratique, il est donc important d'arrêter la polycondensation avant que la prise en masse se produise pour avoir un matériau souple et malléable qui sera durci au moment de la mise en forme.

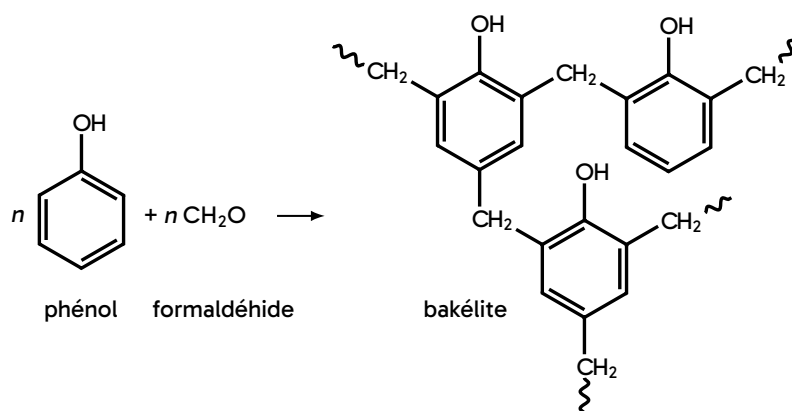


Figure 5.10 Schéma de la formation d'un polymère réticulé

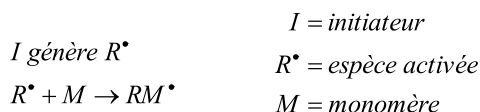
5.5.2 Polyaddition

La polyaddition est une réaction en chaîne dans le cadre de laquelle les réactifs formant la chaîne se soudent sans qu'il y ait élimination de résidus de synthèse. Cette réaction s'effectue avec des molécules comportant une ou des doubles liaisons. Les monomères sont initialement inactifs, et donc stables, dans des conditions modérées. En effet, il peut arriver que la température, les UV ou la présence d'oxydants (par exemple, l'oxygène) puissent amorcer la polymérisation. C'est notamment le cas du styrène, qui doit être entreposé au frais, sous atmosphère d'azote et à l'abri de la lumière. Afin de rendre les monomères actifs, il faut leur incorporer un initiateur (ou amorceur), lequel déclenche le processus de polymérisation en brisant la double liaison du monomère. Lorsque la réaction s'arrête, la nouvelle molécule ne contient que des liens simples C-C, très stables.

On peut décomposer la réaction de polyaddition en trois étapes :

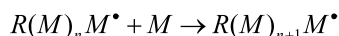
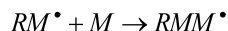
1) Initiation ou amorçage

Sous l'action de la chaleur, de radiations ou plus généralement d'un catalyseur, un initiateur I peut produire des espèces activées (notées R^\bullet) qui réagiront sur le monomère, ce qui conduira à la création d'une molécule possédant des centres actifs. Cette étape est généralement assez lente.



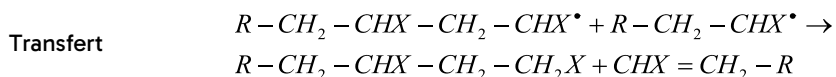
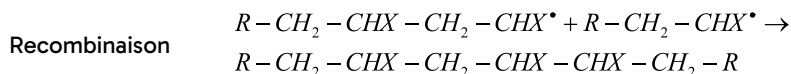
2) Propagation ou croissance

Par additions successives de monomères à la molécule activée, la macromolécule se forme. Cette étape est très rapide.



3) Terminaison

De nombreux mécanismes peuvent servir à arrêter la croissance des chaînes. Les plus courants sont la **recombinaison** et le **transfert**, qui font disparaître les centres réactifs.



Ce schéma en trois étapes est pratiquement toujours respecté pour les réactions de polyaddition. L'étape d'initiation, selon la nature de l'activation, peut se faire suivant un mécanisme radicalaire, actuellement le plus important dans le domaine industriel, ou suivant un mécanisme ionique, lequel peut être soit cationique, soit anionique.

Dans les **tableaux 5.9** et **5.10** sont présentés les formules et les noms de certains monomères ainsi que les noms et les formules des principaux polymères obtenus par addition et par polycondensation.

Tableau 5.9 Matières plastiques obtenues par polyaddition

Monomère		Polymère	
Formule	Nom	Formule	Nom
$CH_2 = CH_2$	Éthylène	$-(CH_2 - CH_2)_n -$	Polyéthylène (PE)
$CH_2 = CH - CH_3$	Propylène	$-(CH_2 - CH)_n - CH_3$	Polypropylène (PP)
$CH_2 = CH - Cl$	Chlorure de vinyle	$-(CH_2 - CH)_n - Cl$	Polychlorure de vinyle (PVC)
$CH_2 = CH - CN$	Acrylonitrile	$-(CH_2 - CH)_n - CN$	Polyacrylonitrile
$CF_2 = CF_2$	Tétrafluoroéthylène	$-(CF_2 - CF_2)_n -$	Téflon
$CH_2 = CH - C_6H_5$	Styrène	$-(CH_2 - CH)_n - C_6H_5$	Polystyrène
$CH_2 = CH - OCOCH_3$	Acétate de vinyle	$-(CH_2 - CH)_n - OCOCH_3$	Polyacétate de vinyle

Tableau 5.10 Matières plastiques obtenues par polycondensation

Monomère 1	Monomère 2	Polymère
$COOH - C_6H_5 - COOH$ Acide téréphtalique	$HO - (CH_2)_2 - OH$ Éthylène glycol	Polyéthylène téréphtalate (polyester)
$HOOC - (CH_2)_4 - COOH$ Acide adipique	$H_2N - (CH_2)_6 - NH_2$ Hexaméthylène diamine	Nylon 6,6 (polyamide)
$H_2C = O$ Formaldéhyde	$(H_2N)_2 - C = O$ Urée	Urée-formaldéhyde (Formol)

Il est à noter que les deux types de réactions utilisées pour la polymérisation, c'est-à-dire la polyaddition et la polycondensation, sont très fortement exothermiques, ce qui constitue un défi à l'échelle industrielle du point de vue du transfert thermique, d'autant plus que le milieu réactionnel est généralement visqueux pour éviter l'emballement des réacteurs.

5.6 Méthodes industrielles de polymérisation

Les procédés de polymérisation continus sont préférés aux procédés discontinus chaque fois que la quantité de polymère à produire le justifie. Par exemple, les différents types de polyéthylène sont fabriqués par des procédés continus, alors que certains polymères haute performance ainsi que tous les polymères à haute valeur ajoutée sont obtenus par des procédés discontinus.

Quel que soit le type de polymérisation, polyaddition ou polycondensation, la synthèse industrielle des polymères est effectuée selon quatre méthodes principales connues sous les noms de polymérisation **en masse**, **en solution**, **en suspension** et **en émulsion**.

Les procédés de polymérisation en masse et en solution sont très souvent monophasiques, alors que ceux en suspension et en émulsion sont polyphasiques.

5.6.1 Polymérisation en masse

Les caractéristiques de la polymérisation en masse sont les suivantes :

- › La réaction a lieu en milieu homogène à une température élevée et suffisante pour que les monomères et le polymère soient à l'état liquide.
- › Le temps de la réaction est élevé (calculable en heures).
- › La conduite de la réaction à une température élevée favorise une meilleure élimination des sous-produits légers et accélère la réaction.
- › Le produit de la réaction est un polymère de masse moléculaire élevée qui présente de bonnes propriétés mécaniques, mais le dégagement d'énergie associée à la polymérisation rend difficile le contrôle du réacteur quand il s'agit de grandes quantités de monomère.

- › Selon la solubilité du polymère dans son propre monomère, la polymérisation aura lieu en phase homogène ou hétérogène. Si le polymère est soluble dans le monomère, le milieu reste homogène, mais sa viscosité croît au fil de la progression de la réaction.
- › Pour un meilleur contrôle du dégagement thermique et du degré de polymérisation, la polymérisation en masse est généralement effectuée en deux étapes.

Si on prend l'exemple de la **polymérisation radicalaire en masse du styrène** (figure 5.11), on peut remarquer ces deux étapes :

- 1) On effectue la **prépolymérisation** du styrène dans un réacteur agité. Cette étape est amorcée par l'ajout de traces d'oxygène et s'effectue sous azote, à une température de 80 °C pour conduire à la création d'un liquide visqueux composé d'environ 35 % de polystyrène.
- 2) Le sirop de prépolymère passe dans une tour de polymérisation, toujours sous azote, où la température varie à la hausse et à la baisse de façon graduelle, de 100 à 200 °C. Le styrène n'ayant pas réagi est éliminé du réacteur et de la tour, condensé puis recyclé.

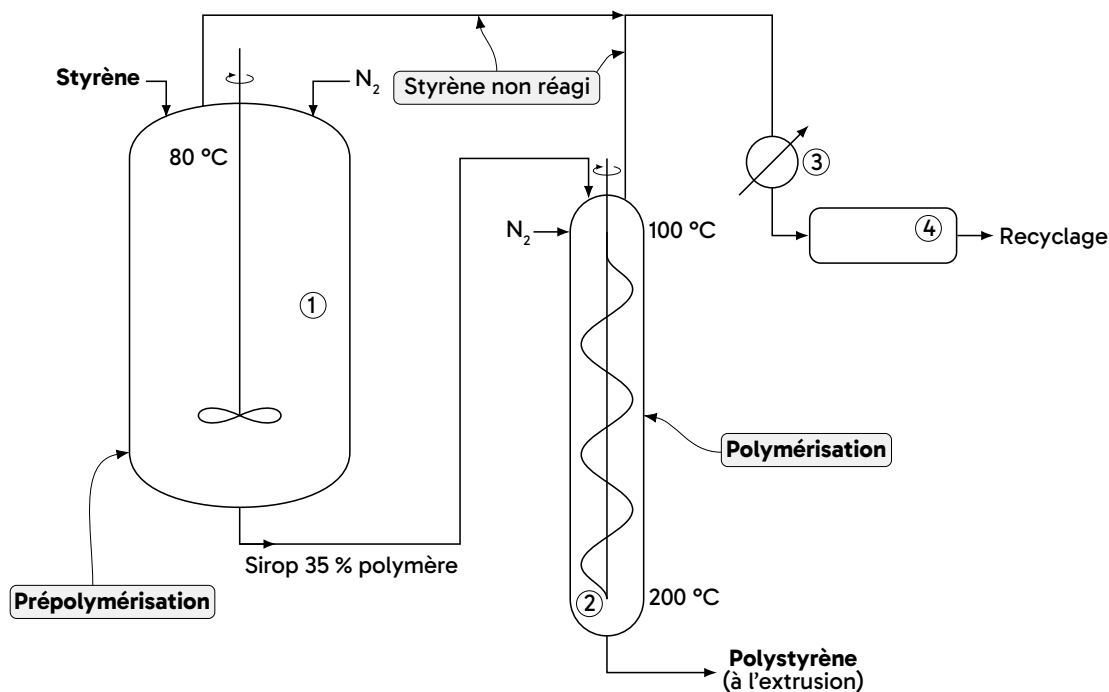


Figure 5.11 Schéma d'une installation industrielle de polymérisation en masse du styrène
 (1 = réacteur de prépolymérisation; 2 = tour de polymérisation;
 3 = condenseur-réfrigérant; 4 = réservoir de stockage)

5.6.2 Polymérisation en solution

L'emploi d'un solvant permet une meilleure dissipation de la chaleur produite par la réaction. En polycondensation, le mélange de départ est constitué des précurseurs, du ou des catalyseurs et d'un solvant ou d'un mélange de solvants. Selon la solubilité des monomères, du polymère et du catalyseur, la réaction se déroule en phase homogène ou hétérogène. Si les précurseurs sont répartis dans deux phases non miscibles, la réaction se produit à la surface de séparation des deux phases. La polycondensation est alors dite « interfaciale ». Ce type de polycondensation est très rapide, mais cette méthode n'est applicable que pour des monomères très réactifs, généralement chers. Comme il est généralement difficile d'éliminer totalement le solvant du polymère, les équipements à prévoir sont complexes et onéreux. Le prix élevé des monomères réactifs et des équipements a rendu cette méthode peu utilisable à l'échelle industrielle.

À ce niveau, la polymérisation en solution s'applique presque exclusivement à la fabrication du nylon 6,6, à l'interface d'une solution organique de dichlorure d'adipoyl et d'une solution aqueuse de diaminohexane. Des crochets mobiles permettent d'en retirer le nylon sous la forme d'un fil au fur et à mesure qu'il est produit. L'équation de cette synthèse est présentée à la [figure 5.12](#).

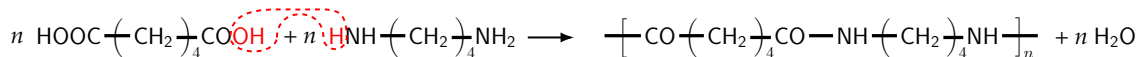


Figure 5.12 Équation de la synthèse du nylon 6,6

5.6.3 Polymérisation en suspension (ou en perles)

La polymérisation en suspension est essentiellement utilisée dans le cas des polyadditions radicalaires. De nombreux monomères peuvent être polymérisés au moyen de cette technique : le styrène, le méthacrylate de méthyle, l'acétate de vinyle, l'acrylonitrile, le chlorure de vinyle, etc.

Un schéma de l'installation industrielle de polymérisation en suspension du styrène est présenté à la [figure 5.13](#). Dans le réacteur agité (1), le monomère est dispersé dans un liquide (l'eau, en général) immiscible, c'est-à-dire qui ne peut se mélanger avec le monomère et le polymère. Le monomère forme une suspension de gouttelettes dont le diamètre varie entre 10 et 100 μm . Dans ce mélange réactionnel constitué de 10 à 25 % de monomère, on ajoute un amorceur qui n'est soluble que dans le monomère. Chaque gouttelette de la suspension se comporte donc comme un système isolé de réaction en masse; le diluant, l'eau, permet seulement un bon transfert de la chaleur de réaction. La viscosité de la réaction varie peu avec la conversion. Pour éviter l'agglomération des gouttelettes en cours de processus, on ajoute des agents de suspension hydrosolubles tels que l'alcool polyvinylique et on maintient une vive agitation mécanique. À la fin du cycle de polymérisation, les particules de polymères se retrouvent sous forme de perles d'un diamètre de 1 000 μm . Les particules de polystyrène sont ensuite lavées dans une tour de lavage à l'eau (2), séparées des réactifs non réagis avec une centrifugeuse continue (3) et séchées dans un séchoir rotatif (4) avant d'être entreposées dans un réservoir de stockage (5).

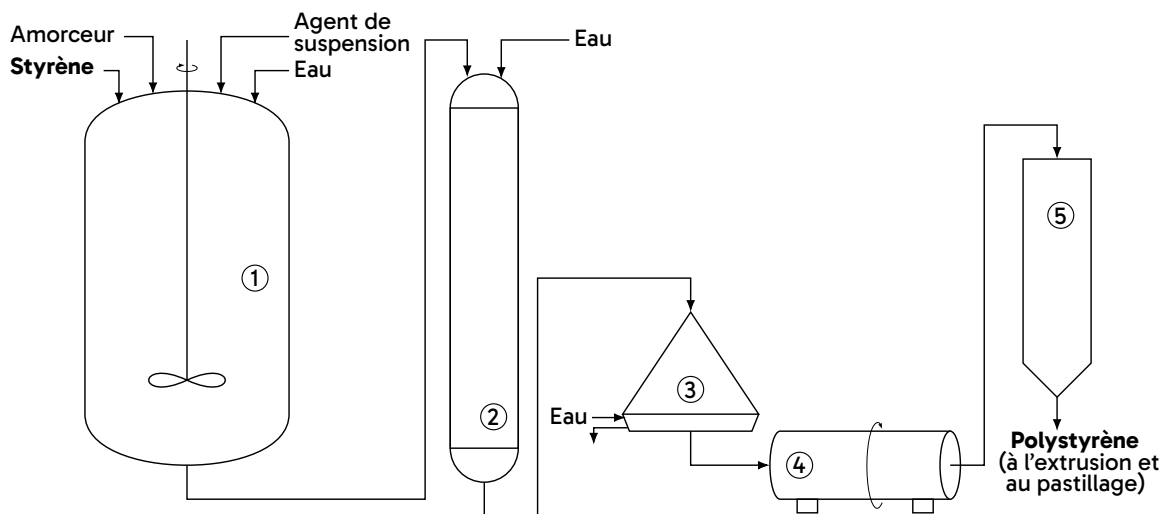


Figure 5.13 Schéma d'une installation industrielle de polymérisation du styrène en suspension
 (1 = réacteur de polymérisation; 2 = tour de lavage à l'eau; 3 = centrifugeuse continue;
 4 = séchoir rotatif; 5 = réservoir fermé de stockage)

5.6.4 Polymérisation en émulsion

Ce procédé est surtout utilisé dans le cas des réactions de polyaddition, mais il sert à produire de nombreux polymères, et plus particulièrement le polychlorure de vinyle (figure 5.14, à la page suivante).

Les caractéristiques d'une polymérisation en émulsion peuvent être résumées comme suit :

- › L'eau est généralement utilisée comme milieu dispersant.
- › L'amorceur est soluble dans l'eau, et non dans le monomère comme pour la polymérisation en suspension. Il est mélangé à l'eau dans le réacteur (1) et il peut être sous forme de peroxyde d'hydrogène, de persulfates, de perborates ou de composés redox.
- › Le monomère est généralement insoluble ou peu soluble dans l'eau. Pour cette raison, le monomère doit être émulsionné avec des agents émulsionnants comme les savons alcalins, l'huile ou les alcools gras sulfonés (préalablement mélangés dans le réacteur 2 avec de l'eau). Une agitation vigoureuse dans le réacteur de polymérisation (3) aide également à maintenir les monomères sous forme d'émulsion micellaire.
- › Les molécules de savon sont constituées d'une partie hydrophile (qui aime l'eau) et d'une partie hydrophobe (qui n'aime pas l'eau). Les chaînes de savon s'orienteront de manière que la partie hydrophile soit dans l'eau, et les parties hydrophobes s'approcheront les unes des autres afin de minimiser le contact avec l'eau; elles formeront donc des micelles. Le monomère étant généralement un composé hydrophobe, il se retrouvera à l'intérieur des micelles de savon et les fera gonfler.

- › Une faible fraction du monomère peut être dissoute dans l'eau, tandis que la majeure partie se retrouve sous forme de gouttelettes de grande dimension (diamètre de 100 μm). En raison de leur plus grand nombre, les micelles présentent une surface spécifique beaucoup plus grande que celle des gouttelettes. Les radicaux libres générés par l'amorceur dans la phase aqueuse ont des chances plus élevées d'être capturés par une micelle plutôt que par les gouttelettes. L'amorçage de la polymérisation se produit donc au niveau de la micelle, qui s'enrichit en polymère au détriment des gouttelettes « réservoirs », qui diminuent de taille au fur et à mesure de la progression de la réaction. La vitesse de polymérisation demeure élevée tant que les monomères des gouttelettes n'ont pas complètement diffusé vers les micelles. Quand toutes les gouttelettes ont disparu, la vitesse de réaction décroît, mais la polymérisation se poursuit jusqu'à ce que tout le monomère contenu dans les micelles ait été converti.
- › À la fin de la réaction, le polymère se présente sous la forme d'une émulsion stable de fines particules (latex) qui peut être utilisée telle quelle ou précipitée dans un soluté. La précipitation produit un mélange solide-liquide (S-L). Le polymère solide est récupéré du mélange S-L à l'aide d'un séparateur de phases (4) pour ensuite être lavé (5) et séché (6) avant d'être envoyé au broyage et au tamisage.
- › Avec ce procédé, il est difficile d'obtenir des polymères purs en raison de la contamination par l'agent émulsifiant, qui peut également entraîner une coloration variable du polymère.

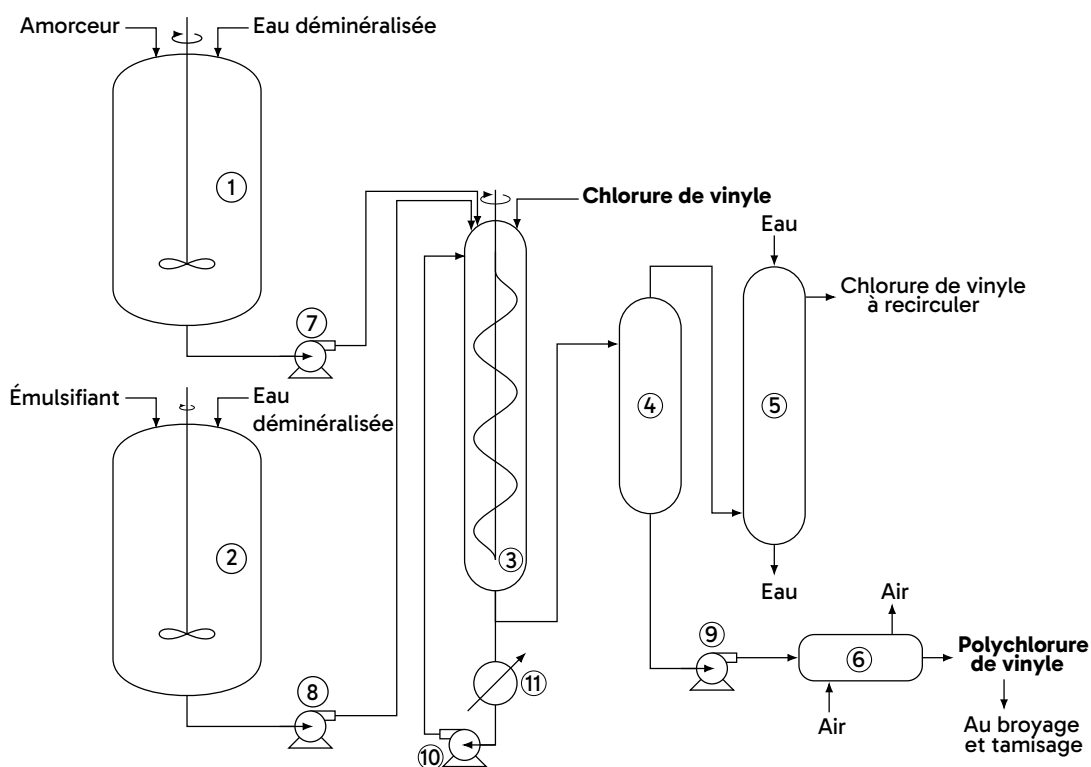


Figure 5.14 Polymérisation du chlorure de vinyle en émulsion (1 = dispositif de mise en solution; 2 = dispositif d'homogénéisation; 3 = réacteur de polymérisation; 4 = séparateur liquide-liquide; 5 = dispositif de lavage; 6 = dispositif de séchage; 7, 8, 9 et 10 = pompes; 11 = appareil de chauffage)

La copolymérisation en émulsion est bien adaptée aux monomères : styrène butadiène, styrène-acrylonitrile, acrylonitrile butadiène styrène, acétate de vinyle, acétate de méthyle, acrylates et méthacrylates.

5.7 Techniques de mise en forme des matières plastiques

Les polymères industriels sont rarement utilisés à l'état « pur », car ils n'ont pas les propriétés requises pour les applications auxquelles ils sont destinés. Pour adapter leurs propriétés à l'utilisation souhaitée ou abaisser leur coût de revient, les polymères sont mélangés à de nombreux adjuvants, miscibles ou non dans la matrice polymère. La formulation typique d'une matière plastique prend la forme suivante :

Matière plastique = Polymère de base + Plastifiant(s) + Stabilisants + Charges

5.7.1 Adjuvants

Les adjuvants sont de plusieurs types et ils jouent un rôle spécifique qui varie en fonction de la quantité incorporée. Ceux que l'on mélange aux polymères pour modifier leurs propriétés physiques s'appellent « plastifiants » et ceux qui améliorent leurs propriétés chimiques se nomment « stabilisants ». Quel que soit le type d'adjuvant envisagé, on doit tenir compte de certaines caractéristiques avant de le mélanger avec les polymères :

- › Sa performance propre
- › Le rapport performance/prix
- › Sa compatibilité avec la mise en œuvre du polymère (thermostabilité)
- › Sa résistance à la migration ou sa tenue à long terme
- › Sa non-toxicité en vue de sa compatibilité avec l'usage prévu pour le produit fini

5.7.2 Plastifiants

Un plastifiant est un solvant lourd qui a le rôle de diminuer la rigidité d'un polymère. Lorsqu'il est incorporé aux polymères, il détruit en partie les interactions entre les chaînes qui sont responsables de la cohésion mécanique, et transformera donc un matériau initialement rigide en un matériau souple, flexible. Il ne détruit pas toutes les interactions : celles qui confèrent au polymère une structure de réseau tridimensionnel limitant le glissement des chaînes les unes par rapport aux autres sont conservées (figure 5.15).

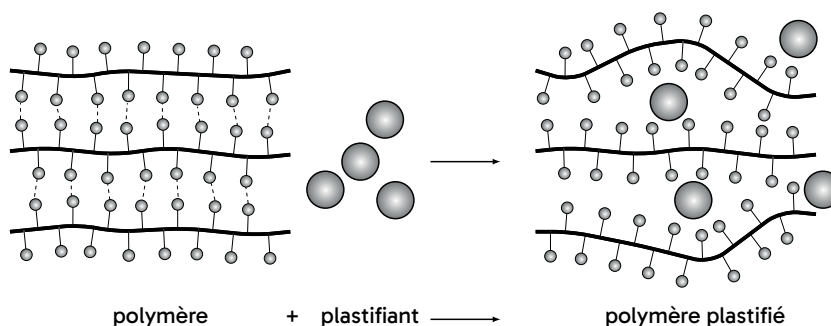


Figure 5.15 Caractéristiques d'un plastifiant

La rigidité d'un polymère diminue avec la concentration en plastifiant ajouté, de même que la transition vitreuse et la température de fragilité. Les performances thermomécaniques dépendent de la nature aliphatique ou aromatique de la molécule du plastifiant ajouté. Les molécules aliphatiques ont une grande efficacité à court terme et à basse température, alors que les aromatiques sont meilleures à long terme et à température élevée. Des mélanges de plastifiants peuvent constituer un compromis intéressant.

5.7.3 Stabilisants

Les stabilisants sont destinés à ralentir ou à inhiber les processus responsables de l'altération de la structure d'un polymère pendant sa mise en œuvre ou pendant son utilisation. On utilise fréquemment des mélanges de stabilisants qui agissent en synergie. Quelques exemples de stabilisants et de leurs propriétés sont présentés de manière non exhaustive dans le **tableau 5.11**.

Tableau 5.11 Quelques exemples de stabilisants de polymères commerciaux

Stabilisant	Rôle	Concentration	Exemples
Antioxydant	Retarde l'oxydation thermique	< 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Noirs de carbone • Amines • Phénols
Lumière	Empêche la dégradation due aux rayonnements UV	< 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Pigments • Absorbants UV • Extincteurs • Stabilisants polyfonctionnels
Thermique du PVC	Retarde le dégagement du HCl et la formation des structures très colorées	1 – 2 %	<ul style="list-style-type: none"> • Stéarate de calcium • Stéarate de baryum • Stéarate de plomb

Charges

Les charges (renforts) sont des produits ni solubles ni miscibles qui, mélangés à un polymère, permettent d'améliorer une ou plusieurs de ses propriétés, qu'elles soient mécaniques, électriques, chimiques, etc. Les caractéristiques des charges sont les suivantes :

- › Selon leur nature chimique, elles peuvent être organiques (fibres de carbone, noirs de carbone, graphite) ou minérales (verre, talc, mica, etc.).
- › Selon leur géométrie, elles peuvent être classifiées en quatre classes : granulaires (sphériques), lamellaires, aciculaires (semblables à des aiguilles) et fibrillaires.
- › Leur ajout augmente la rigidité et l'adhésivité des matières plastiques; il agit également sur leur résistance chimique ainsi que leur comportement thermique et électrique.
- › Leur proportion dans la masse de la matière plastique peut varier de 1 à 300 %, selon l'effet voulu.
- › L'avantage majeur de l'addition de charges à une matière plastique est économique, car elles sont moins chères que les polymères.

Plusieurs autres additifs ([tableau 5.12](#)) peuvent être incorporés aux polymères pour améliorer ou adapter plus finement leurs propriétés à l'utilisation souhaitée.

Tableau 5.12 Types d'additifs incorporés aux matières plastiques ainsi que leur rôle

Type d'additif	Rôles
Lubrifiant	<ul style="list-style-type: none"> Facilite la mise en œuvre des polymères et réduit leur adhérence aux parois des machines de transformation. Améliore les propriétés de glissement et empêche l'usure des matières plastiques.
Colorant et pigment	<ul style="list-style-type: none"> Permet de colorer les matières plastiques, qui sont généralement incolores à l'état pur. Change certaines propriétés en se comportant comme une charge.
Antichoc	<ul style="list-style-type: none"> Améliore la résistance au choc du polymère auquel il est incorporé.
Agents antistatiques	<ul style="list-style-type: none"> Permet de limiter, à la surface des matières plastiques, l'accumulation de charges électriques qui sont indésirables, car elles permettent la fixation de poussières et la production d'étincelles.
Ignifugeant	<ul style="list-style-type: none"> Permet aux matières plastiques de mieux résister au feu (particulièrement dans les domaines de la construction et de l'aménagement intérieur).

La matière plastique première utilisée, lors de sa mise en forme, peut être livrée sous l'une des formes suivantes :

- › Granulés
- › Poudre
- › Résine (liquide visqueux)
- › Semi-produits (feuilles, films, pastilles, fibres)

Il existe de nombreux procédés de mise en forme des matières plastiques. Le choix dépend de la nature du polymère (thermoplastique ou thermodurcissable) et de la forme finale souhaitée. Les thermoplastiques peuvent être mis en forme par : refroidissement dans (ou contre) un moule d'une matière rendue liquide ou pâteuse par chauffage, usinage, collage, soudage.

Le moulage des thermodurcissables est fait presque exclusivement par réaction chimique entre différents constituants pour aboutir à une structure moléculaire tridimensionnelle finale.

Les techniques utilisées dans l'industrie pour effectuer la mise en forme des thermoplastiques et des thermodurcissables sont résumées dans le [tableau 5.13](#), à la page suivante.

Tableau 5.13 Techniques de mise en forme des matières plastiques

Thermoplastiques		
Solides	Liquides et pâtes	Semi-produits
Extrusion	Calandrage	Estampage
Injection	Injection	Soudage
Rotomoulage	Rotomoulage	Thermoformage
		Usinage

Thermodurcissables		
Solides	Liquides et pâtes	Semi-produits
Compression	Injection	Collage
Transfert	Coulée	Formage à chaud
		Usinage

Parmi les techniques de mise en forme énumérées dans le **tableau 5.13**, nous présenterons en détail dans le **tableau 5.14** seulement les plus utilisées dans le domaine de la plasturgie.

Tableau 5.14 Description de quelques techniques de mise en forme de matières plastiques

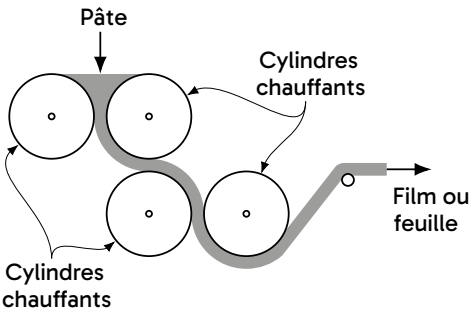
Technique	Schémas de principe et caractéristiques
Calandrage	 <p style="text-align: center;">Schéma de principe d'une calandre</p> <p>Principe de la technique : La matière, sous forme de liquide ou de pâte, est chauffée et laminée entre deux ou plusieurs paires de rouleaux chauffés disposés en parallèle, jusqu'à ce qu'elle forme une feuille continue de l'épaisseur désirée. Les produits obtenus par calandrage se présentent le plus souvent sous la forme de films et de feuilles minces, mais dans certains cas, leur épaisseur peut leur valoir l'appellation de « plaques ».</p> <p>Inconvénient : Technique adaptée seulement aux matières liquides ou pâteuses</p>

Tableau 5.14 Description de quelques techniques de mise en forme de matières plastiques (*suite*)

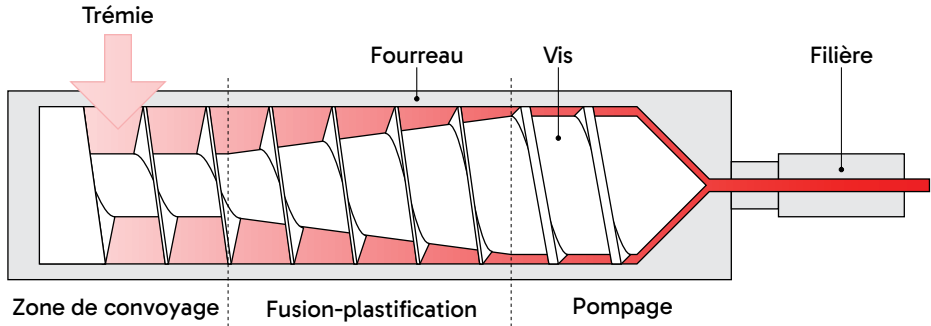
Technique	Schémas de principe et caractéristiques	
Extrusion	 <p style="text-align: center;">Schéma de principe d'une extrudeuse monovis</p>	
	<p>Principe de la technique : La matière solide, sous forme de granulés, est introduite dans une zone de convoyage à l'aide d'une trémie d'alimentation, puis transportée par l'intermédiaire d'une vis sans fin (vis d'Archimède) dans un cylindre chauffant (zone de fusion-plastification). À l'avant du cylindre (zone de pompage), le diamètre de la vis augmente, ce qui aboutit à la mise sous pression du polymère ramolli avant qu'il soit envoyé dans la filière externe à l'extrudeuse. La résine fondue est poussée à travers cette filière pour conférer à la masse plastifiée la forme finale désirée.</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forte productivité • Coût minimal par produit • Coût relativement bas de l'équipement • Technique adaptée à une large gamme de thermoplastiques </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Inconvénient</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique limitée aux profils linéaires </td> </tr> </table>	<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forte productivité • Coût minimal par produit • Coût relativement bas de l'équipement • Technique adaptée à une large gamme de thermoplastiques
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forte productivité • Coût minimal par produit • Coût relativement bas de l'équipement • Technique adaptée à une large gamme de thermoplastiques 	<p>Inconvénient</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique limitée aux profils linéaires 	



Tableau 5.14 Description de quelques techniques de mise en forme de matières plastiques (suite)

Technique	Schémas de principe et caractéristiques		
<p>Injection</p>	<div data-bbox="551 324 1178 830" style="text-align: center;"> <p>The diagram shows a circular sequence of five stages in an injection molding process. 1. Démarrage: The barrel is filled with plastic granules. 2. Injection: The granules are pushed forward by the rotating screw. 3. Maintien Refroidissement: The screw continues to rotate while the plastic in the mold cavity cools and solidifies. 4. Dosage: The screw stops rotating and the plastic is precisely dosed. 5. Démoulage: The mold opens and the finished part is ejected.</p> </div> <div data-bbox="400 850 1324 898" style="text-align: center; background-color: #e0e0e0; padding: 5px;"> <p>Schéma de principe d'une presse à injection et étapes d'un cycle d'injection</p> </div> <p>Principe de la technique : La matière solide, sous forme de granulés, est acheminée à l'avant de la vis de plastification et donne une réserve de matière prête à être injectée (phase de dosage). Cette phase se fait en parallèle de la phase de maintien et elle consiste à alimenter le moule malgré le fait qu'il soit rempli. Cette alimentation est nécessaire afin de pallier le retrait de la matière durant le refroidissement.</p> <p>L'injection dynamique consiste à envoyer sous pression la matière à l'avant de la vis de plastification dans un moule fermé et relativement froid, où elle se solidifie durant quelques secondes. Le moule, installé sur la presse, est constitué de deux pièces (l'une fixe et l'autre mobile) qui sont pressées l'une contre l'autre tout au long du moulage et qui s'écartent après le refroidissement pour permettre l'éjection de la pièce moulée.</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cadence élevée de production • Tolérances précises • Moulage de pièces complexes • Coût minimal par pièce • Procédé pouvant être automatisé • Technique adaptée à une large gamme de thermoplastiques </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique adaptée seulement aux petites ou moyennes pièces • Long délai de fabrication des moules • Coût élevé de l'équipement </td> </tr> </table>	<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cadence élevée de production • Tolérances précises • Moulage de pièces complexes • Coût minimal par pièce • Procédé pouvant être automatisé • Technique adaptée à une large gamme de thermoplastiques 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique adaptée seulement aux petites ou moyennes pièces • Long délai de fabrication des moules • Coût élevé de l'équipement
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cadence élevée de production • Tolérances précises • Moulage de pièces complexes • Coût minimal par pièce • Procédé pouvant être automatisé • Technique adaptée à une large gamme de thermoplastiques 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique adaptée seulement aux petites ou moyennes pièces • Long délai de fabrication des moules • Coût élevé de l'équipement 		

Tableau 5.14 Description de quelques techniques de mise en forme de matières plastiques (suite)

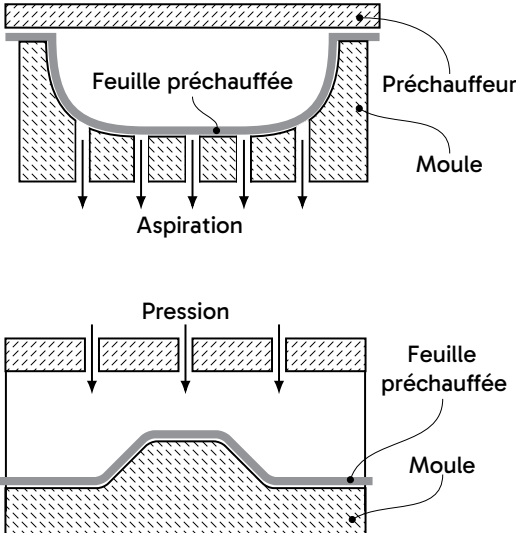
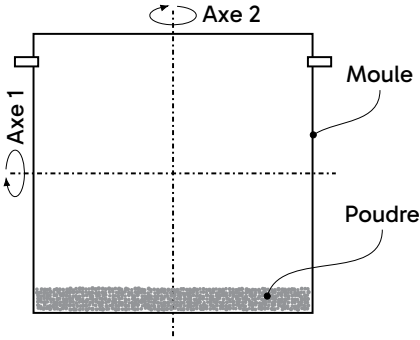
Technique	Schémas de principe et caractéristiques
Thermoformage	
	<p>Schéma de principe d'un équipement de thermoformage</p>
<p>Principe de la technique : Cette technique de moulage s'emploie avec des feuilles de plastique individuelles ou sous forme de film en rouleau. Elle peut être réalisée sous vide ou sous pression. Dans le cas de la méthode sous vide, la feuille, préchauffée jusqu'à son ramollissement, est fixée sur un moule, puis un vide est créé entre la feuille et le moule. La dépression permet à la feuille de prendre la forme du moule. Dans le cas de la méthode sous pression, la feuille est plaquée contre la paroi d'un moule fermé par la pression de l'air. De l'air est ensuite soufflé à l'intérieur du moule pour en décoller et en libérer la pièce.</p>	
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Outillage économique • Court délai de mise en production • Possibilité de mouler de très grandes surfaces • Assez bonne productivité 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contrôle d'une seule face • Nécessité d'utiliser un matériau en feuilles • Variation des épaisseurs • Nécessité d'une découpe après le moulage • Tolérances larges



Tableau 5.14 Description de quelques techniques de mise en forme de matières plastiques (suite)

Technique	Schémas de principe et caractéristiques		
Rotomoulage	 <p style="text-align: center;">Schéma de principe d'un équipement de rotomoulage</p> <p>Principe de fonctionnement : Le rotomoulage est une technique de moulage adaptée à la fabrication de moyennes ou de grandes pièces creuses, produites en séries limitées. La matière, sous forme de poudre ou de liquide, est placée dans un moule chauffé qui tourne autour de deux axes perpendiculaires. Elle se répartit uniformément sur la surface du moule sous l'effet de la rotation et durcit par refroidissement.</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Outillage économique • Bon contrôle des épaisseurs • Technique bien adaptée aux pièces creuses • Technique bien adaptée aux pièces asymétriques </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible cadence de production • Contrôle d'une seule face de la pièce • Tolérance large • Coût moyennement élevé par pièce </td> </tr> </table>	<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Outillage économique • Bon contrôle des épaisseurs • Technique bien adaptée aux pièces creuses • Technique bien adaptée aux pièces asymétriques 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible cadence de production • Contrôle d'une seule face de la pièce • Tolérance large • Coût moyennement élevé par pièce
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Outillage économique • Bon contrôle des épaisseurs • Technique bien adaptée aux pièces creuses • Technique bien adaptée aux pièces asymétriques 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible cadence de production • Contrôle d'une seule face de la pièce • Tolérance large • Coût moyennement élevé par pièce 		
Coulée	<p>Principe de la technique : Un polymère liquide thermdurçissable est coulé dans un moule. Le durcissement du polymère est provoqué à l'aide d'un catalyseur ou de la chaleur (ou les deux à la fois).</p>		
Compression	<p>Principe de la technique : La compression consiste à presser un polymère thermdurçissable partiellement polymérisé, sous forme de poudre ou de pastille, dans la cavité d'un moule ouvert qui est chauffé. Après la fermeture du moule, une pression est appliquée. La chaleur complète la polymérisation. Le temps de cuisson dépend du type de polymère et de l'épaisseur de l'objet moulé.</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <p>Avantage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique qui convient aux polymères thermdurçissables fournis sous forme de poudre ou de flocons : polyimides, polyuréthanes, polyesters, etc. </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cycle de production long • Impossibilité pour les gaz qui se dégagent durant le durcissement de s'échapper de la surface (ils restent emprisonnés dans l'objet) </td> </tr> </table>	<p>Avantage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique qui convient aux polymères thermdurçissables fournis sous forme de poudre ou de flocons : polyimides, polyuréthanes, polyesters, etc. 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cycle de production long • Impossibilité pour les gaz qui se dégagent durant le durcissement de s'échapper de la surface (ils restent emprisonnés dans l'objet)
<p>Avantage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique qui convient aux polymères thermdurçissables fournis sous forme de poudre ou de flocons : polyimides, polyuréthanes, polyesters, etc. 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cycle de production long • Impossibilité pour les gaz qui se dégagent durant le durcissement de s'échapper de la surface (ils restent emprisonnés dans l'objet) 		
Transfert	<p>Principe de la technique : Un polymère thermdurçissable est préchauffé dans un pot de transfert situé à l'extérieur du moule, jusqu'à la plastification. Il est ensuite forcé à travers une buse dans un moule fermé et chauffé à une température contrôlée, où se complète la polymérisation.</p>		

5.8 Recyclage et valorisation des matières plastiques

Même si elles offrent beaucoup d'avantages pour la fabrication d'objets de toutes sortes, les matières plastiques ont une durée de vie plus ou moins éphémère. Elles se retrouvent donc en quantité sans cesse croissante au stade de déchets (ménagers et industriels) et ont des effets néfastes sur l'environnement, la biodiversité et la santé. Depuis de nombreuses années, l'humanité cherche sans relâche des solutions pour diminuer les gisements de déchets de plastique. Donner une deuxième vie aux matières plastiques grâce au recyclage et à la valorisation est la solution de compromis adoptée dans ce contexte. Il faut garder à l'esprit que la réutilisation des matières plastiques est la solution à zéro coût, et donc celle à privilégier.

5.8.1 Recyclage des thermoplastiques

Pour être efficace, le recyclage doit se faire avec des matières plastiques qui ne sont ni souillées ni contaminées, regroupées par types et par grades non mélangés. Autrement, il serait impossible de procéder au moulage en employant les moyens conventionnels. L'incompatibilité entre les différents types de thermoplastiques peut conduire, au moulage, à des matières hétérogènes qui possèdent des propriétés faibles et qui ne sont donc pas économiquement viables.

Pour les déchets plastiques provenant de la consommation ménagère, le recyclage se trouve alourdi, car ces déchets sont souillés et mélangés avec d'autres produits recyclables. Le processus de recyclage dans ce cas consiste à :

- › collecter et trier tous les produits recyclables en les séparant par catégories : métal, verre, plastique, etc.;
- › détecter la composition des déchets de plastique grâce aux rayons UV et les séparer par grade et par type;
- › nettoyer les plastiques usagés et les acheminer au bon endroit pour qu'ils soient remoulés.

Afin de faciliter le recyclage, la plasturgie a adopté en 1988 un code de classification de 1 à 7 pour identifier les différents types de plastiques. Dans le [tableau 5.15](#), à la page suivante, on présente les sept codes, les matières plastiques correspondantes ainsi que leurs principaux usages et les possibilités de recyclage.

5.8.2 Valorisation des matières plastiques

La plasturgie a mis au point, au fil des années, trois voies de valorisation :

- › Mécanique
- › Énergétique
- › Chimique

Valorisation mécanique

Pour les déchets industriels, composés uniquement de thermoplastiques et provenant directement de la production et de la transformation, donc propres, le recyclage est facile et employé depuis longtemps par les mouleurs. Les pièces non conformes ainsi que le surplus de fabrication et de découpage sont granulés par les mouleurs et mélangés au nouveau plastique.

Tableau 5.15 Codes de classification, abréviations, principaux usages et possibilité de recyclage des matières plastiques

Symbole	Signification	Principaux usages	Possibilités de recyclage
	Polyéthylène téréphtalate	<ul style="list-style-type: none"> • Bouteilles d'eau et de boissons gazeuses • Contenants pour micro-ondes • Emballages pour médicaments 	Recyclable pour produire : bouteilles de boissons, tapis, vêtements, pinceaux, plateaux de repas, etc.
	Polyéthylène haute densité	<ul style="list-style-type: none"> • Bouteilles de lait ou de jus, produits ménagers • Caisses 	Recyclable pour produire : bouteilles, sacs à poubelles, tuyaux, équipements de terrains de jeux, etc.
	Polychlorure de vinyle	<ul style="list-style-type: none"> • Tuyauterie • Bouteilles alimentaires • Pellicule moulante • Jouets souples pour enfants 	Recyclable pour produire : tuyaux, matériaux de construction, bouteilles non alimentaires, grillages, etc.
	Polyéthylène basse densité	<ul style="list-style-type: none"> • Bâches de protection • Barquettes • Film alimentaire • Film à bulles 	Recyclable pour produire : sacs et films plastiques
	Polypropylène	<ul style="list-style-type: none"> • Bacs de rangement • Barquettes • Cordages • Classeurs 	Recyclable pour produire : plateaux de cafétéria, pièces d'automobiles, tapis et fibres géotextiles, etc.
	Polystyrène	<ul style="list-style-type: none"> • Isolants thermiques • Emballages alimentaires • Ustensiles 	Pas recyclable au Québec
	Autres plastiques	<ul style="list-style-type: none"> • Contenants alimentaires • Bouteilles de sport • DVD • Revêtements de conserves 	Recyclable pour produire : équipement électronique et accessoires automobiles

Valorisation énergétique

Cette voie de valorisation consiste à incinérer les déchets de plastique en récupérant le contenu énergétique qu'ils contiennent. Le **pouvoir calorifique inférieur (PCI)** est défini comme étant la quantité d'énergie libérée par la combustion d'un kilogramme de matière. Le gain calorifique net est défini comme la différence entre le pouvoir calorifique inférieur et l'énergie nécessaire à la combustion. Les deux types d'énergie sont rapportés dans le **tableau 5.16**, pour quelques matières plastiques courantes.

Les matières plastiques présentent un PCI élevé (comparable à celui du pétrole) et leur combustion permet de récupérer une quantité d'énergie valorisable pour effectuer le chauffage urbain ou industriel (dans les cimenteries énergivores).

Tableau 5.16 Pouvoir calorifique inférieur et gain calorifique net de quelques matières plastiques

Produit	PCI (MJ/kg)	Gain calorifique net (MJ/kg)
Polyéthylène	43	22
Polypropylène	44	24
Polystyrène	40	22
Polychlorure de vinyle	17	9
Polyéthylène téréphtalate	22	12

Valorisation chimique

Cette voie de valorisation cherche à « casser » les polymères en petites molécules, de préférence en monomères, réutilisables pour effectuer d'autres polymérisations. Cette dépolymérisation industrielle peut s'effectuer par **solvololyse** ou par **pyrolyse**.

La **solvololyse** peut être appliquée aux polymères obtenus par polycondensation. Elle consiste à les dépolymériser à l'aide des réactions de glycolyse, de méthanolyse et d'hydrolyse. Cette méthode n'est pas très développée à l'échelle industrielle.

La **pyrolyse** est la décomposition thermique d'un polymère en l'absence d'oxygène (et d'air) à des températures situées entre 400 et 800 °C. Dans ces conditions contrôlées, la matière polymère ne brûle pas; elle se décompose en un mélange de ses produits pétrochimiques de départ (monomères et oligomères). Étant donné que ces produits peuvent être séparés et réutilisés et que la pyrolyse ne nécessite l'évacuation d'aucun effluent, il s'agit d'une valorisation particulièrement favorable pour l'environnement.

À l'exception du PVC, en raison du HCl dégagé, la pyrolyse convient à quasiment toutes les matières plastiques, même si celles-ci contiennent jusqu'à 20 % d'impuretés. Les résultats typiques obtenus par plusieurs industriels mondiaux ont montré que la valeur des produits de pyrolyse est supérieure à celle de l'énergie obtenue par incinération. La pyrolyse produit en moyenne 2 500 m³ de gaz valorisable par tonne de déchets à 500 °C, contre 5 500 m³ de fumée par tonne de déchets à 900 °C pour l'incinération.

Même si actuellement le nombre de procédés industriels de pyrolyse en exploitation est limité, on peut citer les technologies japonaises (Mitsui Zozen, Ebara, Pyrox), françaises (Pillard, CPM, SOFTER, EDDITH), canadienne (Pyrovac), américaines (ECO2, Purox), allemandes (VTA, SFW-Funk), etc. Au moment d'écrire ces lignes, l'entreprise Pyrovac, en Beauce, est passée à un volume industriel en transformant par pyrolyse le polyéthylène et le polypropylène en huiles et en coupe-carburant (diesel, kérosène, essence).

En Allemagne, il existe une installation de pyrolyse à lit fluidisé (figure 5.16) capable de traiter, par année, 8 000 tonnes de déchets de plastique et d'autres substances hydrocarbonées (p. ex. : le caoutchouc).

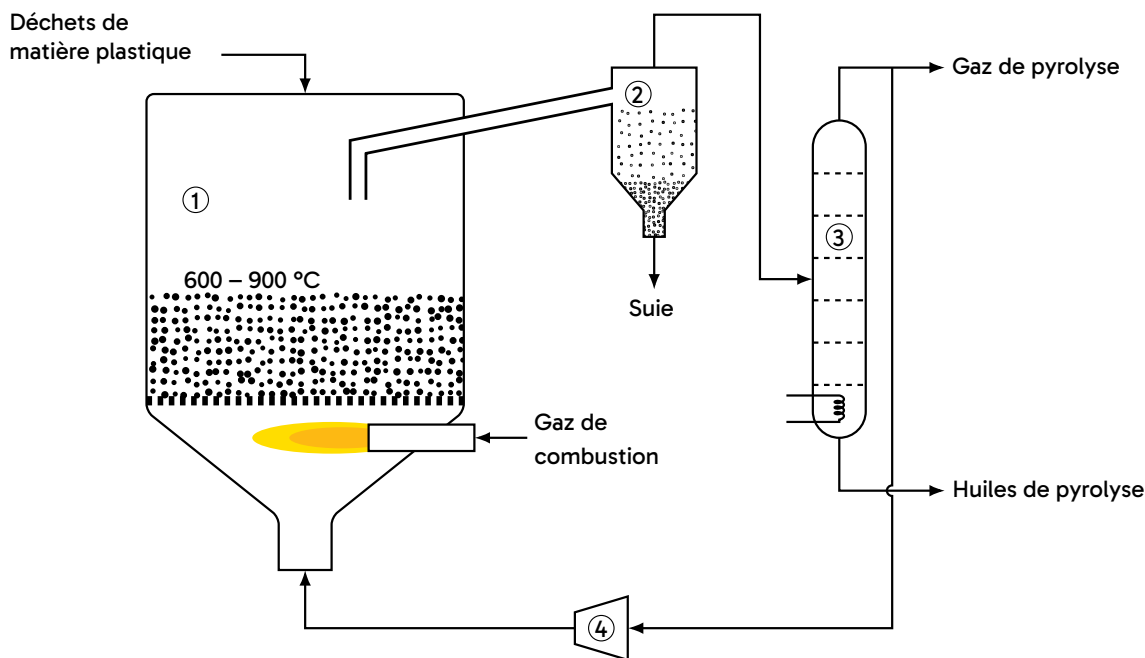


Figure 5.16 Schéma d'une installation de pyrolyse à lit fluidisé (1 = réacteur à lit fluidisé; 2 = cyclone; 3 = colonne de distillation; 4 = compresseur)

5.9 Notions de santé et de sécurité

La plasturgie, comme beaucoup d'autres industries, est tenue de respecter la législation concernant :

- › la toxicité et les conditions de travail dans les usines de transformation;
- › les risques d'incendie et d'explosion;
- › les risques liés à l'usage des produits finis.

5.9.1 Risques liés à la toxicité et aux conditions de travail dans les usines de transformation

La synthèse des polymères et la mise en œuvre des matières plastiques présentent de nombreux risques :

- › Par leur nature chimique, les polymères synthétiques ne présentent pas de toxicité intrinsèque, car ce sont des produits stables, à condition d'être correctement synthétisés et transformés.
- › Les monomères et presque tous les adjuvants qui sont mélangés aux polymères sont des composants hautement réactifs et ils sont, pour la plupart, volatils et toxiques.
- › Selon la technique de mise en œuvre des polymères, plusieurs phénomènes peuvent être observés : évaporation de solvants, dégagement de vapeurs de composés organiques volatils (COV) à chaud, formation de poussières à la suite du mélange et du broyage des polymères, formation d'électricité statique, etc.
- › Selon la nature chimique de ces divers produits, les vapeurs qui en émanent peuvent provoquer :
 - une irritation superficielle des yeux, de la peau ou des voies respiratoires;
 - des troubles nerveux variés, plus ou moins graves, réversibles ou irréversibles;
 - des troubles digestifs, respiratoires, sanguins, cancéreux, mutagènes ou mortels.
- › La poussière provenant des matières plastiques peut avoir des effets toxiques, irritants ou sensibilisants. Dans certaines conditions, ces matières plastiques, lorsqu'elles sont mélangées avec l'air, peuvent former des aérosols explosifs. Ce phénomène est plus susceptible de se produire dans les appareils fermés que dans l'atmosphère d'une usine.
- › L'électricité statique est due au fait que les polymères sont isolants et qu'ils peuvent se charger d'électricité par malaxage, séparation ou frottement. Lorsque les poussières et les vapeurs de solvants sont présents, l'électricité statique peut produire des étincelles plus ou moins fortes et produire des incendies.

5.9.2 Risques liés à la toxicité des produits finis lors de leur usage

Dans le cas de certaines matières plastiques, il peut rester dans le produit final du monomère ou d'autres composants ayant des fonctions réactives si la polymérisation a été mal conduite ou si le mélange initial a été mal dosé. Lors de l'usage de ces matières plastiques, il y a un risque que ces monomères non réagis puissent migrer à la surface, contaminer le milieu et devenir nocifs. Si, dans les thermoplastiques, ces molécules réactives se trouvent en très faible quantité, de l'ordre des parties par million (ppm), ce n'est pas le cas des thermodurcissables, qui contiennent pratiquement toujours ce genre de molécules.

Pour prévenir ces effets néfastes sur la santé et la sécurité des travailleurs et des usagers, il existe plusieurs moyens de protection et prévention. En voici une énumération non exhaustive :

- › Éviter le contact cutané et l'inhalation des COV.
- › Manipuler les réactifs sous des hottes d'aspiration et porter le matériel de protection individuelle approprié.
- › Aspirer les vapeurs ou les poussières au plus près de leur source d'émission.
- › Ventiler suffisamment les locaux.
- › Porter attention au mélange accidentel de produits réactifs.
- › Supprimer les sources d'inflammation possibles.
- › Incorporer des agents antistatiques aux matières plastiques.
- › Former régulièrement le personnel relativement aux dangers liés aux manipulations qu'ils ont à effectuer.

5.10 Production industrielle

La production industrielle des matières plastiques doit se réaliser dans des conditions techniques, économiques et écologiques satisfaisantes, ce qui implique la maîtrise parfaite de plusieurs paramètres et aspects : composition du matériau, température, pression, vitesse de chauffage et de refroidissement, technique de mise en forme, etc.

Dans le cas des thermoplastiques, l'industriel dispose de poudres, de granulés ou de produits semi-finis sous forme de plaques ou de films. En fonction de la forme et de l'état du produit de départ et du produit fini, l'industriel choisira la technique la plus appropriée (voir la [section 5.7](#)).

Pour les thermodurcissables, la matière première est livrée sous forme d'oligomères, donc à l'état de polymérisation partielle. Pour achever la polymérisation, l'industriel utilisera soit un catalyseur, soit un accélérateur ou la chaleur. Le démoulage de l'objet s'effectue quand la polymérisation est déjà avancée ou terminée pour que l'objet puisse conserver les propriétés souhaitées.

Puisque les matières plastiques ont envahi tous les domaines d'utilisation et que la variété des produits offerts est trop grande pour qu'ils soient tous présentés dans ce manuel, nous nous limiterons dans cette section ([tableau 5.17](#)) aux productions industrielles les plus représentatives.

Les **polymères à cristaux liquides (PCL)** et les **polymères super absorbants** sont deux catégories à part de matériaux plastiques qui ont été mises au point grâce aux efforts de recherche et de développement déployés par le domaine de la plasturgie.

Les PCL sont des polymères de haute performance dont les molécules s'orientent à volonté grâce à la polarisation de la lumière. Les applications types des PCL sont les suivants : composants électriques et électroniques, capteurs, barrières pour carburants et gaz.

Tableau 5.17 Exemples de quelques productions industrielles de matières plastiques et leurs usages

Matières plastiques	Usages	
Polyéthylènes basse et haute densité	<ul style="list-style-type: none"> • Sacs, films • Sachets • Bidons • Couvercles • Capsules 	<ul style="list-style-type: none"> • Bouchons • Tuyaux • Bouteilles et récipients souples • Couches pour bébés • Fibres monofilaments
Polypropylène	<ul style="list-style-type: none"> • Pare-chocs • Tableaux de bord automobiles • Boîtes alimentaires • Cordes • Ficelles 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilier de jardin • Bouteilles rigides • Fibres • Filaments
Polychlorure de vinyle	<ul style="list-style-type: none"> • Pots • Bouteilles • Emballages pharmaceutiques • Tuyaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Valises • Sacs • Bottes
Polystyrène	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilier • Emballages • Réfrigérateurs • Téléviseurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Jouets • Boîtes • Boîtiers de CD
Polycarbonate	<ul style="list-style-type: none"> • Casques de moto • CD et DVD • Phares • Clignotants automobiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériel médical • Vitres pare-balles • Biberons • Prothèses
Polyméthacrylate de méthyle	<ul style="list-style-type: none"> • Vitres incassables • Feux arrière • Hublots d'avions • Fibre optique 	<ul style="list-style-type: none"> • Surfaces de baignoires et d'éviers • Cuves
Polyuréthane	<ul style="list-style-type: none"> • Matelas • Sièges d'automobiles • Consoles 	<ul style="list-style-type: none"> • Isolation • Jouets • Accoudoirs
Polyamide	<ul style="list-style-type: none"> • Couvercles de boîtes de vitesse • Pales de ventilateurs • Connecteurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Enjoliveurs de roues • Trappes à essence • Attaches de rail

Les **polymères superabsorbants** sont des hydrogels superporeux capables d'absorber des quantités importantes d'eau (jusqu'à mille fois leur masse) et qui trouvent usage dans les couches pour bébés et l'hydratation des sols. Pour synthétiser de tels polymères, il est nécessaire d'utiliser des monomères hydrosolubles et un agent réticulant. La polymérisation s'effectue en solution dans un réacteur à double paroi (figure 5.17) afin de contrôler la chaleur de la réaction, laquelle est fortement exothermique.

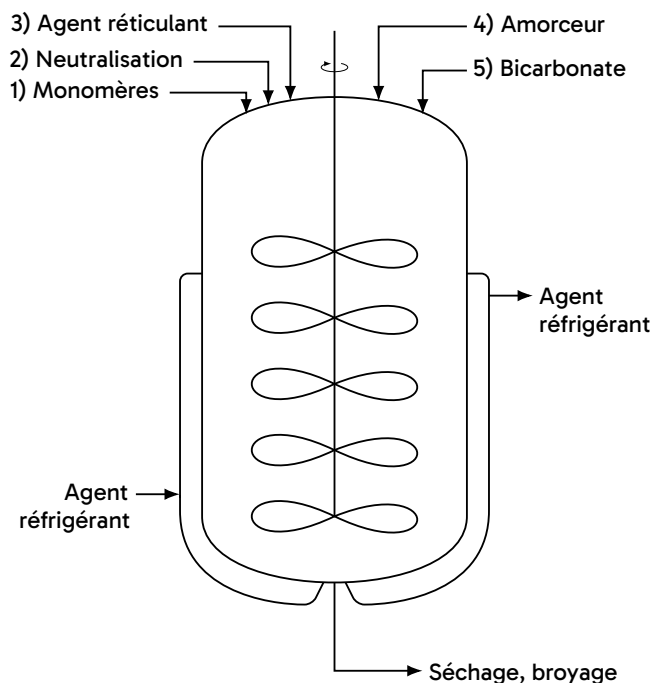


Figure 5.17 Schéma du réacteur de synthèse des polymères superabsorbants

Le monomère d'acide acrylique est d'abord partiellement neutralisé dans le réacteur à double paroi. Ensuite, il est réticulé à l'aide de bisacrylamide afin d'assurer son gonflement et empêcher sa solubilisation dans l'eau. Le monomère réticulé est par la suite activé à l'aide d'amorceurs chimiques de type persulfate d'ammonium pour démarrer la polymérisation. L'addition de bicarbonate à la solution visqueuse provoque un dégagement de CO_2 et conduit au gonflement du polymère, ce qui crée donc une structure poreuse. Le polymère est enfin séché et broyé en petites granules qui possèdent des propriétés superabsorbantes.

5.11 Exercices

A Exercices de révision

- A.1** Quels sont les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation des matières plastiques par rapport aux autres types de matériaux conventionnels (bois, métal, etc.)? Nommez au moins quatre avantages et quatre inconvénients.
- A.2** En vous référant à la **figure 5.18**, décrivez l'effet de la température sur un polymère amorphe et sur un polymère semi-cristallin.

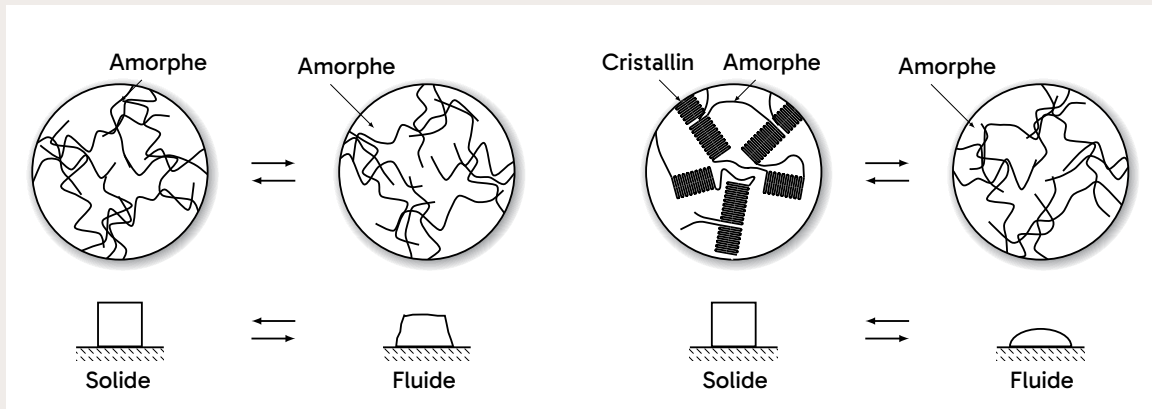


Figure 5.18 Schéma de l'effet de la température sur un polymère amorphe (à gauche) et sur un polymère semi-cristallin (à droite)

- A.3** Quelles sont les techniques couramment utilisées pour la mise en œuvre des plastiques afin de leur donner une forme définitive? Décrivez en détail une technique de votre choix.
- A.4** Des plastifiants, des charges et des renforts sont ajoutés aux polymères. Quel est leur rôle et/ou qu'est-ce qui les différencie? Donnez un exemple pour chacun.

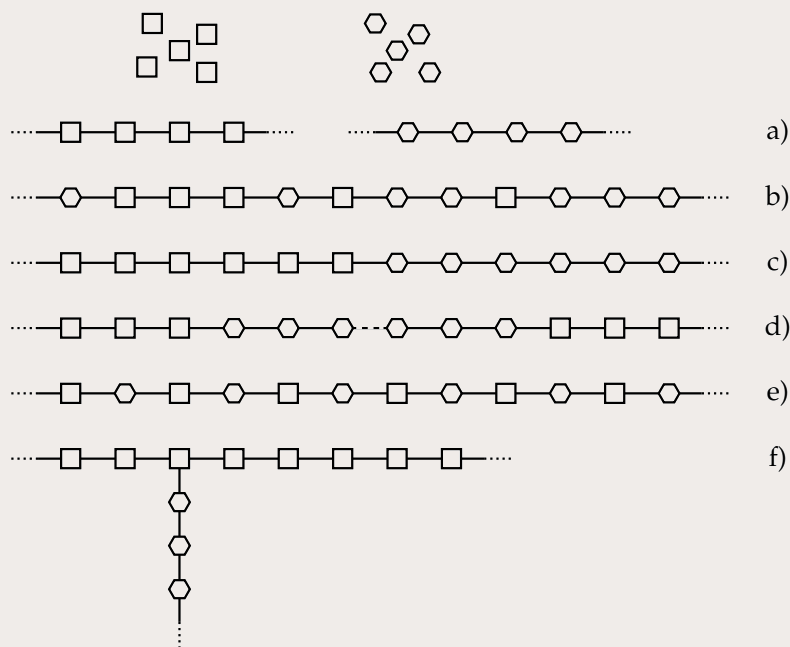
Plastifiants	Charges	Renforts
Définition :	Définition :	Définition :
Rôle :	Rôle :	Rôle :
Exemple :	Exemple :	Exemple :

A.5 Indiquez les noms de trois familles de matières plastiques (selon leurs propriétés thermomécaniques) et précisez leurs caractéristiques.

A.6 Énumérez d'abord les méthodes qui sont utilisées industriellement pour recycler des matières plastiques appartenant à la famille des thermoplastiques et ensuite celles employées pour les thermodurcissables.

B Exercices de réflexion

B.1 À partir du schéma présenté ci-dessous :



Identifiez les types de polymères suivants :

Polymère ramifié : _____

Deux polymères combinés : _____

Copolymère alterné (1/1) : _____

Copolymère statistique : _____

Copolymère : _____

Copolymère alterné (4/4) : _____

Deux polymères non combinés : _____

Si les monomères de départ sont le styrène ($C_6H_5 - CH = CH_2$) et l'éthylène ($CH_2 = CH_2$), donnez la structure possible des copolymères suivants :

- › Copolymère alterné (1/1)
- › Copolymère bloc (2/2)
- › Copolymère statistique

Est-il possible d'obtenir un polymère réticulé avec ce couple de polymères? Pourquoi?

B.2 Parmi les chaînes de polymères (A, B, C et D) schématisées à la **figure 5.19**, quelle est la plus susceptible de conduire à une structure cristalline?

- a) Pourquoi?
- b) Rangez les polymères A, B, C et D en fonction de leur cristallinité, par ordre croissant.

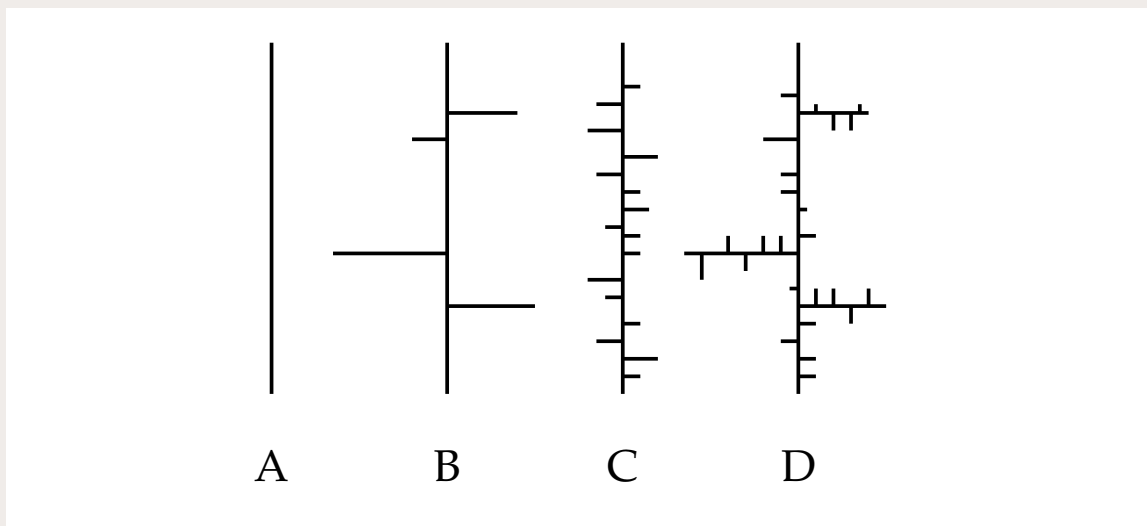


Figure 5.19 Schéma de quatre types de polymères

B.3 Associez les lettres A (amorphe) et C (cristallin) aux caractéristiques des polymères correspondants.

- a) Est difficile à étirer : _____
- b) A une bonne tenue chimique : _____
- c) Peut être transparent : _____
- d) Possède un point de fusion assez précis : _____

B.4 Nommez les deux grands types de réactions utilisées pour la polymérisation et schématisez-les ensuite. Précisez la principale différence entre les deux.

C Exercices d'application

- C.1** À partir du schéma illustré à la **figure 5.20**, nommez la technique industrielle de polymérisation employée et décrivez son principe de fonctionnement en indiquant les noms des éléments 1 à 4 ainsi que les noms des réactifs et du produit fini.

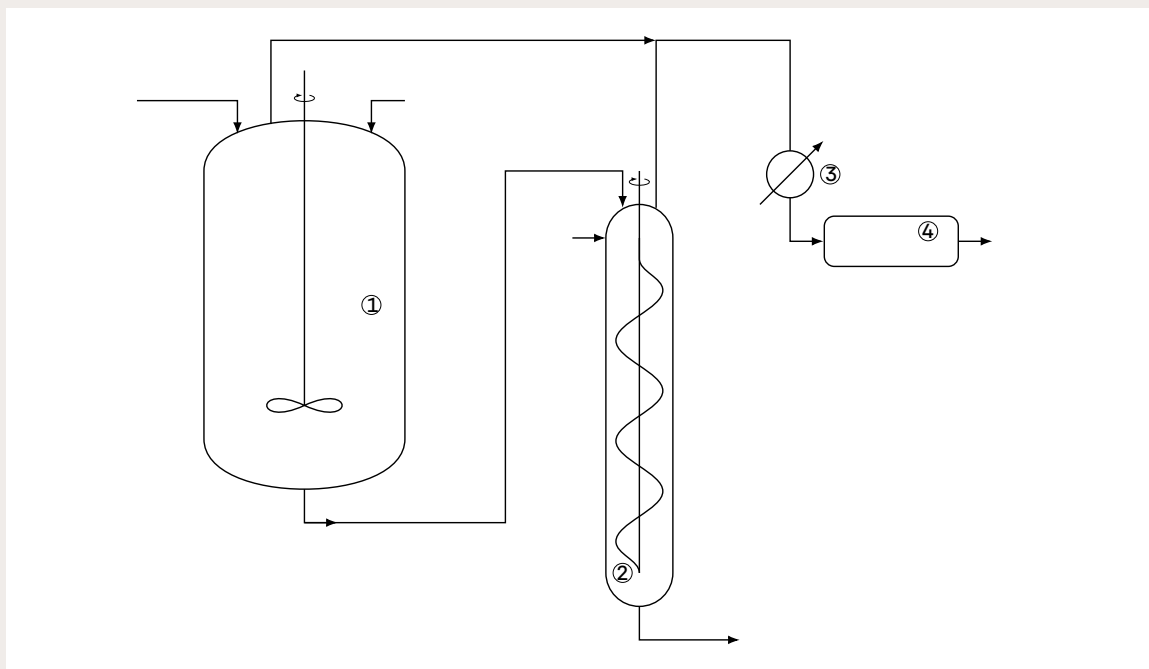


Figure 5.20 Schéma d'une polymérisation industrielle à identifier

Chapitre 6

Productions chimiques inorganiques



Des étudiants du programme de *Techniques de procédés industriels* du laboratoire du Cégep de Lévis

Sommaire

6.1 Introduction	182
6.1.1 Définitions et terminologie	182
6.1.2 Généralités	183
6.2 Gaz	186
6.2.1 Azote et oxygène	186
6.2.2 Chlore	187
6.2.3 Hydrogène	191
6.3 Bases	194
6.3.1 Ammoniac	194
6.3.2 Soude caustique	196
6.3.3 Chaux	197
6.4 Acides inorganiques	198
6.4.1 Acide sulfurique	198
6.4.2 Acide nitrique	201
6.4.3 Acide chlorhydrique	204
6.5 Notions de santé et de sécurité	206
6.6 Exercices	208

6.1 Introduction

La production chimique annuelle de matières inorganiques à l'échelle mondiale est impressionnante. Elle est également essentielle à l'économie moderne : l'usage de substances chimiques d'origine minérale fait partie de notre quotidien en plus d'être nécessaire dans tous les secteurs d'activité. Après avoir présenté les définitions et la terminologie spécifiques aux productions chimiques de matières inorganiques, nous décrirons quelques généralités les concernant. La présentation de quelques productions industrielles inorganiques de grand tonnage occupera une place majoritaire dans ce chapitre, qui ciblera les principaux produits de chacune des catégories suivantes : les gaz, les acides et les bases inorganiques. Nous conclurons le chapitre par une revue des principaux producteurs chimiques mondiaux et québécois de matières inorganiques ainsi que les risques liés à la production de composés minéraux. Pour terminer, quelques exercices de révision, de réflexion et d'application viseront la mise en pratique des notions théoriques abordées.

6.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique aux productions chimiques de matières inorganiques et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Acide inorganique* = composé formé d'hydrogène et d'un ou de plusieurs autres éléments qui est très corrosif, hydrosoluble et dérivé des composés inorganiques;
- › *Anode* = électrode positive d'une cellule d'électrolyse;
- › *Base inorganique* = composé inorganique qui réagit avec les acides inorganiques et les neutralise;
- › *Cathode* = électrode négative d'une cellule d'électrolyse.
- › *Cellule d'électrolyse* = *Électrolyseur* = équipement qui sert à décomposer, grâce à un courant électrique, la structure chimique de certains corps composés;
- › *Chimie inorganique* = *Chimie minérale* = branche de la chimie qui traite les corps simples et les composés de tous les éléments tirés du règne minéral;
- › *Composé inorganique* = *Composé minéral* = petite molécule ionique ou covalente extraite du règne minéral qui ne contient pas de carbone (à quelques exceptions près);
- › *Halogènes* = éléments de la colonne VII A (famille 17) du tableau périodique qui réagissent facilement avec les métaux et l'hydrogène et qui présentent un état d'oxydation de -1 ainsi qu'une grande électronégativité;
- › *Matière première* = substance naturelle ou chimique de départ qui, soumise à des réactions chimiques, produit d'autres substances chimiques ainsi que des matériaux de base ou des matériaux intermédiaires;
- › *Métaux alcalino-terreux* = éléments de la colonne II A (famille 2) du tableau périodique qui présentent un état d'oxydation de +2 ainsi que, comparativement aux métaux alcalins, une électronégativité plus élevée et une réactivité plus faible;
- › *Métaux alcalins* = éléments de la colonne I A (famille 1) du tableau périodique qui présentent un état d'oxydation de +1 ainsi qu'une faible électronégativité et une réactivité élevée;
- › *Potasse caustique* = *Hydroxyde de potassium* = KOH = composé solide alcalin très corrosif qui contient du potassium;
- › *Réactif* = composé qui prend part à une réaction chimique en interagissant avec un ou plusieurs composés;
- › *Sel inorganique* = composé ionique d'origine minérale formé de cations et d'anions ayant une charge électrique neutre;
- › *Soude* = *Carbonate de sodium* = Na_2CO_3 = sel de sodium de l'acide carbonique;
- › *Soude caustique* = *Hydroxyde de sodium* = $NaOH$ = base inorganique forte et très corrosive qui contient du sodium et qui se présente sous forme solide à température ambiante;

6.1.2 Généralités

Les composés inorganiques, ou minéraux, sont définis de manière générale comme étant de petites molécules ioniques ou covalentes qui ne contiennent ni carbone ni hydrogène (à quelques exceptions près : CO, CO₂, cyanures, carbonates, eau). Ils présentent une série de caractéristiques qui peuvent être résumées comme suit :

- ▶ Ils se forment naturellement pour composer le règne minéral et font intervenir l'ensemble des 93 éléments naturels du tableau périodique. Malgré le nombre élevé d'éléments intervenant dans leur composition, la variété des composés inorganiques est moins grande que celle des composés organiques (environ 7 millions de composés organiques répertoriés à ce jour contre 1 million d'inorganiques).
- ▶ Ils peuvent être synthétisés par divers moyens : électrolyse, fusion, réactions chimiques, etc.
- ▶ Selon le nombre d'atomes composant leur structure, ils peuvent être monoatomiques (gaz rares), diatomiques (H₂, O₂, CaO, etc.), triatomiques (O₃, H₂O, CO₂, etc.) ou polyatomiques (P₄, Fe₂O₃, etc.).
- ▶ Ils ont des points de fusion élevés et des degrés variables de conductivité électrique, lesquels sont intimement liés à leurs diverses applications : catalyseurs, réactifs, carburants, explosifs, produits chimiques, etc.
- ▶ Ils ont une fonction physiologique importante pour le règne animal et végétal : squelette, régulation, transmission du flux nerveux, etc.

L'industrie chimique inorganique transforme les ressources minérales brutes en produits chimiques inorganiques de base, lesquels sont indispensables à l'ensemble des secteurs de l'économie. Elle utilise essentiellement des matières premières de source naturelle comme l'eau, l'air, le gaz naturel et les minéraux tels que le chlorure de sodium (sel), le soufre, le calcaire, le sable et les phosphates. Parmi ces matières premières, seuls l'air, l'eau et le chlorure de sodium apparaissent comme inépuisables, les autres étant dispersées dans la croûte terrestre à une abondance variable et présentant un risque d'épuisement à moyen ou à long terme. Les matières premières minérales de source naturelle peuvent être de deux types : métalliques ou non métalliques. Une classification détaillée en est présentée dans le [tableau 6.1](#).

Tableau 6.1 Classification des matières premières minérales de source naturelle

Matières premières minérales de source naturelle			
Métalliques	Métaux communs	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium • Cuivre • Étain 	<ul style="list-style-type: none"> • Fer • Plomb • Zinc
	Métaux d'alliages	<ul style="list-style-type: none"> • Antimoine • Chrome • Cobalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Manganèse • Nickel • Tungstène
	Métaux précieux	<ul style="list-style-type: none"> • Argent • Platine 	<ul style="list-style-type: none"> • Autres métaux de la mine de platine
	Métaux pour technologies avancées	<ul style="list-style-type: none"> • Titane 	<ul style="list-style-type: none"> • Zirconium
Non métalliques	<ul style="list-style-type: none"> • Amiante • Barytine 	<ul style="list-style-type: none"> • Calcaire • Fluorine 	<ul style="list-style-type: none"> • Phosphate • Potasse • Sel • Silice

La figure 6.1 présente de manière simplifiée les principales filières de transformation des matières premières de source naturelle en composés inorganiques de base ou intermédiaires. Une partie de ces transformations sera exposée aux sections 6.2, 6.3 et 6.4 de ce chapitre. L'autre partie fera l'objet du chapitre 8 du présent manuel.

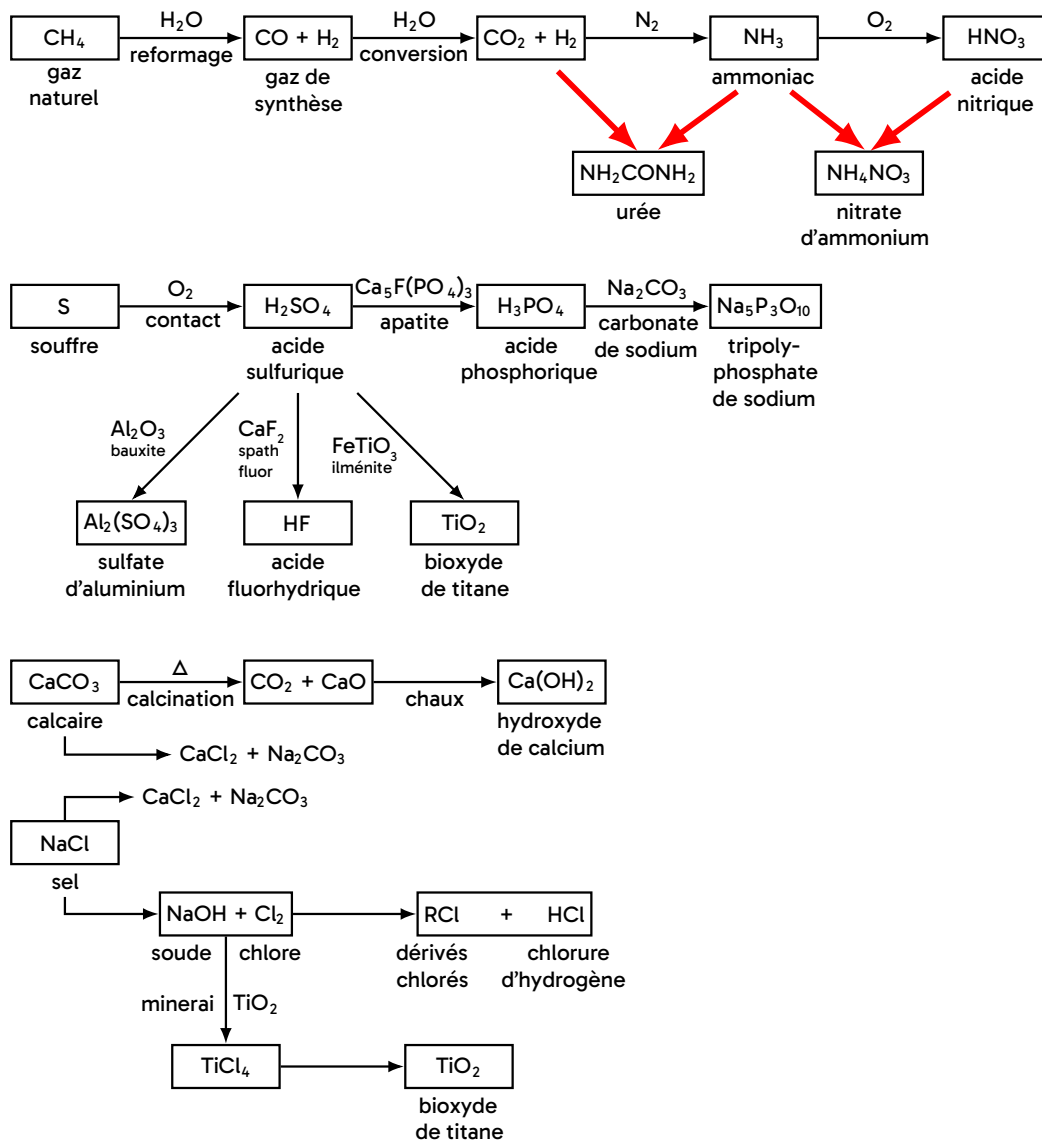


Figure 6.1 Principales filières de transformation de la chimie inorganique de base

Le schéma présenté à la **figure 6.2** permet de distinguer les quatre catégories principales de composés minéraux fabriqués actuellement par l'industrie chimique inorganique mondiale :

- A)** Les produits chimiques inorganiques
- B)** Les engrais et les produits azotés
- C)** Les gaz comprimés
- D)** Les pigments et les colorants

À titre de vue d'ensemble de l'industrie chimique inorganique, les sous-catégories (1, 2...) de chacune des catégories principales sont présentées dans le schéma de la **figure 6.2**. Certaines d'entre elles seront décrites aux **sections 6.2, 6.3 et 6.4** de ce chapitre.

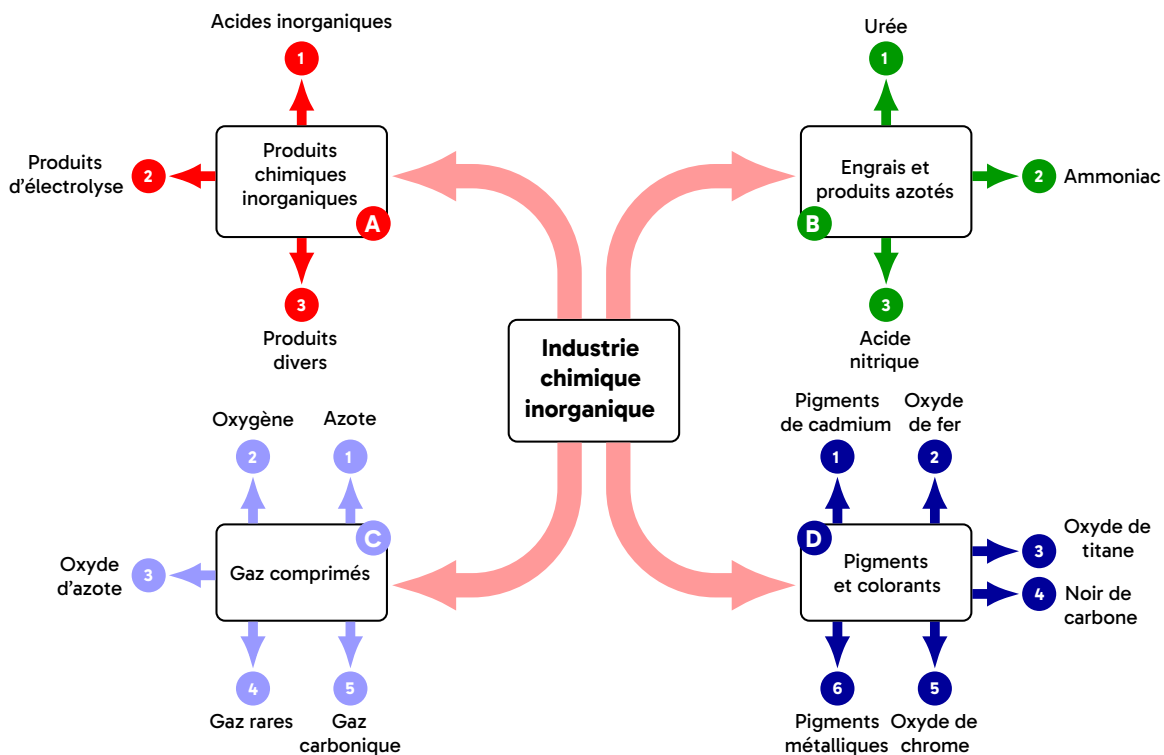


Figure 6.2 Catégories de composés minéraux fabriqués par l'industrie chimique inorganique à l'échelle mondiale

6.2 Gaz

6.2.1 Azote et oxygène

L'azote et l'oxygène sont deux éléments présents dans de nombreux composés organiques ainsi que dans l'air atmosphérique (azote – 78 %; oxygène et traces de gaz rares – 21 %). Dans l'industrie, pour de nombreuses utilisations, il n'est pas nécessaire de séparer l'oxygène de l'azote contenu dans l'air. Par exemple, de nombreuses oxydations ainsi que la synthèse de l'ammoniac s'effectuent avec de l'air atmosphérique. Mais il existe d'autres procédés industriels qui nécessitent l'usage de l'azote ou de l'oxygène purs. Dans ce cas, leur production industrielle peut se réaliser de trois manières :

- ▶ Par **distillation fractionnée de l'air liquide** – L'air ambiant, séché et filtré au préalable, est comprimé ou refroidi pour subir une liquéfaction. Le mélange liquide d'azote et d'oxygène est alors séparé par distillation fractionnée, ce qui permet d'obtenir deux gaz purs.
- ▶ Par **combustion d'hydrocarbures gazeux ou liquides dans un générateur** – La combustion complète des hydrocarbures conduit à la création d'un mélange gazeux formé de gaz carbonique (CO₂), d'azote et de vapeur d'eau (H₂O). La condensation de la vapeur d'eau permet d'obtenir un mélange gazeux inerte formé d'azote (environ 87 %) et de CO₂ (13 %).
- ▶ Par **adsorption modulée en pression** – L'air atmosphérique comprimé (à environ 8 bar) passe au travers de tamis moléculaires, un adsorbant à base de carbone qui a la propriété, à haute pression seulement, de fixer l'oxygène et de laisser passer l'azote. La désorption de l'oxygène fixé sur les tamis moléculaires s'effectue au moyen d'une diminution de la pression à environ 1 bar.

Les utilisations industrielles et courantes de l'azote et de l'oxygène, purs ou non séparés de l'air atmosphérique, sont présentées dans le [tableau 6.2](#).

Tableau 6.2 Utilisations industrielles de l'azote et de l'oxygène

Gaz	Utilisations
Azote pur	<ul style="list-style-type: none"> • Agent de réfrigération (azote liquide) • Gaz de purge et de pressurisation • Atmosphère inerte • Gaz porteur en chromatographie • Gaz à la pression zéro et gaz de dilution pour différentes analyses • Nitruration en métallurgie
Azote non séparé de l'air	<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse de l'ammoniac et de l'acide nitrique • Synthèse de dérivés azotés
Oxygène pur	<ul style="list-style-type: none"> • Oxydation en chimie fine • Oxydation en microélectronique • Blanchiment de la pâte à papier • Métallurgie • Soudure • Propulsion de fusées et de missiles
Oxygène non séparé de l'air	<ul style="list-style-type: none"> • Oxydation en chimie organique et inorganique

6.2.2 Chlore

Le chlore (Cl) est un élément chimique de la famille des halogènes. Il se présente dans des conditions normales de température et de pression sous la forme d'un gaz diatomique (Cl_2) de couleur jaune-verdâtre. Il est toxique et très réactif. Il s'agit de l'un des grands produits de la chimie inorganique, avec une production mondiale actuelle de plus de 40 millions de tonnes par année. Plus de 95 % de sa production industrielle se fait en parallèle de celles de l'hydrogène (H_2) et de la soude ($NaOH$), à partir de l'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure de sodium ($NaCl$) qu'on appelle « saumure ». Pour ce faire, on emploie l'une des trois technologies suivantes :

- › Cellule d'électrolyse à diaphragme
- › Cellule d'électrolyse à cathode de mercure
- › Cellule d'électrolyse à membrane

Pour les cellules d'électrolyse à diaphragme et à membrane, les réactions qui ont lieu à l'anode (électrode positive) et à la cathode (électrode négative) sont identiques. Elles peuvent être représentées par les équations suivantes :



Dans la cellule d'électrolyse à cathode de mercure, si la réaction à l'anode est identique à celle qui se produit dans les deux autres types de cellules d'électrolyse, il n'en est pas de même pour la réaction à la cathode. Elle ne conduit pas à la formation de l'hydrogène, mais plutôt à un amalgame de Na-Hg, selon l'équation suivante :



La saumure, matière première de l'électrolyse dans les trois types de cellule, doit préalablement être épurée d'un certain nombre d'éléments (Mg, Ca, Al, Fe, Ni) qui sont susceptibles d'avoir une incidence négative sur l'électrolyse.

Cellule d'électrolyse à diaphragme

Une cellule d'électrolyse à diaphragme est représentée à la [figure 6.3](#), à la page suivante. Ses principales caractéristiques, ainsi que son principe de fonctionnement, peuvent se résumer comme suit :

- › Elle est constituée de deux compartiments différents, séparés par un diaphragme (fibres d'amiante imprégnées) qui laisse diffuser le liquide d'électrolyse mais pas les gaz qui se forment, ce qui permet d'éviter une explosion causée par une réaction entre eux.
- › Deux conducteurs, les électrodes (l'anode et la cathode), sont reliés à une source de courant et sont immergés chacun dans un compartiment de la cellule.
- › L'anode de la cellule est construite en titane et revêtue d'oxyde de ruthénium, pour résister au chlore humide, très corrosif, qui se forme dans cette partie de la cuve.
- › La cathode est en acier.
- › La saumure purifiée, matière première de l'électrolyse, est alimentée dans la cuve à une concentration proche de la saturation (environ 32 %) à la température de l'électrolyse.
- › L'application d'une différence de potentiel (courant électrique) entre les deux électrodes de la cellule conduit à un dégagement de chlore à l'anode et d'hydrogène à la cathode, selon les [équations 6.1 et 6.2](#).
- › Les anions OH^- , qui se forment durant l'électrolyse, se combinent avec les cations Na^+ et conduisent à la formation d'une solution diluée de soude caustique (environ 12 % massique). Cette nouvelle solution se trouve mélangée avec celle de saumure épuisée (concentration autour de 16 %, plus faible que celle d'alimentation et de saturation); elle doit être séparée et concentrée avant d'être utilisée.
- › L'hydrogène ainsi que le chlore, chaud et humide, sont refroidis et séchés avant d'être comprimés.

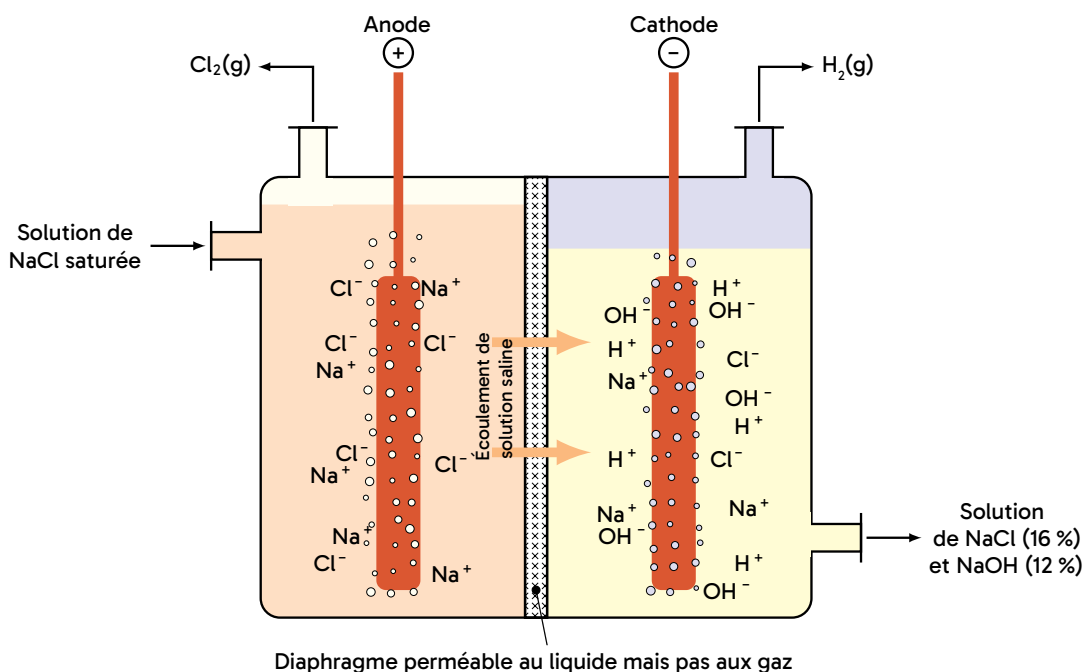


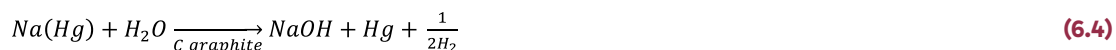
Figure 6.3 Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse à diaphragme d'une solution saturée de saumure (NaCl)

Cellule d'électrolyse à cathode de mercure

La conformation et le fonctionnement de la cellule d'électrolyse à cathode de mercure sont différents de ceux des deux autres variantes, mais ils conduisent aux mêmes produits : du chlore, de l'hydrogène et de la soude. Les caractéristiques de la cellule d'électrolyse à cathode de mercure sont les suivantes :

- › La cellule d'électrolyse est composée d'un seul compartiment dans lequel sont immergées deux anodes suspendues ainsi qu'une cathode.
- › La cathode est constituée d'un film homogène de mercure d'une épaisseur de quelques millimètres et couvre la surface entière du fond incliné de la cellule d'électrolyse. Il est très important que tout le fond de la cellule (en acier) soit recouvert de mercure en permanence pour éviter que l'électrolyte le touche et conduise à la production d'hydrogène et, en fin de compte, à une explosion.
- › Les réactions qui ont lieu aux deux électrodes sont représentées par les équations 6.1 et 6.3.

- › L'amalgame formé à la cathode s'écoule par effet de gravité vers la base de la cellule d'électrolyse, en raison de la pente, et passe dans un décomposeur (cylindre d'acier dont l'intérieur est plaqué de morceaux de graphite) pour réagir avec de l'eau. La réaction est traduite par l'équation suivante :



- › Le mercure obtenu dans le décomposeur est recyclé dans la cellule d'électrolyse, à un débit suffisant pour couvrir son fond.
- › La soude caustique formée dans le décomposeur est évacuée par trop-plein et filtrée avant son usage.

Le schéma d'une cellule d'électrolyse à cathode de mercure est représenté à la **figure 6.4**.

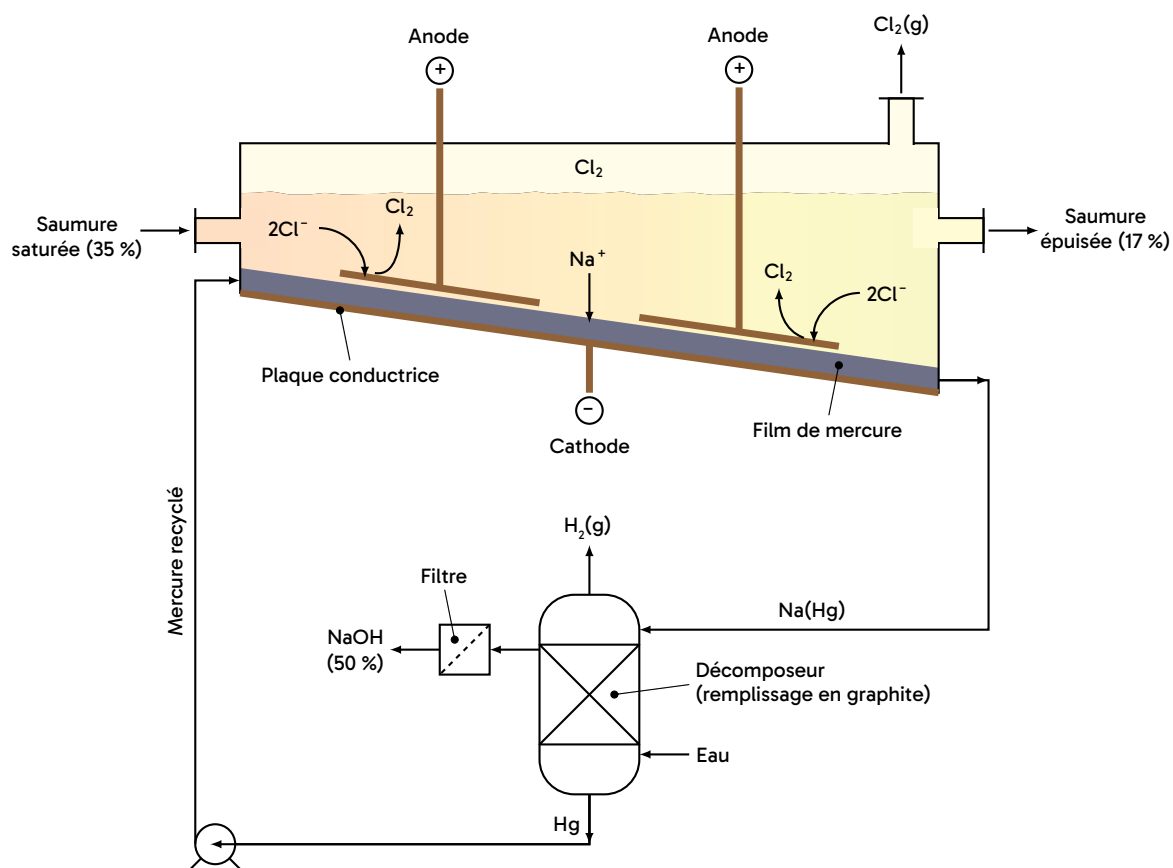


Figure 6.4 Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse à cathode de mercure d'une solution saturée de saumure (NaCl)

Cellule d'électrolyse à membrane

La cellule d'électrolyse à membrane représentée à la [figure 6.5](#) s'impose comme la technologie la plus économique et la plus écologique, car sa consommation d'énergie est la plus faible. Elle permet aussi d'éradiquer l'usage de l'amiante et du mercure, deux matériaux très toxiques. Son fonctionnement (les réactions qui se passent à l'anode et à la cathode) et ses caractéristiques ressemblent beaucoup à ceux de la cellule d'électrolyse à diaphragme.

La différence majeure entre les deux technologies est le remplacement du diaphragme en amiante, qui est toxique et donc polluant, par une membrane sélective en plastique, de type tétrafluoroéthylène. Cette membrane laisse passer les cations Na^+ , mais pas les anions Cl^- ni OH^- . Aussi, l'électrolyte du côté de la cathode est composé de NaOH dilué, mais pur, au lieu d'un mélange de NaCl et de NaOH. La solution n'a donc qu'à être évaporée, typiquement à 50%.

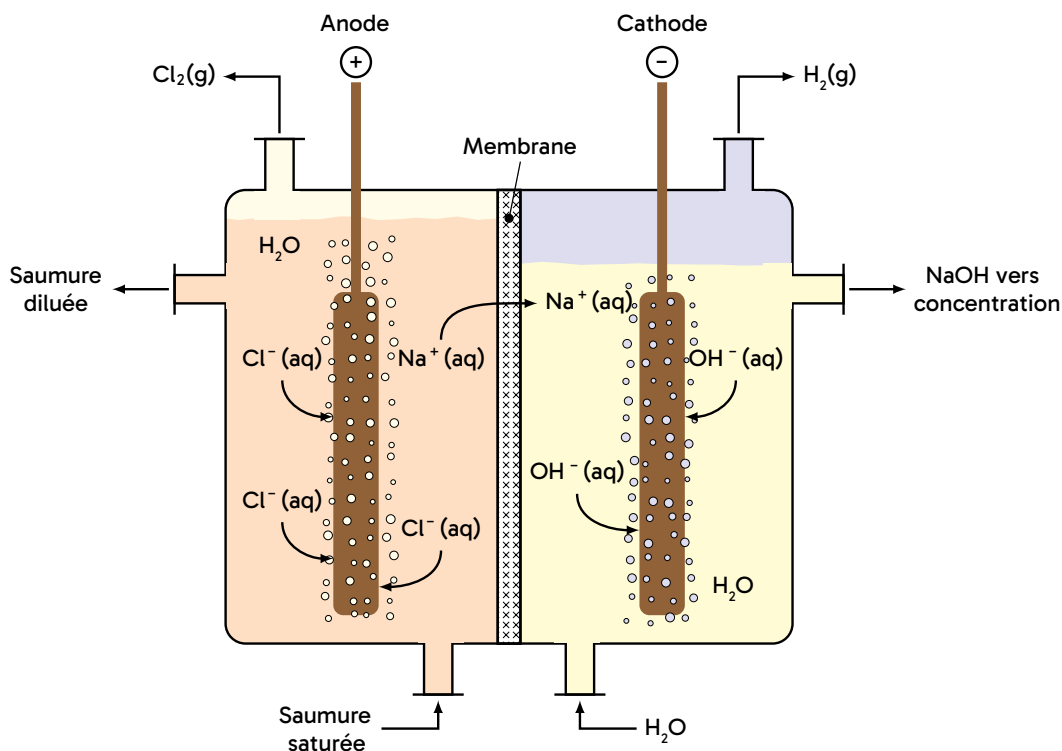


Figure 6.5 Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse à membrane d'une solution saturée de saumure (NaCl)

Le marché du chlore connaît une croissance remarquable en raison de sa polyvalence. L'éventail de ses utilisations industrielles et courantes est présenté dans le [tableau 6.3](#).

Tableau 6.3 Utilisations industrielles du chlore

Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none">• Fabrication de produits chlorés : acides, solvants, produits de nettoyage, etc.• Fabrication de polymères : polychlorure de vinyle (PVC), polyuréthane, résine époxy, etc.• Réactif pour la synthèse du titane, du silicium et de la méthylcellulose• Fabrication de pesticides• Fabrication d'herbicides• Fabrication de colorants
Papetière et textile	<ul style="list-style-type: none">• Agent blanchissant
Traitement de l'eau	<ul style="list-style-type: none">• Biocide (désinfectant pour l'eau potable)• Traitement des eaux usées
Électronique	<ul style="list-style-type: none">• Liant de composants• Protection de pièces sensibles
Pharmaceutique	<ul style="list-style-type: none">• Anesthésique• Produits phytosanitaires
Agroalimentaire	<ul style="list-style-type: none">• Traitement de l'eau de refroidissement de la pasteurisation• Lavage des fruits et des légumes (eau chlorée)• Désinfection des surfaces en contact avec les aliments

Une variante de ce procédé de production permet de produire de l'eau de Javel (hypochlorite de sodium – NaOCl) et, en ajoutant un réacteur, du chlorate de sodium (NaClO₃). Ces deux composés sont utilisés comme agents de blanchiment en remplacement du Cl₂ dans l'industrie des pâtes et papiers ainsi que pour la production d'herbicides. Les mêmes réactions chimiques sont formées aux deux électrodes, mais la séparation (membrane ou diaphragme) est éliminée.

6.2.3 Hydrogène

Actuellement, la production mondiale d'hydrogène est supérieure à 30 millions de tonnes, ce qui le place parmi les plus importants gaz industriels. Il est fabriqué de deux manières :

- › par synthèse directe, comme produit principal;
- › par de nombreux processus chimiques et pétrochimiques, comme coproduit. Les principales voies de production de l'hydrogène sont présentées dans le [tableau 6.4](#), à la page suivante.

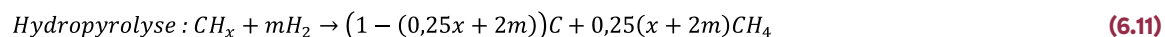
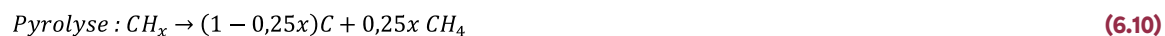
Tableau 6.4 Voies de production de l'hydrogène

Produit principal	Coproduit
<ul style="list-style-type: none"> • Reformage du gaz naturel • Oxydation partielle des coupes pétrolières • Gazéification du charbon • Électrolyse de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Reformage catalytique • Craquage catalytique • Vapocraquage du naphta • Cokéfaction du charbon • Déshydrogénation de l'éthylbenzène • Électrolyse de la saumure saturée

Étant donné que dans le chapitre 2 de ce manuel nous avons présenté une partie des voies de production de l'hydrogène qui ont été énumérées dans le **tableau 6.4**, nous nous concentrerons maintenant sur la description de seulement deux d'entre elles : la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau.

Gazéification du charbon

Les pays qui sont les plus gros producteurs de charbon utilisent de nos jours un procédé de gazéification pour produire, à partir du charbon, un mélange de gaz à usage industriel appelé « gaz de synthèse », qui est constitué de H_2O , de H_2 , de CH_4 , de CO_2 et de CO . Ce procédé de gazéification fait intervenir plusieurs réactions : combustion, conversion, hydrogazéification, méthanation, pyrolyse et hydropyrolyse. L'ensemble de ces réactions est symbolisé à l'aide des équations suivantes :



La séparation de l'hydrogène des autres constituants du mélange obtenu par gazéification peut se faire de trois manières :

- › Par **adsorption** – Le mélange gazeux passera sur des lits d'adsorbants (tamis moléculaires, zéolithes, charbon actif), où il laissera « accrochés » seulement les composants polaires. L'hydrogène, étant le seul gaz non polaire, n'est pas adsorbé par la phase solide, contrairement aux autres composants du mélange.
- › Par **perméation** – Le mélange gazeux est « forcé » de passer au travers de membranes sélectives de type organique (comme le polytétrafluoroéthylène). Parmi l'ensemble des composants, seul l'hydrogène subira la perméation gazeuse sélective au moyen de cette membrane spécifique.
- › Par **cryogénie** – Le mélange gazeux est condensé, et le liquide obtenu est ensuite fractionné par distillation.

Électrolyse de l'eau

L'hydrogène électrolytique est obtenu par la décomposition de l'eau en ses deux composants (hydrogène et oxygène) sous l'action d'un courant électrique. Il s'agit de la voie de production de l'hydrogène la plus propre parmi celles qui sont énumérées dans le [tableau 6.4](#), l'oxygène étant le seul sous-produit de ce processus d'électrolyse. Si l'énergie électrique utilisée n'a pas été produite en utilisant des hydrocarbures, par exemple grâce à l'hydroélectricité, il s'agit d'un procédé sans émission de GES employant des ressources renouvelables. Le schéma de principe d'une cellule d'électrolyse de l'eau est présenté à la [figure 6.6](#).

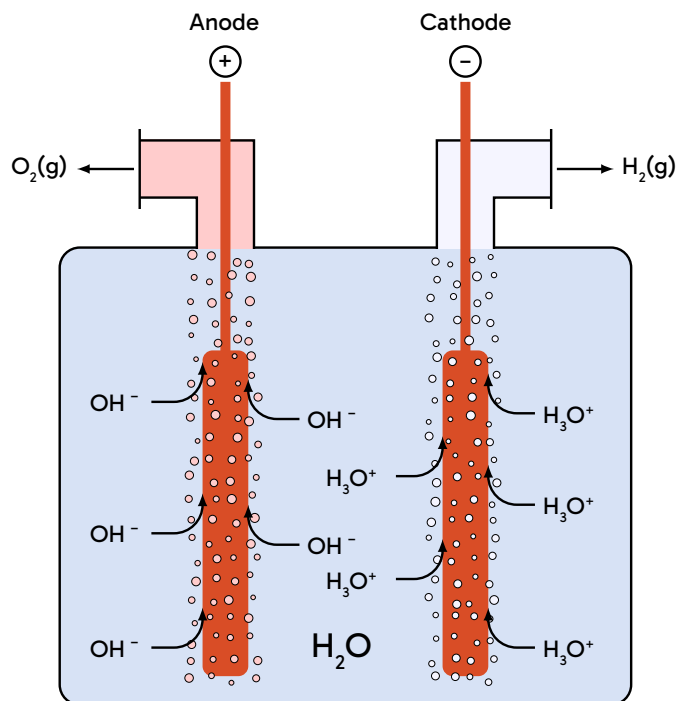


Figure 6.6 Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse de l'eau

En raison de la faible conductivité de l'eau pure, une petite quantité d'un électrolyte de type acide ou basique (KOH) doit être ajoutée à la cellule d'électrolyse. De l'hydrogène gazeux de grande pureté se forme à la cathode, et de l'oxygène gazeux, à l'anode, selon les réactions suivantes :



Les gaz obtenus à la cathode et à l'anode doivent être collectés séparément, sinon ils génèrent un mélange très explosif.

Les principales utilisations de l'hydrogène gazeux dans divers secteurs industriels sont présentées dans le [tableau 6.5](#).

Tableau 6.5 Utilisations industrielles de l'hydrogène

Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'ammoniac • Production de méthanol • Synthèses diverses dans les usines chimiques • Gaz vecteur en chromatographie
Pétrochimique	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrodésulfurisation • Hydrogénation • Hydrocraquage de distillats
Automobile Électronique	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosphères réductrices • Soudage
Aéronautique	<ul style="list-style-type: none"> • Propulsion de fusées
Métallurgique	<ul style="list-style-type: none"> • Pierres précieuses synthétiques

6.3 Bases

6.3.1 Ammoniac

L'ammoniac (NH_3) est le deuxième produit inorganique le plus employé au monde après l'acide sulfurique, notamment par l'industrie agrochimique (pour fabriquer de l'engrais) ainsi que par la pharmacochimie (pour fabriquer des médicaments). Il est obtenu en industrie par la réaction entre l'azote (N_2) de l'air et l'hydrogène gazeux (H_2) issu du gaz naturel en présence d'un catalyseur, selon un vieux procédé mis au point par Fritz Haber en 1909 et industrialisé par Carl Bosch en 1913. Le procédé Haber-Bosch repose sur la réaction d'équilibre suivante :



Afin de produire de l'ammoniac d'une façon qui soit industriellement rentable, il est nécessaire de travailler dans des conditions particulières :

- › Une température aussi basse que possible
- › Une pression élevée
- › L'emploi d'un catalyseur actif de type fer α (Fe_3O_4)

Le schéma de principe du procédé Haber-Bosch est présenté à la [figure 6.7](#). Un mélange gazeux, qui contient seulement de l'hydrogène et de l'azote, est chauffé au préalable dans le préchauffeur (1). Il est ensuite comprimé à la pression de synthèse (généralement entre 100 et 300 bar) avant d'être introduit dans le réacteur de synthèse (3). Les températures de fonctionnement du réacteur de synthèse qui sont employées actuellement dans l'industrie

sont de l'ordre de 380 à 450 °C. Étant donné que le rendement de la synthèse est très faible (environ 20%), les gaz non convertis doivent être recyclés après la récupération de l'ammoniac par refroidissement (4) et la condensation (5). À la sortie du condenseur (5), l'ammoniac est anhydre; il est stocké sous forme liquide dans des réservoirs en acier sous pression atmosphérique normale et à une température de -33 °C.

La synthèse de l'ammoniac consomme des hydrocarbures (matière première pour obtenir l'hydrogène et source d'énergie) et de l'eau (nécessaire au refroidissement des produits de cette synthèse). En ce qui concerne la consommation d'électricité, le procédé Haber-Bosch peut être considéré comme autonome. La nécessité de maintenir une température relativement basse dans le réacteur malgré l'exothermicité de la réaction permet de récupérer de l'énergie sous forme de vapeur pour faire fonctionner un turbo-alternateur qui produit de l'électricité.

La réaction a lieu dans un réacteur à lit fixe comprenant plusieurs couches de catalyseur, entre lesquelles de l'hydrogène froid est injecté de façon à contrer l'exothermicité et à maintenir une température optimale. Cette technique est appelée un « trempage » (*quench* en anglais).

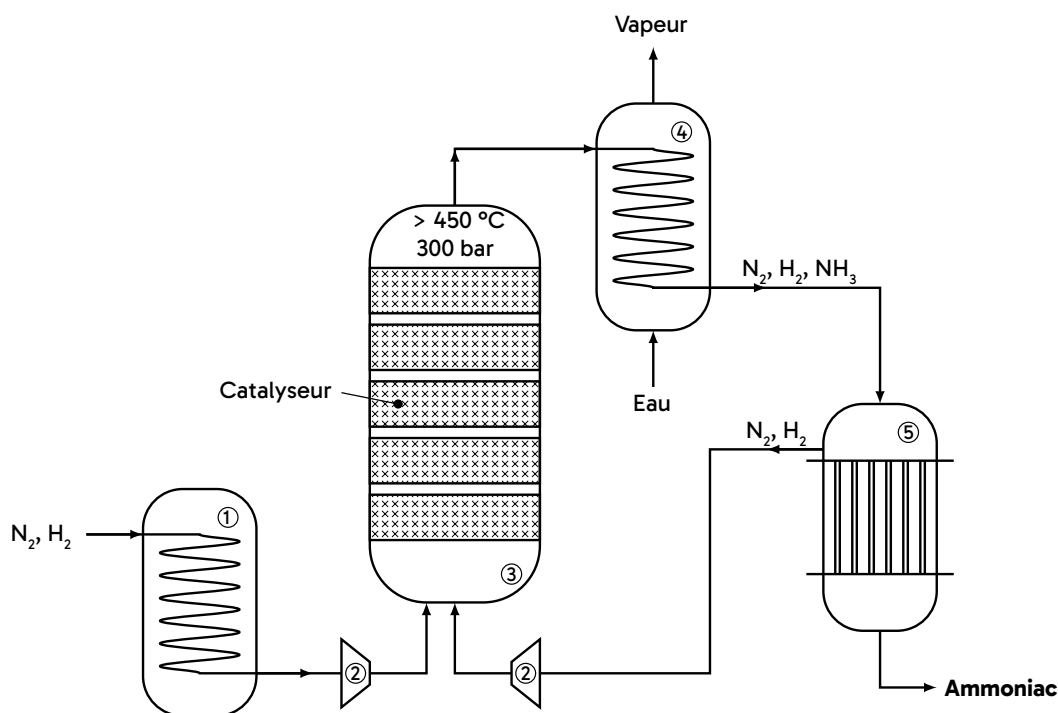


Figure 6.7 Schéma de principe du procédé Haber-Bosch pour la production d'ammoniac (1 = préchauffeur; 2 = compresseur; 3 = réacteur de synthèse; 4 = refroidisseur; 5 = condenseur)

Les nombreuses utilisations industrielles et courantes de l'ammoniac sont énumérées dans le [tableau 6.6](#).

Tableau 6.6 Utilisations industrielles de l'ammoniac

Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication de l'acide nitrique Fabrication d'explosifs Fabrication d'engrais : urée, nitrate d'ammonium, sulfate et phosphate d'ammonium Fabrication d'amines, d'amides et de nitriles Atmosphère réductrice Fabrication de l'eau ammoniacale nettoyante
Plastique	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication du nylon
Pharmaceutique	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication de sulfamide
Papetière	<ul style="list-style-type: none"> Traitement du bois dur
Métallurgique	<ul style="list-style-type: none"> Atmosphère de nitruration Extraction du zinc et du nickel Recuit brillant de l'acier
Climatisation	<ul style="list-style-type: none"> Agent de réfrigération Lavage des fruits et des légumes avec de l'eau chlorée Désinfection des surfaces en contact avec les aliments

6.3.2 Soude caustique

L'hydroxyde de sodium (NaOH), dit « soude caustique », est une poudre blanche très hygroscopique (absorbe très facilement l'eau de l'air ambiant) et très corrosive; il a un caractère basique très puissant. Étant donné son caractère très hygroscopique, il est dissous dans l'eau et commercialisé sous forme de lessive de soude, qui est une solution très basique, incolore et visqueuse. Il existe deux procédés pour sa production industrielle :

- › L'électrolyse d'une solution saturée de saumure (NaCl)
- › La caustification

Le procédé d'**électrolyse** d'une solution saturée de saumure (NaCl) a été présenté à la [section 6.2.2](#) de ce chapitre parce que la production du chlore est accompagnée de celle de la soude caustique. Sa production par électrolyse dépend donc des besoins en chlore et elle risque de devenir insuffisante, car les produits chlorés sont connus comme étant nuisibles à l'environnement. Pour éviter la sous-production de soude caustique quand les besoins en chlore sont faibles ou quand la demande en NaOH est supérieure à celle du chlore, il est possible de procéder à la **caustification**, ce qui suppose de traiter une solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3) au moyen d'un lait de chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La réaction de double décomposition qui a lieu lors de ce processus peut être représentée par l'équation suivante :



La soude caustique est l'un des produits importants de la chimie inorganique en raison de sa grande polyvalence. Le **tableau 6.7** en présente les principales utilisations industrielles et courantes.

Tableau 6.7 Utilisations industrielles et courantes de la soude caustique

Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> • Agent de neutralisation des milieux acides • Réactif dans plusieurs synthèses inorganiques • Synthèse des savons et des détergents • Agent de nettoyage et de débouchage
Papetière	<ul style="list-style-type: none"> • Agent blanchissant
Traitement de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des eaux usées • Purification de l'eau et modification de son pH
Textile	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des fibres naturelles • Fabrication de fibres régénérées
Métallurgique	<ul style="list-style-type: none"> • Attaque de la bauxite
Alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Épluchage chimique • Échaudage de la volaille • Transformation du cacao et du chocolat • Épaississement de la crème glacée • Transformation des boissons gazeuses • Désamérisation des olives

6.3.3 Chaux

La chaux est l'une des matières premières naturelles de base de la chimie inorganique. Elle se trouve sur le marché sous différentes formes :

- › CaCO_3 = calcaire
- › CaO = chaux vive
- › Ca(OH)_2 = chaux éteinte
- › Solution aqueuse saturée en Ca(OH)_2 = eau de chaux
- › Suspension de Ca(OH)_2 en phase aqueuse = lait de chaux

La chaux vive (CaO) est obtenue par calcination du calcaire (CaCO_3) dans un four industriel, à une température d'environ 1100 à 1200 °C. La réaction de calcination peut être représentée à l'aide de l'équation suivante :



L'hydratation (extinction) de la chaux vive se produit selon la réaction suivante :



Sous toutes ses formes, la chaux trouve de nombreuses applications industrielles et courantes, lesquelles sont énumérées dans le [tableau 6.8](#).

Tableau 6.8 Utilisations industrielles et courantes de la chaux

Chaux	Utilisations
Calcaire	<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse du carbonate de sodium grâce au procédé Solvay • Synthèse du nitrate de calcium • Industrie du verre • Désulfurant en métallurgie • Matériau de construction • Industrie des engrais
Chaux vive et chaux éteinte	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des eaux pour éliminer certains ions • Synthèse de la soude par caustification • Synthèse du carbure de calcium • Désulfuration des flux gazeux industriels • Déphosphorant en sidérurgie • Agent de purification dans l'industrie sucrière • Production de charges minérales synthétiques • Agent de précipitation dans les procédés hydrométallurgiques

6.4 Acides inorganiques

6.4.1 Acide sulfurique

L'acide sulfurique (H_2SO_4) est l'acide inorganique le plus produit et le plus utilisé au monde. Sa production mondiale est impressionnante : elle s'élève actuellement à plus de 200 millions de tonnes par année. Il est employé comme réactif, catalyseur, déshydratant et absorbant; il est donc souvent recyclé et réutilisé. Quelques-unes de ses propriétés et de ses caractéristiques physiques sont présentées au [tableau 6.9](#).

Tableau 6.9 Quelques propriétés et caractéristiques de l'acide sulfurique

Caractéristique	Description
Dénominations	<ul style="list-style-type: none"> • Acide sulfurique (sous sa forme liquide aqueuse) • Oléum (acide sulfurique anhydre saturé en trioxyde de soufre) • Vitriol ou huile de vitriol (en raison de son aspect vitreux) • « Acide à batterie » • Sulfate de dihydrogène
État physique	<ul style="list-style-type: none"> • Liquide incolore, inodore et plus ou moins visqueux selon sa concentration • Formation de plusieurs hydrates de formule générale : $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n = 1, 2, 3, 4$ et 6)

Tableau 6.9 Quelques propriétés et caractéristiques de l'acide sulfurique (*suite*)

Caractéristique	Description
Propriété	Valeur
Masse molaire	98,08 g/mol
Point d'ébullition	337 °C
Point de fusion	10,31 °C
Tension de vapeur	0,0001 mbar à 20 °C
Densité (à 20 °C)	1,8305 g/cm ³ (100 %)
	1,8361 g/cm ³ (98 %)
	1,3028 g/cm ³ (40 %)
	1,1398 g/cm ³ (20 %)

L'industrie chimique inorganique produit de l'acide sulfurique principalement à partir du dioxyde de soufre, suivant deux procédés :

- › Procédé dit « de contact »
- › Procédé dit « des chambres de plomb »

La production industrielle d'acide sulfurique actuelle repose de façon presque exclusive sur l'emploi du **procédé de contact**, ou procédé Bayer. Il est mené principalement en trois phases (voir la **figure 6.8**) :

- 1) La combustion du soufre élémentaire pour produire du dioxyde de soufre gazeux
- 2) L'oxydation du dioxyde de soufre avec production d'anhydride sulfurique (SO₃) gazeux
- 3) L'absorption de l'anhydride sulfurique gazeux dans l'eau

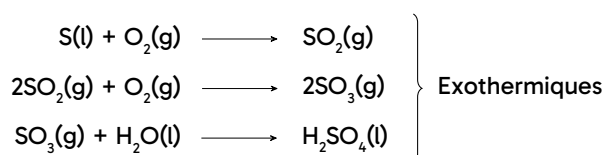


Figure 6.8 Schéma des phases de la production de l'acide sulfurique

Un schéma simplifié du procédé Bayer est illustré à la **figure 6.9**, à la page suivante. Il permet de visualiser les trois phases de production de l'acide sulfurique et d'en expliquer les caractéristiques opératoires :

- › Le soufre élémentaire liquide, qui provient essentiellement de la désulfuration du gaz naturel et du pétrole, est pulvérisé en excès en fines gouttelettes dans l'air sec dans une chambre de combustion (1). La combustion du soufre est très exothermique (1100 °C); elle s'effectue sans imbrûlés grâce à un excès d'air préalablement séché. Le mélange gazeux qui en résulte contient 12% de dioxyde de soufre, 10% d'oxygène et 78% d'azote (en volume). Sa purification n'est pas nécessaire pour la suite du procédé.

- ▶ Le mélange gazeux qui sort de la chambre de combustion (1) est refroidi à environ 445 °C avant d'être introduit dans le réacteur catalytique (2). L'anhydride sulfurique (SO_3) est obtenu par l'oxydation du dioxyde de soufre dans le réacteur (2), qui contient quatre couches de catalyseur de type pentoxyde de vanadium (V_2O_5) montées en série. Puisque l'oxydation est fortement exothermique, la température monte rapidement à environ 600 °C à l'intérieur de la première couche de catalyseur (située dans la partie haute du réacteur). Avant sa descente dans chaque couche suivante de catalyseur, le gaz est refroidi à environ 445 °C. Environ 60% de cette énergie est récupérée pour produire de la vapeur d'eau.
- ▶ Puisque l'absorption du SO_3 sortant du réacteur (2) dans l'eau s'avère difficile, de l'acide sulfurique concentré (teneur de 98 %) est utilisé dans les absorbeurs intermédiaire (3) et final (4).
- ▶ La colonne d'absorption intermédiaire (3) reçoit à sa base les gaz issus de la troisième couche de catalyseur du réacteur (2) et produit en tête un gaz débarrassé du SO_3 . Ce gaz (qui contient du SO_2 non réagi) est réinjecté dans la quatrième couche de catalyseur du réacteur (2).
- ▶ Les gaz sortant de la quatrième couche de catalyseur du réacteur (2) sont absorbés par l'acide sulfurique concentré dans l'absorbeur final (4).
- ▶ Au sommet de l'absorbeur final (4), les gaz résiduels (SO_2 , O_2 et N_2) sont évacués dans l'atmosphère par une cheminée. Dans les unités d'absorption modernes, les gaz résiduels qui sont rejetés dans l'atmosphère contiennent une très faible concentration de SO_2 (environ 350 ppm). À la base de l'absorbeur final (4), on obtient un acide sulfurique concentré (pureté supérieure à 99,5%), qui est envoyé au stockage.

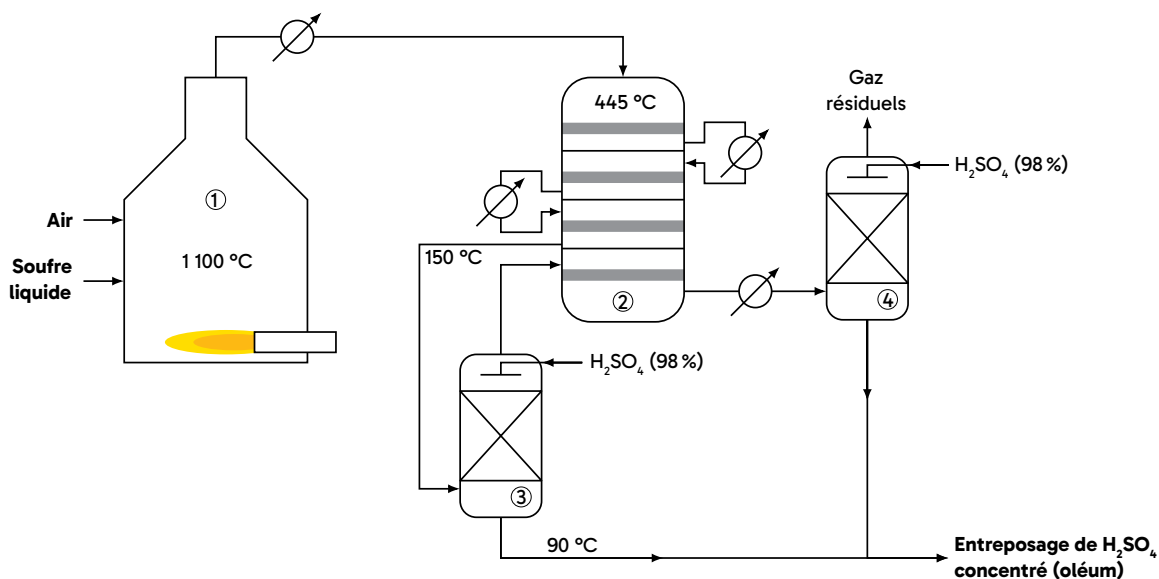


Figure 6.9 Schéma de principe du procédé Bayer pour la production de l'acide sulfurique (1 = chambre de combustion; 2 = réacteur catalytique; 3 = absorbeur intermédiaire; 4 = absorbeur final)

La fabrication de l'acide sulfurique au moyen du procédé Bayer crée un excédent d'énergie : environ 5671 kJ sont dégagés par kilogramme d'acide sulfurique produit. La majeure partie de cette énergie est récupérée sous forme de vapeur et sert à faire fonctionner les soufflantes, les pompes, etc.

Les utilisations industrielles et courantes de l'acide sulfurique sont très nombreuses et variées; il serait donc difficile de toutes les énumérer. Cependant, les plus importantes sont répertoriées dans le **tableau 6.10**.

Tableau 6.10 Utilisations industrielles et courantes de l'acide sulfurique

Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none">• Synthèse d'engrais superphosphatés• Synthèse d'acides inorganiques• Synthèse de colorants et de pigments• Synthèse de détergents• Synthèse d'explosifs• Détartrage• Électrolyte des batteries au plomb• Séchage et purification des gaz
Textile	<ul style="list-style-type: none">• Synthèse des textiles artificiels
Alimentaire	<ul style="list-style-type: none">• Régulateur d'acidité pour les légumes et les fruits en conserve• Déshydratation d'aliments
Traitement de l'eau	<ul style="list-style-type: none">• Régulateur de pH• Élimination des particules solides
Sidérurgique	<ul style="list-style-type: none">• Décapage des métaux• Hydrométallurgie du zinc et du cuivre
Pétrochimique	<ul style="list-style-type: none">• Raffinage du pétrole• Alkylation pour produire de l'essence sans plomb
Papetière	<ul style="list-style-type: none">• Traitement de la pâte à papier• Fabrication du papier sulfurisé

6.4.2 Acide nitrique

L'acide nitrique (HNO_3), également appelé « eau-forte » ou esprit de nitre, est un produit très corrosif. Quelques-unes de ses propriétés et caractéristiques physiques sont présentées au [tableau 6.11](#).

Tableau 6.11 Quelques propriétés et caractéristiques de l'acide nitrique

Caractéristique	Description
Dénominations	<ul style="list-style-type: none">• Acide nitrique• Acide nitrique fumant (quand sa concentration est supérieure à 86%)• Eau-forte• Esprit de nitre
État physique	<ul style="list-style-type: none">• Liquide incolore lorsqu'il est pur• Liquide blanc (solution acide fumante, pauvre en NO_2)• Liquide rouge (solution acide fumante, riche en NO_2)
Solubilité dans l'eau	<ul style="list-style-type: none">• Infinie



Tableau 6.11 Quelques propriétés et caractéristiques de l'acide nitrique (*suite*)

Caractéristique	Description
Propriété	Valeur
Masse molaire	63,01 g/mol
Point d'ébullition	83 °C
Point de fusion	-42 °C
Densité (à 20 °C)	1,5027 g/cm ³

De nos jours, la fabrication industrielle de l'acide nitrique est effectuée en suivant le procédé d'Ostwald, selon les trois étapes principales ci-dessous :

- 1) L'oxydation de l'ammoniac en oxyde nitrique :



- 2) L'oxydation de l'oxyde nitrique en dioxyde d'azote :



- 3) L'absorption du dioxyde d'azote dans l'eau :



Le schéma de principe du procédé Ostwald est présenté à la [figure 6.10](#). Ses caractéristiques opératoires et technologiques sont les suivantes :

- › L'ammoniac, sous forme gazeuse, est chauffé (205 °C) et mélangé à l'air (10 % en volume d'ammoniac et 90 % d'air) dans un réacteur catalytique (1). L'oxydation de l'ammoniac et celle de l'oxyde nitrique (étapes 1 et 2 du procédé Ostwald) se réalisent à une pression moyenne (entre 4 et 6 bar), au moyen d'un catalyseur formé d'un alliage de platine, de rhodium et de palladium (90-5-5) fixé sur un acier spécial. La durée de contact entre les réactifs (ammoniac et air) et le catalyseur est très brève, de l'ordre d'un millième de seconde. L'oxydation de l'ammoniac étant exothermique, la température de l'effluent gazeux atteint une valeur d'environ 865 °C à la sortie du réacteur (1).
- › L'effluent gazeux du réacteur (1), composé de NO, d'O₂, de N₂ et de N₂O, est refroidi et mélangé à de l'air secondaire (provenant du dénitrureur (3)). Il est ensuite alimenté dans l'absorbeur (2), qui fonctionne à haute pression (9 bar).
- › Lors de l'absorption du dioxyde d'azote dans l'eau de l'absorbeur (2), seulement les deux tiers du dioxyde d'azote sont transformés en acide nitrique. Le reste est récupéré et recyclé à l'aide d'une opération de stripping (injection d'air secondaire) effectuée dans le dénitrureur (3).

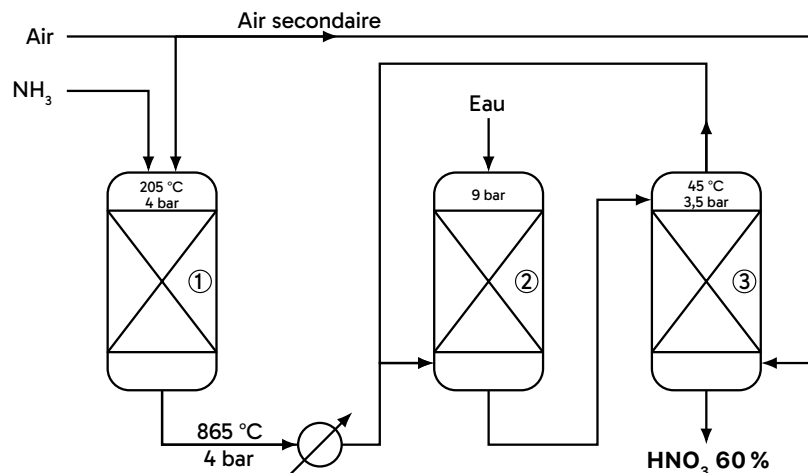


Figure 6.10 Schéma de principe du procédé Ostwald pour la fabrication de l'acide nitrique (1 = réacteur catalytique; 2 = absorbeur intermédiaire; 3 = dénitreur)

Les principales utilisations industrielles et courantes de l'acide nitrique sont présentées dans le [tableau 6.12](#).

Tableau 6.12 Utilisations industrielles et courantes de l'acide nitrique

Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse d'engrais et de divers produits organiques • Synthèse d'explosifs • Synthèse de colorants, de vernis et de laques • Synthèse de fongicides • Synthèse de produits d'entretien ménager • Détection de métaux dans les substances de laboratoire
Textile	<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse des textiles artificiels
Métallurgie	<ul style="list-style-type: none"> • Réaction avec les métaux • Nettoyage et gravure de surfaces métalliques • Raffinage de métaux précieux
Pétrochimique	<ul style="list-style-type: none"> • Raffinage du pétrole • Alkylation pour produire de l'essence sans plomb
Bois et papier	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement de la pâte à papier et fabrication de papier sulfuré • Teinture artificielle du bois
Horticole	<ul style="list-style-type: none"> • Acidification des sols
Santé	<ul style="list-style-type: none"> • Chirurgie de la peau

6.4.3 Acide chlorhydrique

L'acide chlorhydrique (HCl), anciennement nommé «acide muriatique», est un hydracide simple élaboré sous forme de solution de chlorure d'hydrogène dans l'eau. Il est essentiellement le coproduit de différentes réactions dont la finalité première n'est pas sa synthèse (voir quelques exemples dans le [tableau 6.13](#)). Une faible fraction (autour de 10%) de sa production est réalisée par la synthèse directe au moyen d'hydrogène et de chlore ou par la valorisation de résidus chlorés.

Tableau 6.13 Exemples de réactions qui conduisent à la production de l'acide chlorhydrique comme coproduit

Réaction	Équation de la réaction
Production du chlorure de vinyle	$CH_2Cl - CH_2Cl \xrightarrow{T, P} CH_2 = CH - Cl + HCl$ Dichloréthane Chlorure de vinyle
Chloration	$R - H + Cl_2 \rightarrow R - Cl + HCl$
Synthèse d'isocyanates	$R - NH_2 + COCl_2 \rightarrow R - N = C = O + 2HCl$ Amine Phosgène Isocyanate
Synthèse de chlorofluorocarbones	$CCl_4 + HF \rightarrow CCl_3F + HCl$
Synthèse du sulfate de sodium	$NaCl + H_2SO_4 \rightarrow NaHSO_4 + HCl$

Production de l'acide chlorhydrique par synthèse directe

Environ 8% de la production mondiale d'acide chlorhydrique se fait par synthèse directe, au moyen d'un mélange d'hydrogène et de chlore. L'équation de la réaction engendrée par ce mélange est la suivante :



Le schéma de principe du procédé industriel de synthèse directe de l'acide chlorhydrique est présenté à la [figure 6.11](#). Ses caractéristiques sont les suivantes :

- ▶ L'hydrogène et le chlore, tous deux parfaitement secs, sont introduits dans une chambre de combustion (1) construite en silice ou en graphite.
- ▶ Étant donné que la réaction entre l'hydrogène et le chlore est fortement exothermique, la température peut atteindre 2000 °C dans la chambre de combustion. Il est donc nécessaire de la refroidir au moyen d'un mélange d'eau et d'acide chlorhydrique de faible concentration provenant d'un cycle antérieur.
- ▶ Puisque l'acide chlorhydrique gazeux est très soluble dans l'eau, à la sortie de la chambre de combustion (1), on obtient une solution d'acide chlorhydrique.
- ▶ Étant donné que cette solution d'acide chlorhydrique peut contenir des impuretés gazeuses, une séparation liquide-gaz est effectuée dans le séparateur de phases (2). La solution d'acide chlorhydrique de haute pureté (phase inférieure du séparateur) est récupérée et stockée. La phase gazeuse, quant à elle, passe dans une colonne de lavage à l'eau (3) qui permet d'obtenir une solution d'acide chlorhydrique de faible concentration, qui sera recyclée dans la chambre de combustion (1).

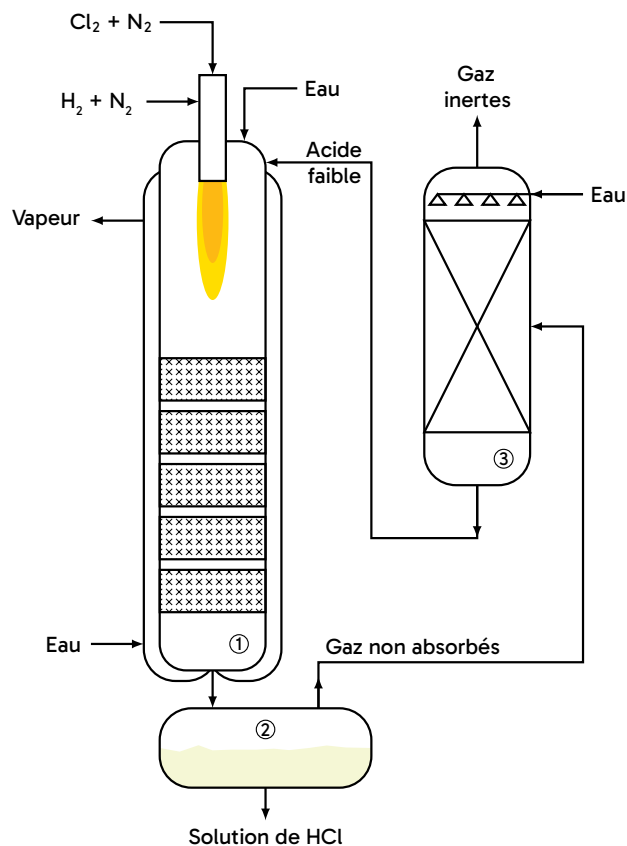


Figure 6.11 Schéma de principe du procédé industriel de synthèse directe de l'acide chlorhydrique (1 = brûleur; 2 = séparateur de phases L-G; 3 = colonne de lavage)

Les applications industrielles les plus courantes de l'acide chlorhydrique sont exposées dans le [tableau 6.14](#).

Tableau 6.14 Utilisations industrielles de l'acide chlorhydrique

Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse de produits organiques et inorganiques • Régénération d'échangeurs d'ions
Alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrolyse des protéines et des glucides
Traitement de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralisation des effluents industriels
Sidérurgique	<ul style="list-style-type: none"> • Décapage des métaux, des alliages et des aciers
Pétrochimique	<ul style="list-style-type: none"> • Forages pétroliers – acidification des puits de pétrole

6.5 Notions de santé et de sécurité

On doit faire usage des produits inorganiques décrits dans ce chapitre en connaissant précisément les risques et les précautions liés à l'emploi de chacun d'eux, car leur degré de corrosivité, de toxicité et de nocivité dépend de leur nature chimique. Le **tableau 6.15** présente les risques concernant les principaux produits inorganiques ainsi que les précautions à prendre au moment de leur emploi.

Tableau 6.15 Risques et précautions à prendre concernant l'usage des principaux produits inorganiques décrits dans ce chapitre

Produit	Risques à l'emploi	Précautions à prendre
Azote	<ul style="list-style-type: none"> • Une fuite d'azote gazeux dans un espace fermé peut conduire à une teneur trop basse en oxygène, ce qui entraîne la mort par asphyxie (anoxie). 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesurer la teneur en oxygène dans les espaces fermés où les gaz inertes (comme l'azote) sont présents.
Oxygène	<ul style="list-style-type: none"> • Un fort taux d'oxygène par rapport au taux normal présent dans l'air (21%) peut provoquer l'inflammation des objets et provoquer une combustion forte et violente. • Sous pression, l'oxygène pur peut réagir violemment avec l'huile et la graisse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesurer et maintenir le taux d'oxygène dans l'air à la valeur normale (21%). • Éviter le mélange de l'oxygène pur avec des matériaux comme l'huile et la graisse.
Chlore	<ul style="list-style-type: none"> • Son inhalation est très toxique et peut causer la mort. • Tout contact avec la peau peut causer une irritation ou une brûlure. • Une exposition de longue durée peut affecter le système respiratoire. • Ce gaz ayant une densité élevée, il a tendance à s'accumuler au sol. 	<ul style="list-style-type: none"> • Éviter l'inhalation ainsi que tout contact avec les yeux et la peau. • Porter de l'équipement de protection adéquat lors de son emploi.
Hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> • Il est extrêmement inflammable et réactif. • Il peut exploser spontanément en cas d'élévation forte de température ou de pression. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faire suivre, à tous les travailleurs employant l'hydrogène, une formation quant aux risques liés à son emploi et les y sensibiliser.
Ammoniac	<ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit d'un gaz caustique; il est irritant pour les yeux et le système respiratoire. • En cas de contact avec la peau, il peut causer une brûlure. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un capteur d'ammoniac dans les environnements qui utilisent ce gaz afin de le détecter.
Soude caustique	<ul style="list-style-type: none"> • Elle est très corrosive pour la peau et les yeux – elle peut provoquer des brûlures, et même la mort (forte exposition). • En cas d'ingestion, elle peut provoquer la mort. • Le mélange avec l'eau lors de la préparation de solutions cause une hausse rapide de la température. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne laisser travailler avec ce produit que les membres du personnel qui ont reçu une formation.

Tableau 6.15 Risques et précautions à prendre concernant l'usage des principaux produits inorganiques décrits dans ce chapitre (*suite*)

Produit	Risques à l'emploi	Précautions à prendre
Chaux vive	<ul style="list-style-type: none"> • Elle provoque une irritation cutanée et des lésions oculaires graves. • Elle provoque une irritation des voies respiratoires. 	<ul style="list-style-type: none"> • Porter de l'équipement de protection adéquat et éviter d'en respirer les poussières, les vapeurs et les aérosols.
Acide sulfurique	<ul style="list-style-type: none"> • Il peut causer une irritation des voies respiratoires. • Il peut causer des brûlures de la peau. • Il peut causer des lésions oculaires graves qui, elles, peuvent entraîner une perte de la vue. • En cas d'ingestion, il peut entraîner des lésions graves de la bouche, de l'œsophage et du tube digestif. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'acide sulfurique réagit violemment avec l'eau ainsi que certains composés, et en particulier le permanganate de potassium. • Toujours verser l'acide dans l'eau, et non l'inverse.
Acide nitrique	<ul style="list-style-type: none"> • Il peut causer des brûlures de la peau. • Ses vapeurs sont irritantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le conserver et le transporter dans des récipients appropriés, à l'abri de la lumière directe et à une température inférieure à 20 °C. • Veiller à ce qu'aucun métal ni aucune substance inflammable ne soit à proximité. • L'entreposer dans une pièce bien aérée. • Lors de sa manipulation, porter de l'équipement de protection adéquat. • Après sa manipulation, laver les mains et le visage (recommandé).
Acide chlorhydrique	<ul style="list-style-type: none"> • Il présente une toxicité aiguë lorsqu'il est inhalé et ingéré. • Il peut provoquer des brûlures de la peau. • Il peut causer des lésions oculaires graves. • Il peut irriter les voies respiratoires. 	<ul style="list-style-type: none"> • Porter de l'équipement de protection adéquat lors de son emploi. • Manipuler seulement en plein air ou dans un endroit bien ventilé.

Le mélange des acides et des bases provoque des réactions chimiques violentes et fortement exothermiques. Il ne faut jamais les entreposer dans la même armoire de rangement. Les industries qui utilisent des volumes importants de ces produits doivent impérativement avoir des systèmes de sécurité permettant d'en prévenir les déversements et les mélanges accidentels.

6.6 Exercices

A Exercices de révision

- A.1** Comment peut-on définir un composant inorganique?
- A.2** Nommez les caractéristiques des produits inorganiques.
- A.3** Énumérez les matières premières de source naturelle utilisées par l'industrie inorganique.
- A.4** Quelles sont les quatre principales catégories de composés minéraux fabriqués actuellement par l'industrie chimique inorganique à l'échelle mondiale?
- A.5** De quelle(s) manière(s) industrielle(s) peut-on obtenir l'azote et l'oxygène?
- A.6** Énumérez quelques applications industrielles de l'azote.
- A.7** Énumérez quelques applications industrielles de l'oxygène.
- A.8** De quelle(s) manière(s) industrielle(s) peut-on obtenir le chlore?
- A.9** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production du chlore par électrolyse au moyen d'une cellule à diaphragme.
- A.10** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production du chlore par électrolyse au moyen d'une cellule à cathode de mercure.
- A.11** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production du chlore par électrolyse au moyen d'une cellule à membrane.
- A.12** Énumérez quelques applications industrielles du chlore.
- A.13** De quelle(s) manière(s) industrielle(s) peut-on obtenir l'hydrogène?
- A.14** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production de l'hydrogène par électrolyse.
- A.15** Énumérez quelques applications industrielles de l'hydrogène.
- A.16** Décrivez, avec le plus de détails possible, le procédé Haber-Bosch utilisé pour la production industrielle de l'ammoniac.
- A.17** Énumérez quelques applications industrielles de l'ammoniac.
- A.18** Nommez les deux procédés industriels utilisés pour la production de la soude caustique.
- A.19** Énumérez quelques applications industrielles de la soude caustique.
- A.20** Sous quelles formes retrouve-t-on la chaux sur le marché?
- A.21** Écrivez l'équation de la réaction de transformation du carbonate de calcium en chaux vive.
- A.22** Écrivez l'équation d'extinction de la chaux vive.
- A.23** Énumérez quelques applications industrielles de la chaux.
- A.24** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production de l'acide sulfurique au moyen du procédé Bayer.
- A.25** Énumérez quelques applications industrielles de l'acide sulfurique.
- A.26** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production de l'acide nitrique au moyen du procédé Ostwald.
- A.27** Énumérez quelques applications industrielles de l'acide nitrique.
- A.28** De quelle(s) manière(s) industrielle(s) peut-on obtenir l'acide chlorhydrique?
- A.29** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production de l'acide chlorhydrique par synthèse directe.
- A.30** Énumérez quelques applications industrielles de l'acide chlorhydrique.

B Exercices de réflexion

- B.1** Quels sont les procédés industriels qui permettent de produire, de manière simultanée, le chlore, l'hydrogène et la soude caustique?
- B.2** Parmi les trois procédés industriels servant à la production du chlore qui ont été présentés dans ce chapitre, lequel est actuellement le plus utilisé de manière industrielle? Pourquoi?
- B.3** Parmi les trois procédés industriels servant à la production du chlore qui ont été présentés dans ce chapitre, lequel est le plus toxique et le plus polluant? Pourquoi?
- B.4** Parmi les voies de synthèse de l'hydrogène qui ont été présentées dans ce chapitre, laquelle est la plus propre?
- B.5** Quels sont les deux produits inorganiques les plus fabriqués et les plus utilisés à l'échelle mondiale?
- B.6** Dans le réacteur catalytique employé dans le cadre du procédé Bayer de synthèse de l'acide sulfurique, pourquoi introduit-on quatre lits (couches) de catalyseur, et non un seul?
- B.7** Pourquoi seulement 8% de la production mondiale de l'acide chlorhydrique se fait-elle par synthèse directe?
- B.8** Pourquoi l'industrie chimique inorganique emploie-t-elle le procédé de caustification pour la production de la soude caustique et ne se limite-t-elle pas à l'électrolyse d'une solution de saumure?

C Exercices d'application

- C.1** Énumérez les différences et les ressemblances entre les trois types de cellule d'électrolyse utilisés par l'industrie inorganique pour produire le chlore.
- C.2** Nommez le procédé industriel illustré à la **figure 6.12**. Identifiez les composants du schéma numérotés de 1 à 4 ainsi que ceux désignés par les lettres A à F.

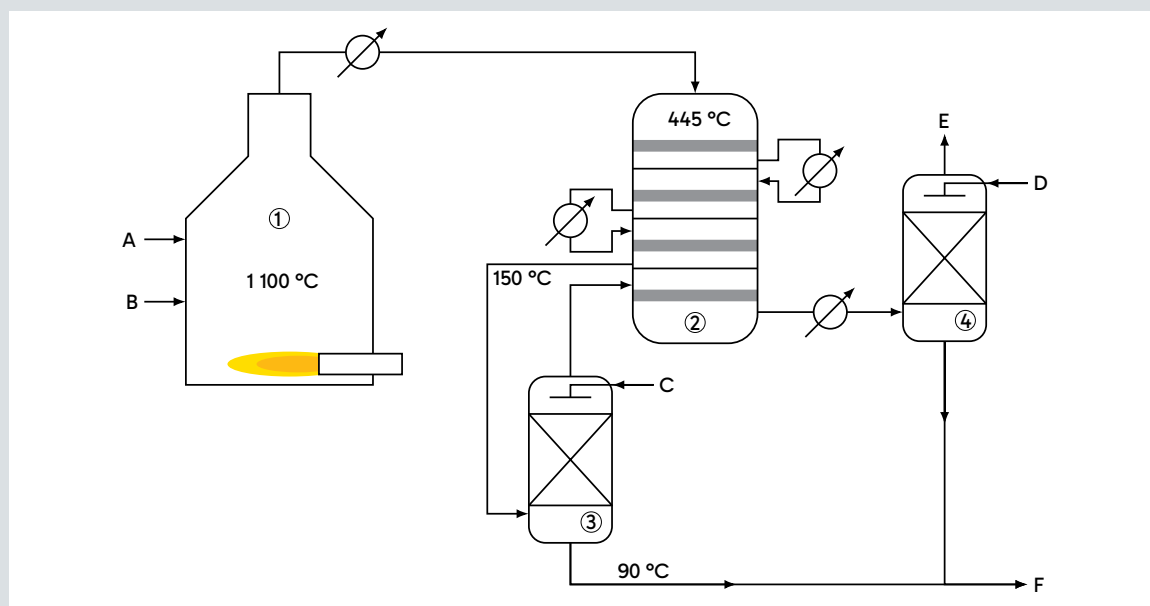


Figure 6.12 Schéma de la production d'un produit inorganique

C.3 Nommez le procédé industriel illustré à la **figure 6.13** ainsi que les composants du schéma numérotés de 1 à 3 ainsi que ceux désignés par les lettres de A à G.

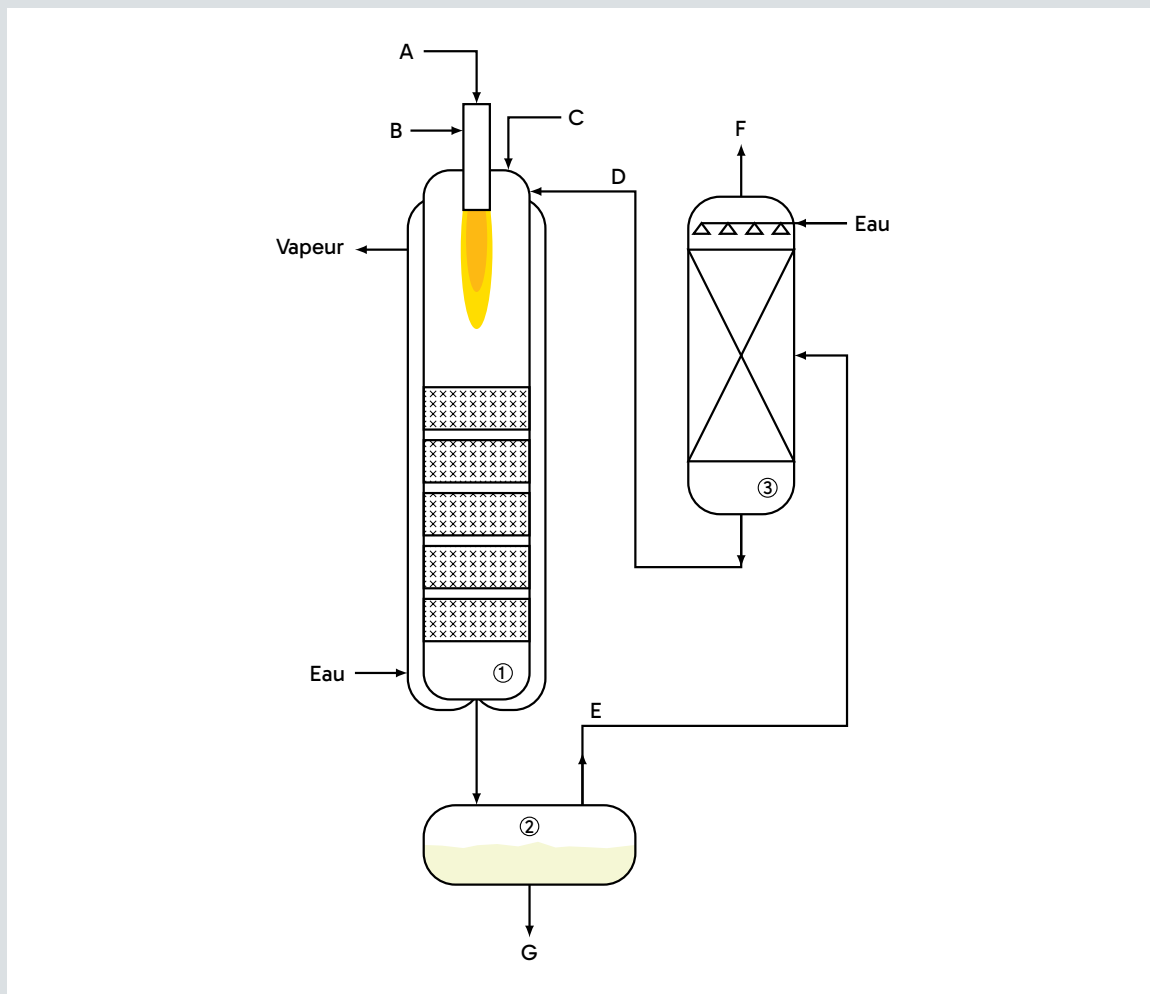


Figure 6.13 Schéma d'un procédé industriel de production d'un produit inorganique

C.4 Nommez le procédé industriel illustré à la **figure 6.14**. Identifiez les composants du schéma numérotés de 1 à 3 ainsi que ceux désignés par les lettres A à E.

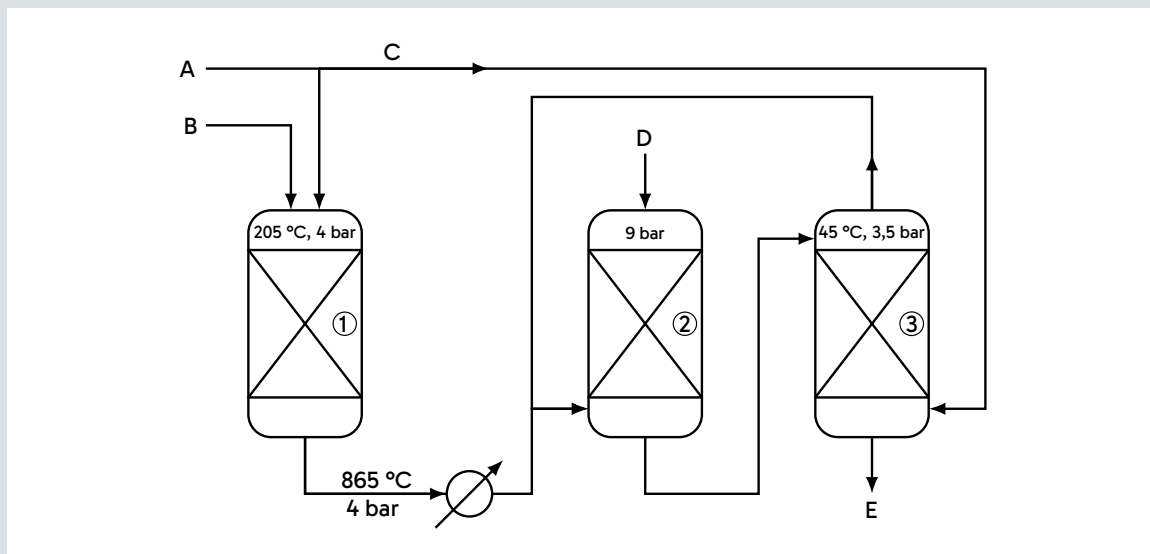


Figure 6.14 Schéma d'un procédé industriel

Chapitre 7

Productions chimiques organiques



Usine de résine Hexion à Saint-Romuald

Sommaire

7.1 Introduction	214
7.1.1 Définitions et terminologie	214
7.1.2 Généralités	215
7.2 Produits organiques de base	217
7.2.1 Benzène, toluène et xylène (BTX)	218
7.2.2 Solvants organiques	220
7.2.3 Produits organiques divers	225
7.3 Monomères	230
7.3.1 Monomères oléfiniques	230
7.3.2 Monomères vinyliques	232
7.4 Autres produits organiques	235
7.4.1 Chlorofluorocarbones	235
7.4.2 Nitroparaffines	236
7.4.3 Noir de carbone	237
7.4.4 Charbon activé	238
7.5 Notions de santé et de sécurité	239
7.6 Exercices	241

7.1 Introduction

En raison du rôle qu'elles jouent dans l'industrie chimique et l'économie moderne, les productions chimiques organiques s'avèrent tout aussi impressionnantes et cruciales que les productions chimiques inorganiques, présentées au chapitre 6. Au début du présent chapitre, nous présenterons les définitions et la terminologie spécifiques aux productions chimiques organiques ainsi que quelques généralités qui y sont associées. Étant donné qu'il y en a une grande variété, il est impossible de toutes les couvrir dans un seul chapitre. Nous nous sommes donc concentrés sur la présentation de quelques-unes d'entre elles, c'est-à-dire celles qui sont essentielles à la fabrication des produits d'usage courant ou des produits de base nécessaires à l'ensemble des industries. Les risques et les précautions à prendre les concernant viendront compléter la matière abordée dans le cadre de ce chapitre. Pour terminer, la mise en application et la vérification des compétences acquises pourront être faites au moyen d'exercices de révision, de réflexion et d'application.

7.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique aux productions chimiques organiques et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Alcool* = composé organique de synthèse caractérisé par la fonction hydroxyle (-OH);
- › *Chimie organique* = science qui s'intéresse aux composés du carbone qui sont présents dans les organismes vivants, qui sont synthétisés par l'humain ou qui se retrouvent dans les ressources fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon);
- › *Composé organique naturel* = produit chimique qui existe dans la nature et qui est issu des êtres vivants (règnes végétal et animal, micro-organismes);
- › *Composé organique synthétique* = produit chimique organique qui n'existe pas dans la nature et qui est issu de la synthèse ou de la fabrication humaine;
- › *Composé organique volatil* = substance chimique très volatile;
- › *Glycol* = composé organique de synthèse caractérisé par la double ou triple fonction hydroxyle (-OH);
- › *Hydrocarbure aliphatique saturé* = *Alcane* = *Paraffine* = composé organique de formule brute C_nH_{2n+2} ;
- › *Hydrocarbure aromatique* = composé organique dont la structure moléculaire comporte un noyau benzénique;
- › *Monomère* = composé de faible masse molaire et susceptible de se polymériser pour former une molécule organique géante, ou macromolécule (polymère);
- › *Oléfine* = *Alcène* = hydrocarbure insaturé qui comporte une ou des liaisons doubles, de formule brute C_nH_{2n} ;
- › *Paraffine* = *Alcane* = hydrocarbure saturé à chaîne ouverte;
- › *Polymère* = macromolécule organique obtenue par l'enchaînement covalent de monomères identiques ou différents;
- › *Produit aromatique* = *Hydrocarbure aromatique* = composé organique insaturé cyclique de type benzénique (alternance de liens simples et doubles dans un cycle fermé) qui se retrouve dans les produits pétroliers ou dans certains végétaux odorants;
- › *Produit organique de base* = composé organique qui résulte d'une production industrielle et qui peut être utilisé comme produit intermédiaire dans d'autres productions industrielles ou comme produit d'usage quotidien;
- › *Reformage catalytique* = procédé de transformation d'une essence lourde de première distillation en un carburant à indice d'octane élevé;

- › *Solvant organique* = substance liquide qui contient au moins un atome de carbone dans sa structure moléculaire et qui peut former une solution homogène avec d'autres substances;
- › *Vapocraquage* = procédé pétrochimique qui consiste à briser, sous l'action de la chaleur et en présence de vapeur d'eau, les hydrocarbures complexes contenus dans les coupes pétrolières ou dans le gaz naturel afin de produire des molécules simples (petites).

7.1.2 Généralités

La chimie organique est définie de manière générale comme étant la science qui étudie les composés du carbone (à l'exception du CO, du CO₂, des carbonates, des carbures et des cyanures) qui sont présents à l'état naturel dans les règnes animal et végétal, qui sont synthétisés par l'être humain ou qui se retrouvent dans les ressources fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon). La chimie organique a longtemps été considérée comme étant celle des organismes vivants, et donc d'origine naturelle. C'est en 1828 qu'un scientifique allemand, Friedrich Wöhler, par un heureux hasard, a réussi à synthétiser, en laboratoire, le premier composé organique, l'urée, à partir de substances inorganiques. Cette découverte ainsi que l'évolution ultérieure de la science ont conduit à la classification des composés organiques en deux catégories : **naturels** et **artificiels**. Les **composés organiques naturels** sont synthétisés par les êtres vivants et sont étudiés par la biochimie. Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) font également partie de cette catégorie. Les **composés organiques artificiels** existent uniquement parce qu'ils ont été synthétisés ou fabriqués par l'être humain à partir de composés organiques naturels. Dans cette catégorie, on peut citer, entre autres, les matières plastiques, les médicaments, les savons, les détergents et les insecticides.

Les composés organiques ont des propriétés différentes de celles des composés inorganiques. Le **tableau 7.1** en présente une comparaison.

Tableau 7.1 Principales différences entre les composés inorganiques et organiques

Propriétés	Composés inorganiques	Composés organiques
Type de liaisons dans la substance	Ioniques	Covalentes
Taille de la molécule	Petite	Grosse
Masse volumique	Très variable	Proche de l'unité
Températures d'ébullition et de fusion	Élevées	Faibles
Solubilité dans l'eau	Souvent	Rarement
Réactions	Rapides et totales	Lentes et réversibles
Combustion dans l'air	Rare	Presque tous

L'industrie chimique organique s'occupe de la transformation des ressources naturelles organiques ou inorganiques en produits chimiques organiques de base, intermédiaires ou finis. Les matières premières organiques naturelles peuvent être de deux types : épuisables ou renouvelables. Le **tableau 7.2**, à la page suivante, en présente une classification détaillée.

Tableau 7.2 Classification des matières premières organiques naturelles

Matières premières organiques naturelles	
Épuisables	<ul style="list-style-type: none"> • Gaz naturel • Pétrole • Charbon
Renouvelables	<ul style="list-style-type: none"> • Bois : cellulose et lignine • Céréales : maïs, seigle, orge, etc. • Oléagineux : soja, arachides, olives, etc. • Sucres : canne à sucre, betteraves • Matières animales : bovins, ovins, porcins • Matières végétales : thé, café, coton, plantes aromatiques, etc. • Micro-organismes : éventail de produits tellement large qu'il fait l'objet du chapitre 4 (Bioproduits)

Le schéma présenté à la **figure 7.1** permet de distinguer les quatre principales catégories de composés organiques fabriqués actuellement par l'industrie chimique à l'échelle mondiale :

- A)** Produits organiques de base
- B)** Monomères
- C)** Polymères
- D)** Autres produits organiques

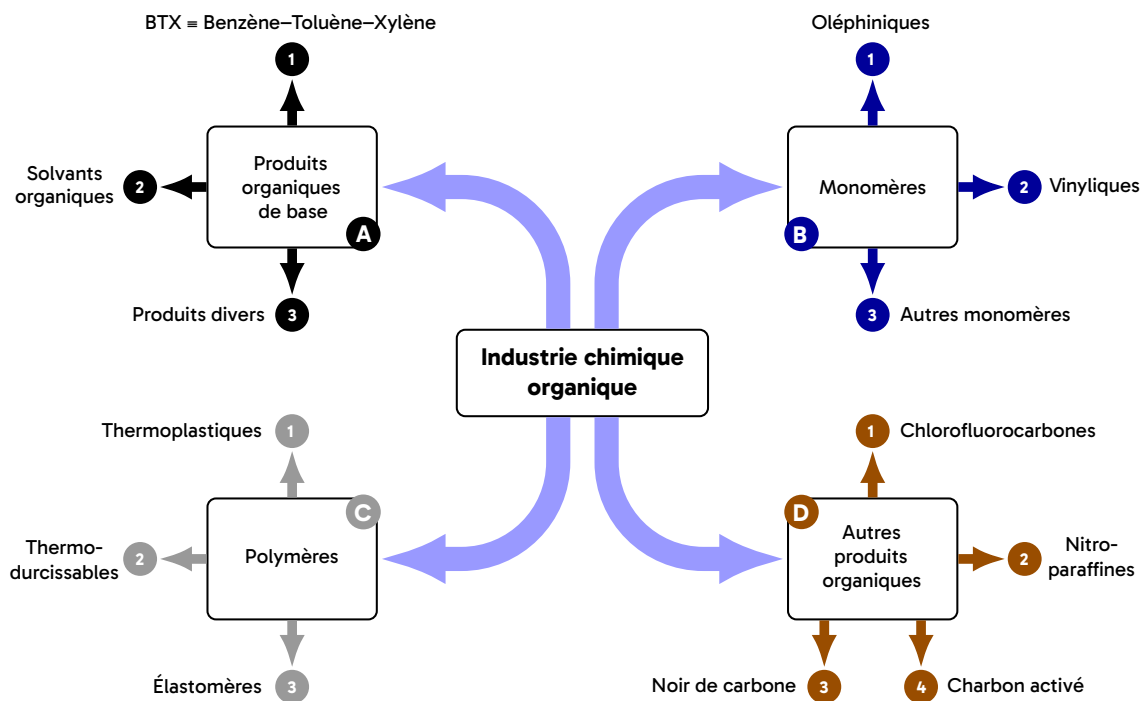


Figure 7.1 Schéma représentant les principales catégories de composés organiques fabriqués par l'industrie chimique à l'échelle mondiale

À titre de vue d'ensemble de la fabrication chimique organique, les sous-catégories (1, 2...) de chacune des catégories principales sont présentées dans le schéma de la [figure 7.1](#). Les catégories A, B et D seront décrites aux [sections 7.2, 7.3 et 7.4](#). La catégorie C a été couverte à part, au chapitre 5.

7.2 Produits organiques de base

Les produits organiques de base sont très nombreux et variés. La description de leur production industrielle pourrait faire l'objet d'un manuel en entier; elle ne sera donc couverte que partiellement dans ce chapitre, qui sera axé sur les produits les plus importants et de plus gros tonnage. Le [tableau 7.3](#) présente une liste non exhaustive des principaux produits organiques de base et des procédés industriels de leur synthèse.

Tableau 7.3 Énumération de quelques produits organiques de base ainsi que des procédés industriels de leur synthèse

Produits organiques de base	Procédés de synthèse et commentaires
Benzène	<ul style="list-style-type: none"> • Distillation extractive et azéotropique des coupes pétrolières – Ces procédés sont décrits à la section 7.2.1.
Toluène	
Xylène	
Cyclohexane	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogénation du benzène – Ce procédé est décrit à la section 7.2.2, car c'est le plus employé actuellement. • Superfractionnement de la fraction de naphta du pétrole* – Ce procédé est très peu utilisé mondialement en raison de la difficulté que pose la séparation du cyclohexane des autres composants analogues dans le pétrole.
Dichlorométhane	<ul style="list-style-type: none"> • Chloration thermique du méthane*
Méthanol	<ul style="list-style-type: none"> • Conversion du gaz de synthèse – Ce procédé est décrit à la section 7.2.2.
Éthanol	<ul style="list-style-type: none"> • Fermentation alcoolique ou hydrolyse enzymatique des composés sucrés – Ces procédés sont décrits dans le chapitre 4. • Hydratation de l'éthylène en présence d'un catalyseur (acide orthophosphorique)*
Isopropanol	<ul style="list-style-type: none"> • Hydratation de l'éthylène en présence d'un catalyseur (acide orthophosphorique)*
Diéthylène glycol	<ul style="list-style-type: none"> • Hydratation de l'oxyde d'éthylène en présence ou absence d'acide*
Formaldéhyde	<ul style="list-style-type: none"> • Oxydation du méthanol en phase gazeuse et en présence de différents catalyseurs – Ce procédé est décrit à la section 7.2.3.
Acétone	<ul style="list-style-type: none"> • Même procédé que pour l'obtention du phénol – oxydation du cumène en présence d'un catalyseur (sels de cumène, de manganène ou de Cobalt)*
Oxyde d'éthylène	<ul style="list-style-type: none"> • Oxydation de l'éthylène en présence d'argent*
Oxyde de propylène	<ul style="list-style-type: none"> • Époxydation du propène au moyen d'un hydroperoxyde*

* Note : Ces procédés ne sont pas décrits dans ce manuel.



Tableau 7.3 Énumération de quelques produits organiques de base ainsi que des procédés industriels de leur synthèse (*suite*)

Produits organiques de base	Procédés de synthèse et commentaires
Méthyl-tert-butyléther (MTBE)	<ul style="list-style-type: none"> Réaction de l'isobutène et du méthanol en phase liquide ou en milieu biphasique gaz-liquide en présence d'une résine solide échangeuse d'ions – Ce procédé est décrit à la section 7.2.3.
Acide acétique	<ul style="list-style-type: none"> Carbonylation du méthanol en présence de rhodium et d'iode*
Phénol	<ul style="list-style-type: none"> Même procédé que pour l'obtention de l'acétone*

* Note : Ces procédés ne sont pas décrits dans ce manuel.

7.2.1 Benzène, toluène et xylène (BTX)

Le benzène, le toluène et le xylène sont les trois hydrocarbures aromatiques qui composent la fraction notée « BTX » dans la littérature spécialisée. L'industrie chimique organique dispose de deux sources pétrolières potentielles pour les produire :

- › L'essence issue du vapocraquage
- › L'essence issue du reformage catalytique

Pour isoler la fraction BTX, ou l'un de ses composants, de l'ensemble des autres composés contenus dans l'essence issue du vapocraquage ou du reformage catalytique, on met à profit deux critères de différenciation :

- › Les propriétés physiques des composants
- › La polarité des molécules contenues dans ces deux types d'essence

Le schéma de la production industrielle de la fraction BTX est présenté à la [figure 7.2](#).

L'ensemble de toutes les séparations montrées sur ce schéma n'est pas mis en œuvre de manière systématique. En fonction des besoins, deux approches sont possibles : la séparation d'un seul composant aromatique en particulier ou la séparation de l'ensemble des aromatiques.

Lorsque la charge d'alimentation du procédé est constituée d'essence issue du vapocraquage, on effectue d'abord une hydrogénation sélective des composants insaturés non aromatiques afin de faciliter leur séparation ultérieure des composants aromatiques. Après l'hydrogénation sélective, on procède à une extraction liquide-liquide (colonne 1). Cette opération de séparation consiste à ajouter à la charge d'alimentation un solvant qui dissoudra les hydrocarbures aromatiques, mais pas les paraffines, ou très peu. De cette manière, on obtient deux phases : une riche en paraffines (en tête de la colonne d'extraction) et l'autre, riche en hydrocarbures aromatiques (au fond de la colonne d'extraction). Le solvant d'extraction choisi doit remplir plusieurs critères :

- › Présenter une grande sélectivité seulement à l'égard des hydrocarbures aromatiques présents dans le mélange à extraire.
- › Ne pas être miscible avec les paraffines.
- › Présenter un point d'ébullition plus élevé que celui des composants de la charge d'alimentation, afin qu'il puisse être récupéré et recyclé.

Parmi les solvants d'extraction les plus utilisés dans le procédé BTX, on peut citer le diméthylsulfoxyde (DMSO), le 1-méthyl-2-pyrrolidone, le diéthylène glycol, etc.

Le mélange d'hydrocarbures aromatiques obtenu au fond de la colonne d'extraction liquide-liquide (1) est traité par la suite à l'aide de deux distillations classiques (colonnes de distillation 2 et 3) pour séparer le benzène, le toluène et la fraction des aromatiques composés de huit atomes de carbones (C₈). Cette dernière fraction fait ensuite l'objet de deux autres distillations (colonnes de distillation 4 et 5) pour séparer les trois xylènes isomères (orthoxyène, métaxylène et paraxylène). L'orthoxyène et le métaxylène ayant des points d'ébullition très similaires, ils seront éventuellement séparés par cristallisation, car le métaxylène a une plus grande importance industrielle en tant que produit intermédiaire et précurseur que l'orthoxyène.

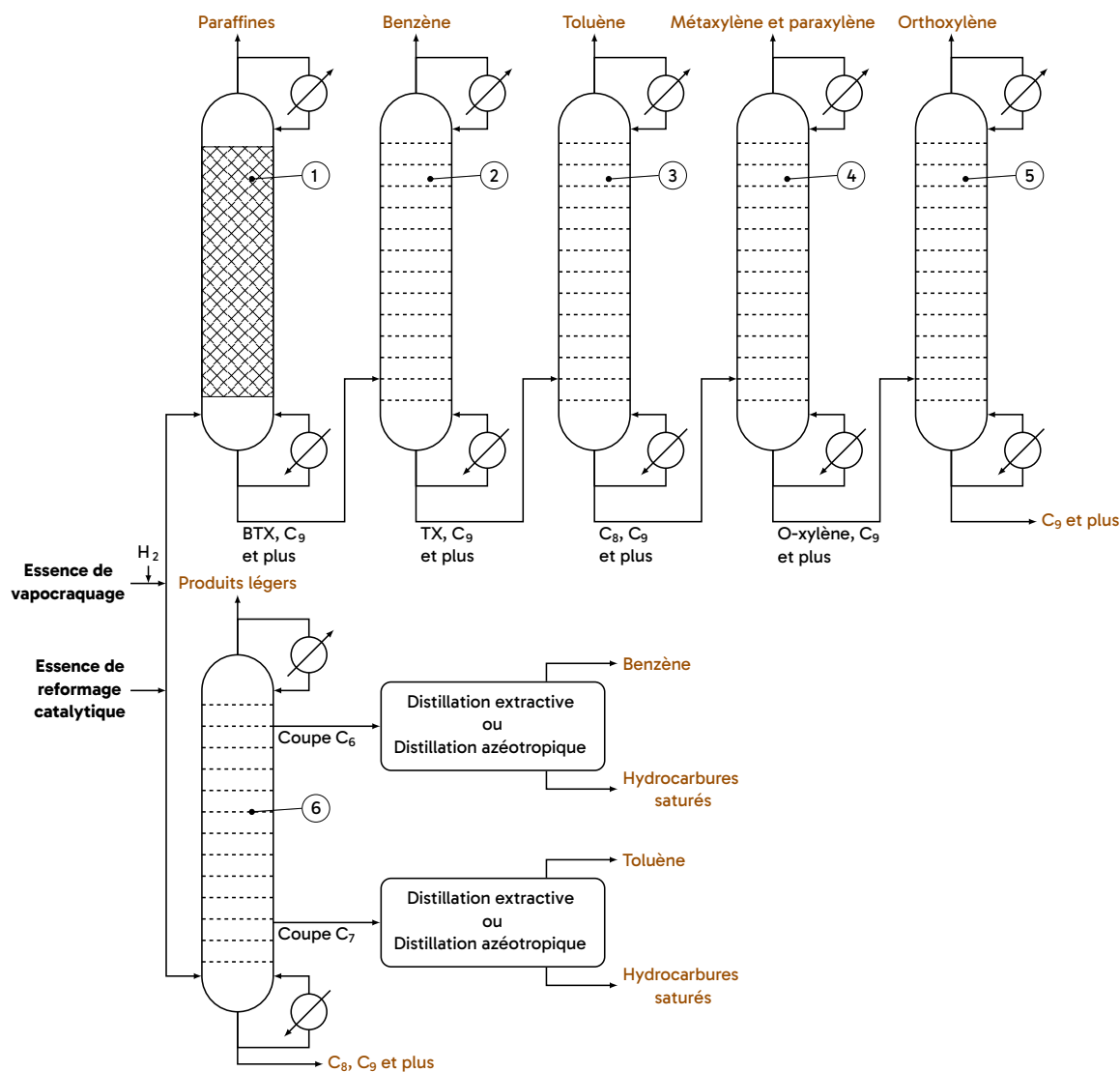


Figure 7.2 Schéma de la production industrielle de la fraction BTX
(1 = colonne d'extraction liquide-liquide; 2, 3, 4, 5 et 6 = colonnes de distillation)

Lorsque la charge d'alimentation du procédé BTX est constituée d'essence issue du reformage catalytique, on effectue d'abord une distillation classique (colonne de distillation 6), laquelle permet de séparer les fractions C_6 , C_7 , etc. Par la suite, on procède à la séparation des fractions C_6 et C_7 , soit par distillation extractive, soit par distillation azéotropique, deux techniques de séparation particulières.

Pour modifier la volatilité relative de constituants dans la fraction C_6 (ou C_7), on additionne un **solvant d'extraction** qui forme un binaire proche de l'idéalité avec l'un des constituants et un binaire assez éloigné de l'idéalité avec les autres composants. Étant donné qu'ils ont des points d'ébullition très différents, les deux nouveaux mélanges binaires formés se sépareront facilement.

Parmi les trois hydrocarbures aromatiques présents dans la fraction BTX, le benzène est le plus recherché en raison de ses nombreuses utilisations. Le schéma de la **figure 7.3** présente une énumération non exhaustive des principales voies de transformation du benzène en produits intermédiaires et finis.

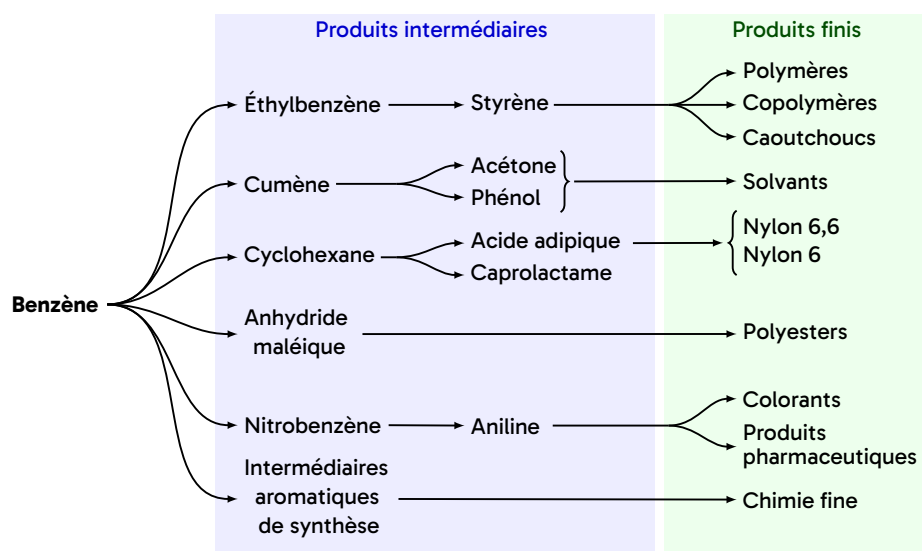


Figure 7.3 Principales voies de transformation du benzène en produits intermédiaires et finis

7.2.2 Solvants organiques

Cyclohexane

Le cyclohexane est un cycloalcane liquide, insoluble dans l'eau, mais miscible avec la plupart des solvants organiques. Puisque sa toxicité est faible comparativement à celle du benzène, il est préféré comme solvant dans les synthèses qui pourraient employer les deux composants à titre de milieu réactionnel. L'industrie chimique organique produit le cyclohexane (C_6H_{12}) majoritairement au moyen de l'hydrogénation du benzène (C_6H_6), dont la réaction peut être représentée comme suit :



Cette réaction est une réaction exothermique d'équilibre. Pour que l'équilibre se déplace dans le sens de la formation du cyclohexane, il est nécessaire de travailler à température modérée (entre 200 et 300 °C) et à haute pression (de 20 à 40 atm). Elle peut être réalisée soit en phase liquide, soit en phase gazeuse. Lorsque la réaction se déroule en phase liquide, deux réacteurs sont nécessaires : un premier fonctionnant en phase liquide et un deuxième, en phase gazeuse (c'est le cas du procédé illustré à la [figure 7.4](#)). Lorsque la réaction se déroule en phase gazeuse, plusieurs réacteurs, fonctionnant tous en phase gazeuse, doivent être disposés en série. À l'échelle industrielle, le catalyseur employé est un métal rare (platine, palladium ou nickel) déposé sur un support de silice.

Le schéma présenté à la [figure 7.4](#) est représentatif du procédé industriel le plus employé mondialement pour fabriquer le cyclohexane. Les matières premières (le benzène en phase liquide et l'hydrogène neuf et recyclé du procédé) sont introduites dans le réacteur d'hydrogénation mélangé principal (1), puis maintenues à une température d'environ 200 °C et à une pression de 40 atm. La réaction d'hydrogénation est complétée dans un réacteur de finition (4), un lit fixe fonctionnant en phase gazeuse avec un catalyseur de nickel sur support d'alumine. L'évacuation de l'énergie thermique dégagée par l'hydrogénation (dans les réacteurs 1 et 4) et par stabilisation (dans la colonne 7) se réalise à l'aide des échangeurs de chaleur (2, 5 et 8). Les produits finaux de la réaction d'hydrogénation du benzène sont constitués majoritairement du cyclohexane et, en faibles proportions, de sous-produits légers tels que le méthane. L'hydrogène n'ayant pas réagi est séparé dans le séparateur (6) et recyclé dans le réacteur (1). On le purge partiellement avec les produits légers afin de le maintenir à une pureté acceptable. La séparation du cyclohexane des sous-produits légers est effectuée à l'aide de deux séparateurs de phase liquide-vapeur (6 et 9) placés à la sortie du réacteur de finition (4) et de la colonne de stabilisation (7).

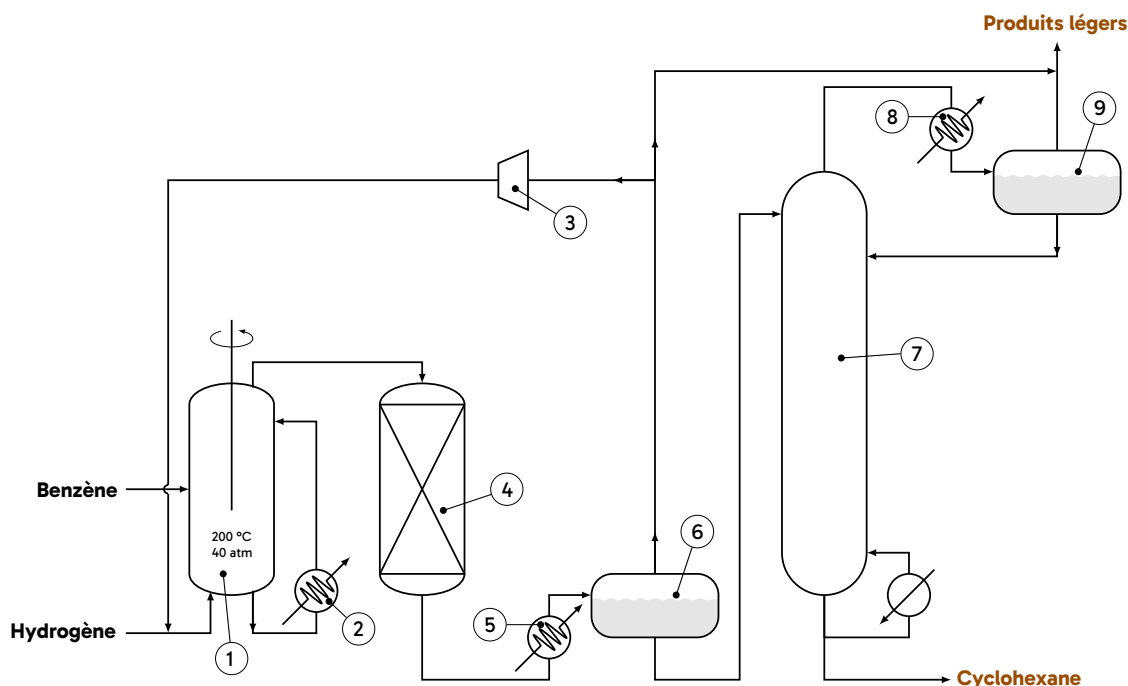


Figure 7.4 Schéma de la fabrication industrielle du cyclohexane (1 = réacteur d'hydrogénation en phase liquide; 2, 5 et 8 = réfrigérants; 3 = compresseur; 4 = réacteur d'hydrogénation en phase vapeur; 6 et 9 = séparateurs gaz-liquide; 7 = colonne de stabilisation)

Le cyclohexane trouve de nombreuses applications industrielles, dont les suivantes :

- › Solvant de différentes matières : graisses, huiles, résines, bitumes, etc.
- › Solvant d'extraction des huiles essentielles
- › Solvant de formulation de colles, de peintures et d'encre d'imprimerie
- › Diluant pour la provocation de certaines réactions de polymérisation
- › Matière première pour la fabrication de l'acide adipique, du caprolactame et des produits intermédiaires qui serviront à produire des polyamides de type nylon 6 et nylon 6,6

Méthanol

Le méthanol (CH_3O) est le plus simple des alcools aliphatiques et l'une des plus importantes matières premières organiques du secteur industriel. Sa production mondiale est impressionnante : elle s'élève actuellement à plus de 160 millions de tonnes par année. Quelques-unes de ses propriétés et caractéristiques physiques sont présentées au [tableau 7.4](#).

Tableau 7.4 Quelques propriétés et caractéristiques du méthanol

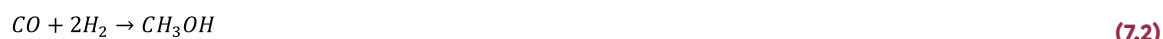
Caractéristique	Description
Dénominations	<ul style="list-style-type: none"> • Méthanol • Alcool méthylique • Hydrate de méthyle • Alcool de bois • Carbinol • Esprit de bois • Alcool à brûler
État physique	<ul style="list-style-type: none"> • Liquide incolore et volatil • Odeur plutôt agréable quand il est pur
Solubilité	<ul style="list-style-type: none"> • Miscible avec l'eau en toutes proportions • Miscible avec la plupart des solvants organiques
Propriété	Valeur
Masse molaire	32,04 g/mol
Point d'ébullition	64,5 °C
Point de fusion	-97,8 °C
Tension de vapeur	12,3 kPa à 20 °C
Densité (à 20 °C)	0,7915 g/cm ³

Initialement, le méthanol était produit par la distillation destructive du bois. Actuellement, trois sources sont utilisées pour le produire :

- › Le gaz de synthèse – environ 52% de la production mondiale
- › Le charbon – environ 45% de la production mondiale
- › La biomasse – environ 3% de la production mondiale

Dans ce qui suit, nous ne décrivons que le procédé industriel employant le gaz de synthèse comme matière première, car il s'agit du plus employé mondialement.

Le gaz de synthèse est un mélange de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂), d'hydrogène (H₂) et de vapeur d'eau. Il est issu de la conversion du gaz naturel. Le méthanol peut être obtenu comme produit à la suite de deux réactions qui ont lieu entre les composants du gaz de synthèse, réactions représentées par les formules suivantes :



En présence d'un catalyseur industriel de type Cu-ZnO-Al₂O₃ (cuivre dispersé dans un mélange d'oxyde de zinc et d'alumine amorphe), la production du méthanol est préférablement effectuée à partir du dioxyde de carbone en suivant la **réaction 7.3**. L'usage de ce type de catalyseur dans le secteur industriel nécessite que les concentrations en soufre et en chlore dans le gaz de synthèse alimentant le procédé soient les plus faibles possibles pour minimiser la désactivation du catalyseur.

Le schéma illustrant la production du méthanol à partir du gaz de synthèse est présenté à la **figure 7.5**, à la page suivante. La charge d'alimentation de ce type de procédé est constituée d'un mélange de gaz de synthèse désulfuré et de CO₂ d'appoint. L'ajout du CO₂ est nécessaire pour atteindre un rapport précis entre les concentrations des composants à l'entrée. Ce rapport favorisera la formation du méthanol seulement suivant la **réaction 7.3**.



La charge d'alimentation passe par deux compresseurs installés en cascade (1), puis elle est injectée dans le réacteur adiabatique à lit catalytique fixe (2). Ce réacteur fonctionne à une température d'environ 225 °C et à une pression de 50 atm. Sa construction en acier inoxydable lui permet de résister à la corrosion causée par la formation des acides organiques comme sous-produits de la synthèse du méthanol.

Le mélange, qui est formé du produit désiré (méthanol) et des sous-produits (lourds et légers), est refroidi à l'aide du réfrigérant (3) avant de passer dans le séparateur de phases liquide-vapeur (4). La phase gazeuse, séparée du mélange réactionnel, est réinjectée dans la charge d'alimentation. La phase liquide est acheminée dans deux colonnes de distillation placées en série, afin que le méthanol soit séparé des composants légers et lourds. Dans la colonne de distillation (5), le distillat (tête de la colonne) est composé de produits légers; le résidu (fond de la colonne), d'un mélange de méthanol et de composants lourds. Ce résidu est alimenté dans la colonne de distillation suivante (6), laquelle permettra de séparer le méthanol pur, qui se retrouvera en tête de colonne, des composants lourds, qui resteront au fond. Parmi les produits légers, on retrouve le plus souvent l'acétone ($\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$) et le diméthyléther ($\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$). Parmi les produits lourds, on compte fréquemment les acides organiques (formique et acétique), les esters ainsi que les alcools à longue chaîne. Selon la littérature spécialisée, un seul passage du gaz de synthèse dans le réacteur catalysé, dans les conditions précisées ci-dessus, permettrait l'atteinte d'un taux de conversion global de 90%.

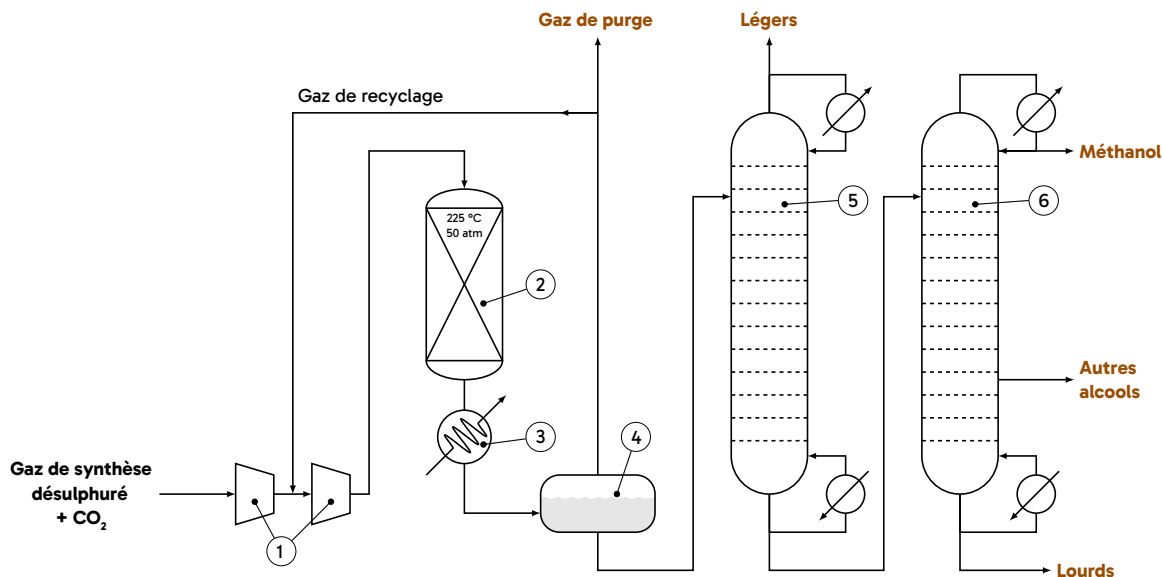


Figure 7.5 Schéma de la production industrielle du méthanol (1 = compresseurs en cascade; 2 = réacteur; 3 = réfrigérant; 4 = séparateur de phase gaz-liquide; 5 et 6 = colonnes de distillation à plateaux)

Les applications industrielles du méthanol sont nombreuses. En plus d'être un constituant des carburants spéciaux et d'agir comme solvant (peintures, vernis, encres, colorants, adhésifs, films), le méthanol sert de matière première pour la fabrication d'une grande variété de produits. Le schéma présenté à la figure 7.6 regroupe ses principales applications.

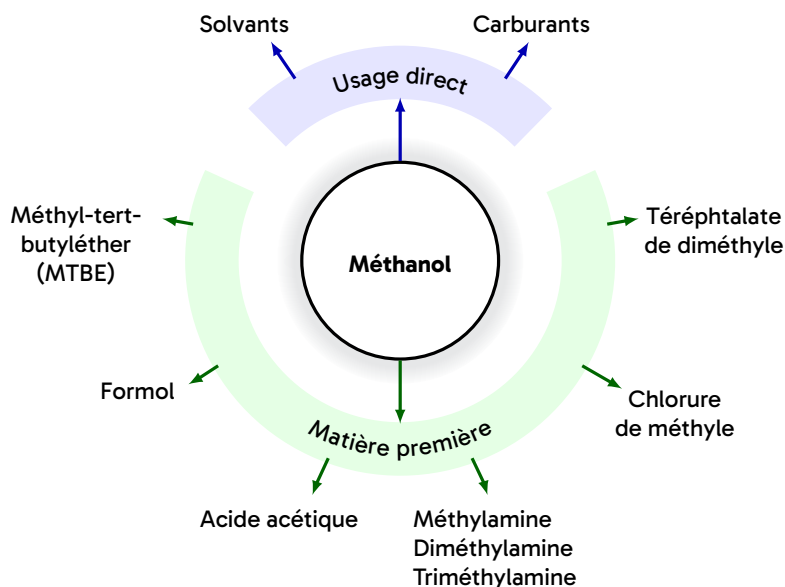


Figure 7.6 Principales applications industrielles du méthanol

7.2.3 Produits organiques divers

Formaldéhyde

Le formaldéhyde (H_2CO) est non seulement un gaz issu de la combustion partielle des substances contenant du carbone, mais aussi un composé organique volatil (COV) produit par synthèse industrielle. Quelques-unes de ses propriétés et caractéristiques physiques sont présentées au [tableau 7.5](#).

Tableau 7.5 Quelques propriétés et caractéristiques du formaldéhyde

Caractéristique	Description
Dénominations	<ul style="list-style-type: none"> • Formaldéhyde = méthanal = aldéhyde formique – gaz instable • Formol – solution de formaldéhyde dans le méthanol • Formaline (solution aqueuse de 30 à 55% massique) • Paraformaldéhyde – solide polymérisé • Trioxane – trimère cyclique du formol
État physique	<ul style="list-style-type: none"> • Gaz incolore à température ambiante • Odeur âcre et suffocante
Solubilité	<ul style="list-style-type: none"> • Miscible avec l'eau en toutes proportions • Miscible avec la plupart des solvants organiques



Tableau 7.5 Quelques propriétés et caractéristiques du formaldéhyde (*suite*)

Caractéristique	Description
Propriété	Valeur
Masse molaire	31,0 g/mol
Température d'ébullition	-19,5 °C
Température de fusion	-92 °C
Tension de vapeur	519 kPa à 25 °C
Densité de vapeur (à 20 °C)	1,06 g/cm ³

Le formaldéhyde est produit industriellement des deux manières suivantes :

- 1) L'**oxydation partielle du méthanol** en phase gazeuse, en présence d'un catalyseur de type cristaux d'argent calibrés et à haute température (700 °C), selon la réaction suivante :



- 2) L'**oxydation totale du méthanol** en présence d'un catalyseur à base d'oxydes de molybdène et de fer et à température modérée (400 °C), selon la réaction suivante :



Le catalyseur utilisé dans le procédé de synthèse du formaldéhyde joue un rôle très important. L'oxydation totale du méthanol s'effectue à des températures modérées grâce au catalyseur à base d'oxydes de molybdène et de fer, mais il présente deux inconvénients :

- 1) Il nécessite l'emploi d'un grand volume de gaz, car le méthanol est en faible concentration par rapport à l'air.
- 2) Sa réaction présente une exothermicité qui n'est pas compensée.

L'oxydation partielle du méthanol s'effectue industriellement avec des catalyseurs d'argent, qui permettent l'emploi d'une température plus élevée qu'avec les oxydes de molybdène et de fer en plus de permettre l'utilisation d'un mélange méthanol-air de composition volumique supérieure à la limite d'explosivité (36,5%). Le schéma du procédé présenté à la **figure 7.7** correspond à l'oxydation partielle du méthanol.

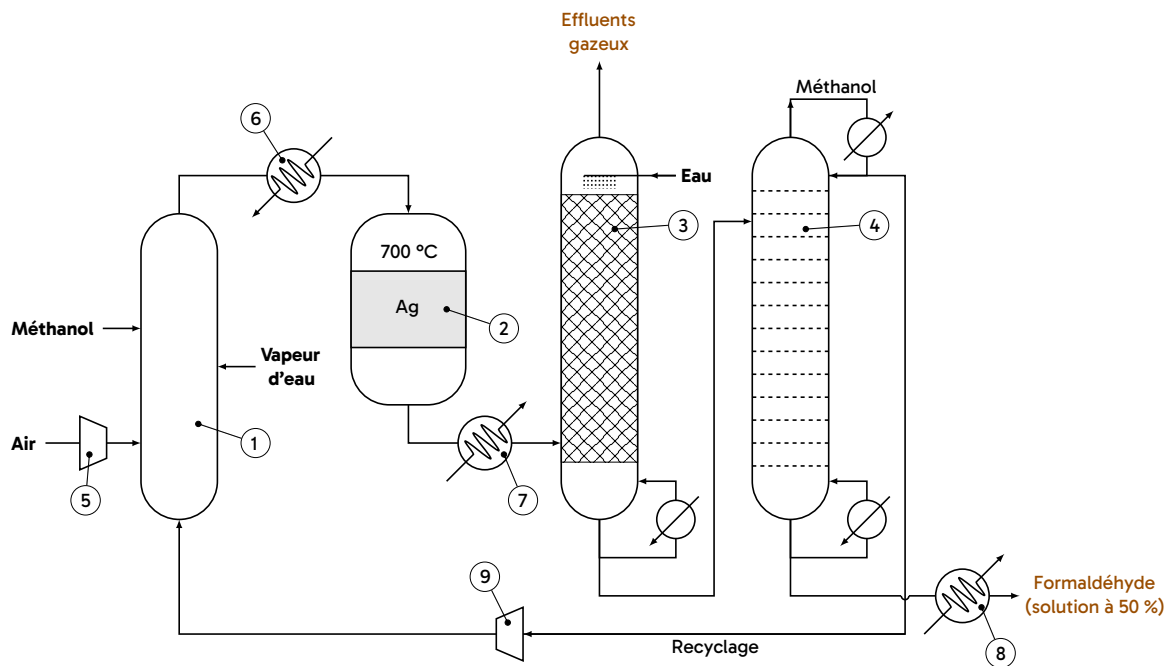


Figure 7.7 Schéma de la production industrielle du formaldéhyde (1 = colonne de vaporisation; 2 = réacteur; 3 = colonne d'absorption; 4 = colonne de distillation; 5 et 9 = compresseurs; 6 = surchauffeur; 7 et 8 = réfrigérants)

Composée de méthanol, d'air comprimé et de vapeur d'eau, la charge d'alimentation est introduite dans la colonne de vaporisation (1), qui a pour rôle de disperser de fines gouttelettes de méthanol dans un courant d'air et de vapeur d'eau. Le mélange gazeux est d'abord chauffé à l'aide du surchauffeur (6) à une température avoisinant les 700 °C. Il est ensuite introduit dans le réacteur de synthèse (2), un lit fixe contenant le catalyseur d'argent. Le mélange réactionnel qui en ressort est formé du produit désiré (formaldéhyde) et des sous-produits (méthanol n'ayant pas réagi, méthane, acide formique, éther diméthylque, etc.).

Pour la séparation du formaldéhyde des sous-produits, l'effluent passe par une colonne d'absorption remplie d'eau (3), puis par une colonne de distillation (4). Le méthanol sort comme produit de tête de la colonne de distillation et il est acheminé vers la colonne de vaporisation (1), où il sera recyclé. Le produit au fond de la colonne de distillation est constitué d'une solution aqueuse de formaldéhyde d'environ 50% massique.

Le formaldéhyde est l'un des composés organiques de base les plus utilisés par l'industrie chimique en raison de sa grande polyvalence. Cela tient au fait qu'il peut être employé à la fois comme réactif dans divers procédés menant à d'autres produits chimiques intermédiaires ou finis ainsi qu'en raison de ses propriétés comme désinfectant biologique. Le [tableau 7.6](#), à la page suivante, présente quelques exemples de ses utilisations par différentes industries.

Tableau 7.6 Exemples d'utilisations du formaldéhyde

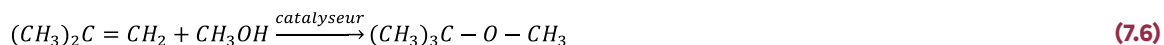
Industrie	Utilisations
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> • Intermédiaire dans la synthèse de nombreux produits : polyuréthanes, polyesters, résines thermodurcissables, explosifs, etc. • Peintures et vernis • Fabrication de fertilisants • Fabrication d'engrais • Produits d'imprimerie • Produits de photographie
Agricole	<ul style="list-style-type: none"> • Agent conservateur pour le fourrage • Insecticide • Germicide • Fongicide
Textile	<ul style="list-style-type: none"> • Apprêt anti-froissage • Teinture
Cuir	<ul style="list-style-type: none"> • Apprêt • Agent de tannage
Pâtes et papiers	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication du papier glacé • Augmentation de la résistance à l'humidité
Santé	<ul style="list-style-type: none"> • Désinfectant • Antiseptique • Additif antibactérien • Fixateur de tissus biologiques • Agent de conservation (embaumement funéraire) • Dévitalisation dentaire
Alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Nettoyant d'aliments comestibles
Fonderie	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de moules et de noyaux

Méthyl-tert-butyléther

Le méthyl-tert-butyléther (MTBE), de formule $(\text{CH}_3)_3\text{C}-\text{O}-\text{CH}_3$, est le plus utilisé des éthers, essentiellement comme additif pour carburant, car il permet d'en améliorer la combustion et de réduire les émissions de gaz d'échappement. Il doit le développement de sa production à ses propriétés physiques intéressantes :

- › Il est liquide à température ambiante et il a une durée de vie infinie au stockage, sans altération ni dénaturation.
- › Il est miscible avec les carburants, car sa solubilité est totale dans les hydrocarbures.
- › Son point d'ébullition relativement élevé (55,3 °C) lui permet de diminuer la volatilité des carburants utilisés pendant les saisons chaudes.
- › Un apport en MTBE de 10% dans un carburant en augmente l'indice d'octane (IO) de 10 unités CO.

Les matières premières nécessaires pour la synthèse du MTBE sont le méthanol et l'isobutène. La réaction de synthèse peut être provoquée en phase liquide ou en milieu biphasique gaz-liquide en présence d'un catalyseur de type résine échangeuse d'ions acide et macroporeuse. L'équation représentant cette réaction est la suivante :



Les conditions habituelles de réaction impliquent une température qui varie entre 50 et 100 °C ainsi qu'une pression allant de 10 à 15 atm. Le schéma du procédé de fabrication industrielle du MTBE est présenté à la figure 7.8.

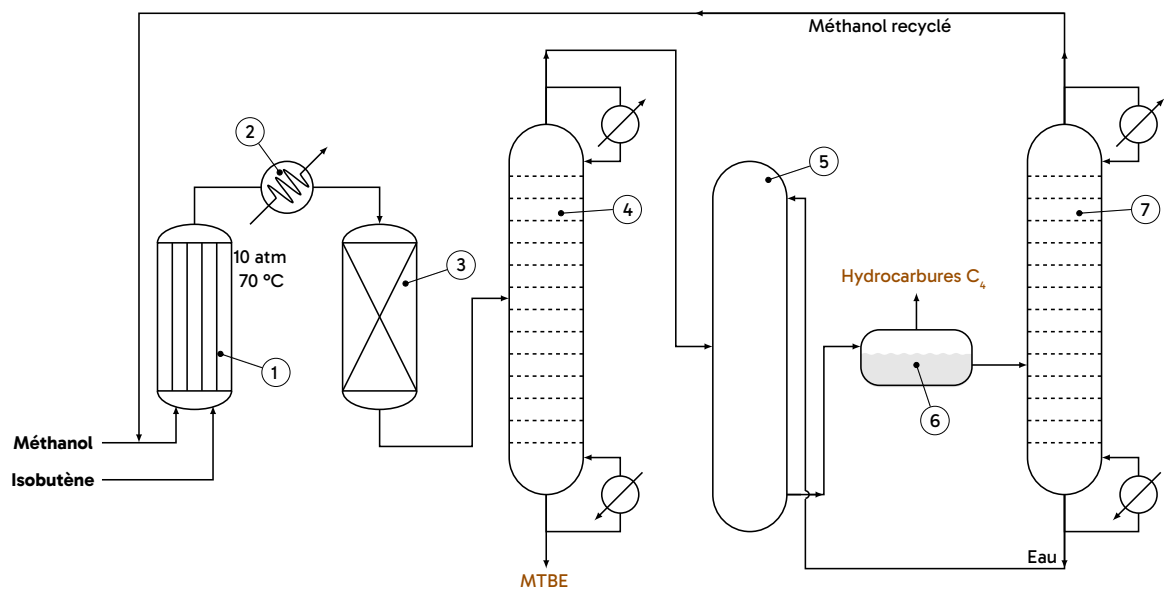


Figure 7.8 Schéma de la production industrielle du méthyl-tert-butyléther (MTBE)

(1 = réacteur tubulaire; 2 = réfrigérant; 3 = réacteur à lit fixe; 4 = colonne de distillation à plateaux; 5 = colonne de lavage; 6 = séparateur gaz-liquide; 7 = colonne de distillation à plateaux)

Le méthanol et l'isobutène sont d'abord introduits dans un réacteur tubulaire (1). Ensuite, afin d'assurer leur conversion totale, on les fait passer par un réacteur à lit fixe (3) de finition. L'effluent du réacteur (3) est dirigé vers une colonne de distillation à plateaux (4) qui permet de séparer le MTBE des autres sous-produits (méthanol n'ayant pas réagi, alcool tert-butyle, diisobutène). Le MTBE ne distille pas; il se retrouve comme résidu au fond de la colonne de distillation (4). Les sous-produits, plus légers que le MTBE, sont distillés en tête de colonne (4) et injectés dans une colonne de lavage à l'eau (5). Cette dernière colonne ainsi que le séparateur gaz-liquide (6) assurent ensuite la séparation du méthanol et des hydrocarbures en C_4 (sous-produits). La colonne de distillation à plateaux (7) sépare l'eau du méthanol, et ces deux composants sont ensuite recyclés pendant le procédé.

Le plus grand débouché en ce qui concerne le MTBE (presque 95% de sa production), c'est son utilisation comme additif pour les carburants. Les 5% restants sont destinés à servir comme solvant organique dans les synthèses et autres applications en laboratoire.

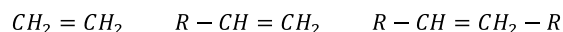
7.3 Monomères

Les monomères constituent les unités de base des polymères. Les notions concernant leur fonctionnalité ainsi que leurs possibilités d'assemblage ont été présentées au chapitre 5, à la [section 5.2](#). Il y a été précisé que la fonctionnalité d'un monomère correspond au nombre de liaisons covalentes qui peuvent se créer à la suite de la rupture de l'une de ses liaisons internes pour ensuite en permettre la liaison avec des monomères voisins. Dans cette optique, un monomère qui a une fonctionnalité égale à deux permettra d'obtenir des polymères à chaînes linéaires, tandis qu'une fonctionnalité supérieure à deux peut conduire à l'obtention de chaînes ramifiées ou réticulées.

Parmi les monomères, ceux de type oléfinique et vinylique sont les plus utilisés dans l'industrie chimique comme produits organiques de base ou pour obtenir des produits intermédiaires et finis.

7.3.1 Monomères oléfiniques

Il s'agit d'un hydrocarbure mono-insaturé de formule brute C_nH_{2n} . La structure semi-développée d'un monomère oléfinique peut être représentée comme suit :



R = radical de type alkyle aliphatique ($-CH_3$, $-C_2H_5$, etc.)

Les monomères oléfiniques les plus usuels sont l'éthylène ($CH_2 = CH_2$) et le propylène ($CH_3-CH = CH_2$). Ils se trouvent sous forme gazeuse à température ambiante et ils peuvent être obtenus par le vapocraquage des fractions pétrolières de types naphta ou gazole. Le vapocraquage est un procédé pétrochimique qui consiste à briser, sous l'action de la chaleur et en présence de vapeur d'eau, les hydrocarbures complexes contenus dans les coupes pétrolières ou dans le gaz naturel afin de produire des molécules plus simples (petites). Étant donné qu'elle est extrêmement complexe, l'unité industrielle de vapocraquage n'est pas présentée dans le cadre de ce manuel.

Éthylène

L'éthylène (C_2H_4) est un gaz commun qui est produit de manière naturelle (par les plantes, la combustion du bois, les fuites de gaz naturel, etc.). Il peut également être isolé des fractions pétrolières au moyen du vapocraquage et synthétisé par le craquage catalytique de l'alcane correspondant, l'éthane. Sa production mondiale actuelle dépasse plus de 130 millions de tonnes par année, ce qui le place au premier rang des composés organiques de base que produit l'industrie. Ce gaz présente les particularités suivantes :

- › Il s'agit d'un gaz incolore et volatil dont la masse volumique approche celle de l'air, avec lequel il forme des mélanges explosifs.
- › La présence d'une liaison double dans sa structure le rend apte à fixer aisément des réactifs dans une grande variété de réactions d'addition. Il peut être hydraté, halogéné, hydroxylé et polymérisé dans des conditions précises.
- › Son point d'ébullition étant de $-103\text{ }^\circ\text{C}$, il peut être utilisé comme réfrigérant.
- › Son mélange avec de l'eau conduit à la production de l'éthylène glycol, un réfrigérant qui est mieux adapté à la conservation à basse température que l'éthylène pur.

Ses applications sont très nombreuses et variées; elles vont de l'usage comme matière première pour la synthèse de plusieurs produits organiques intermédiaires et finis (figure 7.9) jusqu'à l'usage courant pour la maturation des fruits (agent de mûrissement de fruits) et la régulation de la croissance des plantes, en passant par son emploi comme anesthésiant chirurgical.

L'éthylène est la matière première pour la fabrication de nombreux produits organiques intermédiaires et finis. Le schéma présenté à la figure 7.9 en résume les principales utilisations dans l'industrie chimique.

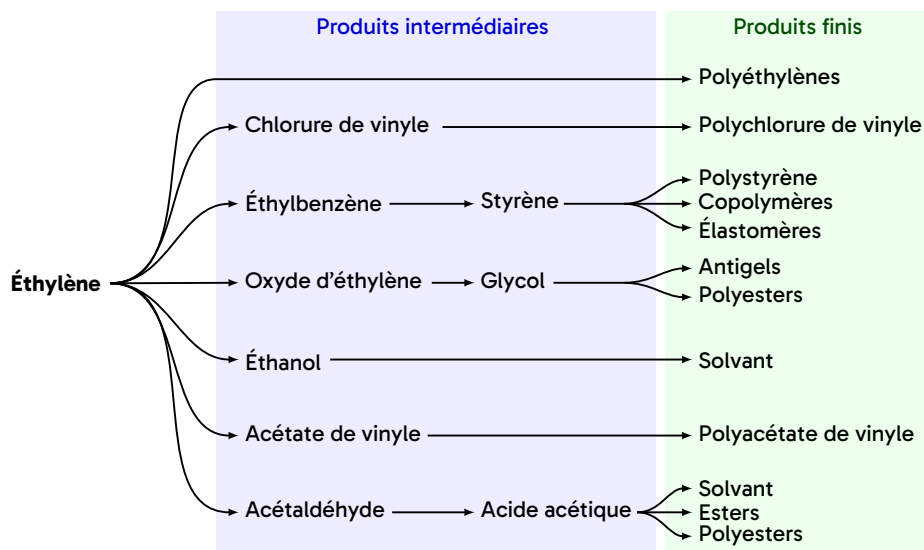


Figure 7.9 Principales utilisations de l'éthylène dans l'industrie chimique

Propylène

Le propylène (C_3H_6), ou propène, est un gaz incolore, extrêmement inflammable et à l'odeur légèrement sucrée. De la même manière que l'éthylène, il est produit industriellement par le vapocraquage de fractions pétrolières. Cependant, il peut aussi être obtenu par craquage catalytique dans les raffineries. Sa production mondiale actuelle est moins élevée que celle de l'éthylène; elle se situe autour de 1,6 million de tonnes par année. Ses particularités sont les suivantes :

- › Il se trouve de façon naturelle dans l'environnement en raison de la combustion incomplète des matières organiques, des émissions volcaniques, des rejets industriels, etc.
- › La présence d'une liaison double dans sa structure en fait un bon réactif pour les réactions d'addition, d'oxydation et de polymérisation.
- › Le propylène n'a quasiment aucun usage courant. Cependant, il est utilisé comme matière première pour la fabrication d'une très vaste gamme de produits organiques intermédiaires ou finis.

Ses applications industrielles les plus habituelles sont exposées dans le schéma de la **figure 7.10**.

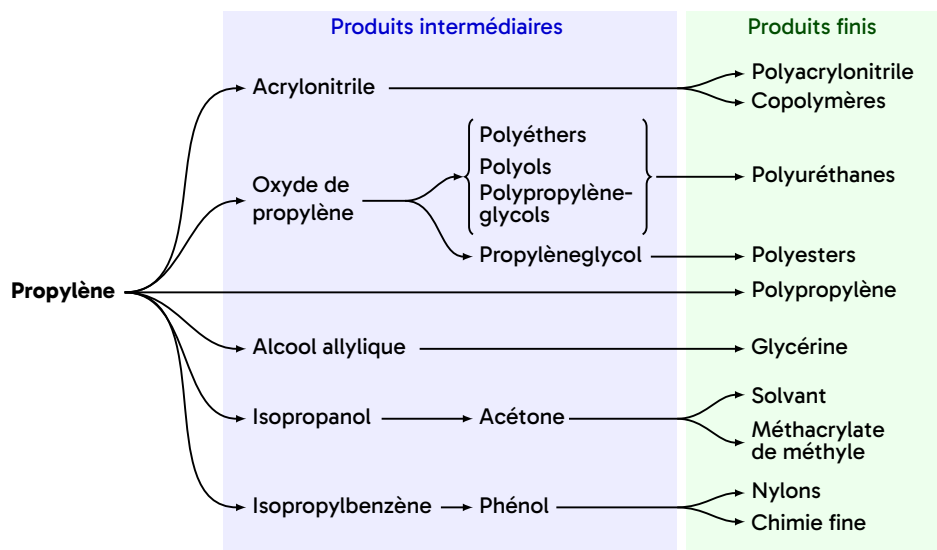


Figure 7.10 Principales utilisations du propylène dans l'industrie chimique

7.3.2 Monomères vinyliques

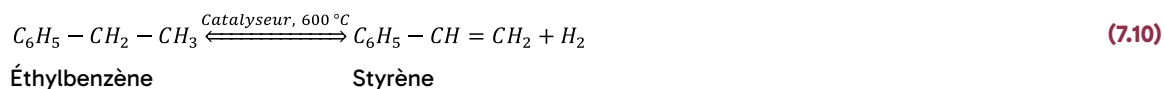
La famille des monomères vinyliques englobe les hydrocarbures mono-insaturés dérivés de l'éthylène par substitution de l'un ou de plusieurs de ses atomes d'hydrogène par un radical (de type alkényle ou aryle) ou par un groupe fonctionnel (halogène, ester, amide ou nitrile). Les monomères vinyliques les plus usuels sont présentés au **tableau 7.7**.

Tableau 7.7 Noms et formules semi-développées des principaux monomères vinyliques

Nom	Formule
Chlorure de vinyle	$CH_2 = CH - Cl$
Styrène	$CH_2 = CH - C_6H_5$
Acrylonitrile	$CH_2 = CH - CN$
Acétate de vinyle	$CH_2 = CH - OCOCH_3$
Méthacrylate de méthyle	$CH_2 = CCH_3 - OCOCH_3$
Tétrafluoroéthylène	$CF_2 = CF_2$

Styrène

Le styrène ($\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_5$) est un hydrocarbure aromatique qui ne se trouve pas de manière naturelle dans l'environnement. Il est fabriqué par l'industrie chimique. Sa production industrielle peut s'effectuer de plusieurs façons, mais le procédé qui est majoritairement utilisé à ce jour consiste à déshydrogéner l'éthylbenzène de manière catalytique, selon la réaction suivante :



Cette réaction de déshydrogénation est endothermique. Elle nécessite donc l'emploi d'une température élevée ainsi que la présence d'un catalyseur pour se produire. Le catalyseur que l'on emploie actuellement à cette fin comprend un mélange de quatre composants, dont chacun joue un rôle différent :

- 1) Le composant actif est l'oxyde de fer (Fe_2O_3) – Il abaisse l'énergie d'activation de la réaction.
- 2) Le stabilisant est l'oxyde de chrome (Cr_2O_3) – Il a le rôle d'augmenter la durée de vie du catalyseur.
- 3) L'inhibiteur de cokéfaction est l'oxyde de potassium (K_2O) – Il rend le catalyseur sélectif et empêche la cokéfaction.
- 4) Le promoteur est l'oxyde de cuivre (CuO) – Il a le rôle de changer les propriétés du composant actif.

Le schéma de procédé présenté à la **figure 7.11** correspond à la production du styrène à partir de l'éthylbenzène.

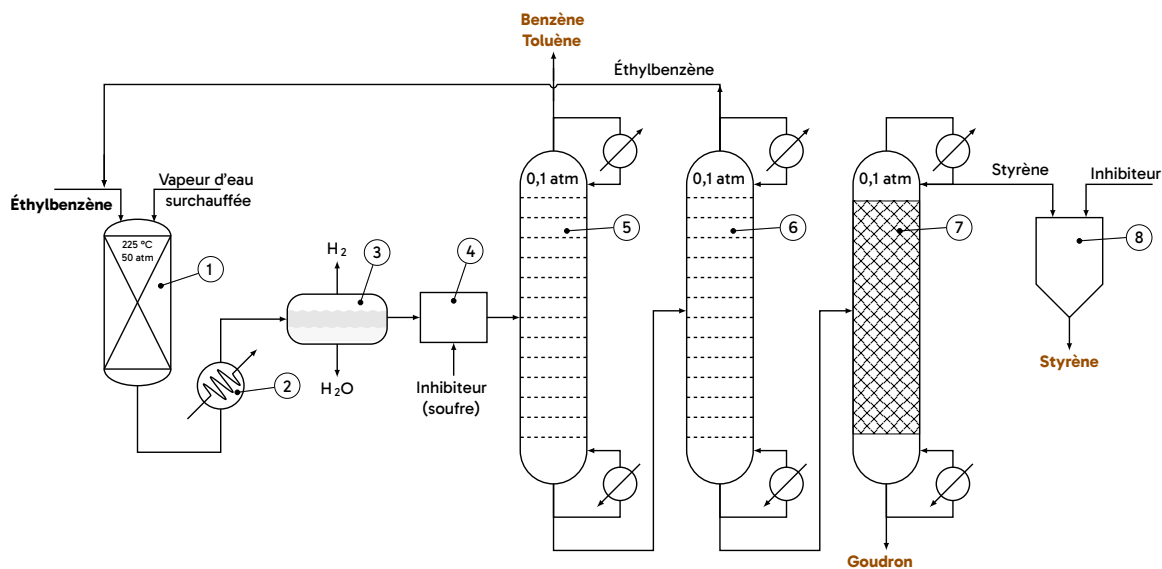


Figure 7.11 Schéma du procédé de fabrication du styrène à partir de l'éthylbenzène

Composée d'éthylbenzène et de vapeur d'eau surchauffée, la charge d'alimentation est introduite dans le réacteur de déshydrogénation à lit fixe (1), lequel est maintenu à la pression atmosphérique et à une température de 600 °C. L'emploi de la vapeur d'eau surchauffée dans la charge d'alimentation est nécessaire pour les trois raisons suivantes :

- 1) Elle apporte l'énergie calorifique essentielle au déroulement de la réaction.
- 2) Elle abaisse la pression partielle des hydrocarbures, ce qui se traduit par le déplacement de l'équilibre dans le sens de la formation du styrène.
- 3) Elle contribue à la diminution de la réaction de cokéfaction en réagissant avec le carbone formé pour conduire à la formation de monoxyde de carbone et d'hydrogène.

L'effluent du réacteur (1) est refroidi à l'aide du réfrigérant (2), avant d'être envoyé dans le séparateur triphasique gaz-liquide (3). La phase gazeuse est constituée d'hydrogène, qui est capté et stocké. La phase liquide aqueuse, plus lourde, est soutirée. La phase liquide organique, plus légère, est constituée du styrène et de quelques sous-produits aromatiques. Avant d'être envoyée à la purification, la phase liquide est additionnée d'un inhibiteur de polymérisation (soufre) dans un réservoir fermé (4) afin d'empêcher que le styrène, très réactif, se transforme en polystyrène. Le mélange ainsi formé est ensuite acheminé dans une série de deux colonnes de distillation à plateaux (5 et 6), opérées sous vide. Les produits de tête de la première colonne de distillation (5) sont le benzène et le toluène, et celui de la deuxième colonne de distillation (6) est l'éthylbenzène, qui sera recirculé dans le réacteur (1). Une troisième colonne de distillation (7), ou colonne à garnissage, est nécessaire pour séparer le styrène des goudrons. Le produit de tête de la colonne (7) est additionné d'un inhibiteur de polymérisation (4-tert-butylcatéchol), en présence d'oxygène, puis il est stocké dans un réservoir (8).

Le styrène est majoritairement utilisé pour la fabrication du polystyrène et, dans une moindre mesure, pour obtenir des copolymères comme l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) ou le caoutchouc de styrène-butadiène (SBR). Il peut être employé comme solvant pour dissoudre certaines résines et certains caoutchoucs synthétiques. En faibles proportions, le styrène peut être utilisé comme additif pour les parfums et les médicaments.

7.4 Autres produits organiques

7.4.1 Chlorofluorocarbones

Les chlorofluorocarbones (CFC) sont des composés aliphatiques dans lesquels on a remplacé un ou plusieurs atomes d'hydrogène par un halogène (fluor, chlore ou brome), par exemple : $\text{CHF}_2\text{-CH}_2\text{Cl}$, $\text{CClF}_2\text{-CH}_3$, CCl_3F , etc. Dans le commerce, les CFC sont appelés des « fréons ». Ces produits organiques sont synthétisés en raison de leur polyvalence et de leurs nombreux avantages, dont voici une liste :

- › Grandes stabilités thermique et chimique
- › Compatibilité avec la majorité des métaux, sauf le magnésium et le zinc
- › Caractère ininflammable
- › Fort pouvoir solvant pour les produits organiques et les huiles
- › Faible nocivité
- › Propriétés favorables dans les systèmes de refroidissement en raison de leur point d'ébullition bas et de leur capacité à absorber rapidement la chaleur

Cependant, leurs propriétés chimiques en font également un danger pour l'environnement. En effet, lorsqu'ils sont utilisés, les CFC se dispersent dans l'atmosphère et, sous l'action des rayons ultraviolets, ils libèrent des atomes de chlore et des radicaux libres qui sont responsables de la destruction de la couche d'ozone.

Les procédés mis en œuvre pour synthétiser les CFC comportent deux phases :

- 1) La réaction d'halogénéation
- 2) La séparation des CFC des autres sous-produits et leur purification

La réaction d'halogénéation peut être conduite des deux façons suivantes :

- › En **phase gazeuse** – Dans ce cas, la température du milieu réactionnel doit être supérieure à 250 °C, et la pression, d'environ 5 atm.
- › En **phase liquide** – Dans ce cas, la température du milieu réactionnel doit être plus faible qu'en phase gazeuse (entre 70 et 150 °C), mais la pression, plus élevée (de 10 à 35 atm).

La séparation et la purification des CFC se font au moyen d'une succession d'étapes simples comportant le lavage à l'eau et la distillation à l'aide d'une série de colonnes.

Les applications des CFC sont nombreuses :

- › Agents frigorigènes
- › Agents d'extinction pour la protection des salles d'ordinateurs contre les incendies
- › Propulseurs d'aérosols pour les cosmétiques, les produits ménagers et les peintures
- › Agents d'expansion pour les mousses plastiques
- › Solvants fluides pour le nettoyage des composants électroniques ou le nettoyage à sec des textiles
- › Matériaux d'isolation

7.4.2 Nitroparaffines

Les nitroparaffines sont des composés organiques de base appartenant à la famille des dérivés nitrés des hydrocarbures saturés. Dans leur structure, on a remplacé un ou plusieurs atomes d'hydrogène par des groupes fonctionnels de type **nitro** ($-\text{NO}_2$). Les quatre nitroparaffines les plus produites à l'échelle industrielle sont présentées au [tableau 7.8](#).

Tableau 7.8 Nitroparaffines les plus produites industriellement

Nom	Formule semi-développée
Nitrométhane	$\text{CH}_3\text{-NO}_2$
Nitroéthane	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NO}_2$
1-Nitropropane	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NO}_2$
2-Nitropropane	$(\text{CH}_3)_2\text{-CH-NO}_2$

Les nitroparaffines sont toutes obtenues de la même façon, c'est-à-dire au moyen d'une réaction de nitration entre un hydrocarbure saturé et un agent nitrant, généralement de l'acide nitrique ou du dioxyde d'azote.

Les applications principales des nitroparaffines sont les suivantes :

- › Solvants
- › Additifs pour carburants
- › Explosifs
- › Matières premières pour la synthèse de produits pharmaceutiques, de peintures, de vernis, de colorants et de polymères

7.4.3 Noir de carbone

Le noir de carbone est une forme de carbone élémentaire amorphe. Il est obtenu industriellement par la combustion partielle ou la décomposition thermique de divers types de matières premières naturelles ou synthétiques. Les procédés industriels de fabrication de ce matériau conduisent à la production de très fines particules de différentes tailles et dont l'assemblage donne des agrégats ayant des dimensions inférieures à 1 000 nanomètres. Les deux propriétés les plus importantes du noir de carbone sont sa **surface spécifique** (détermine son pouvoir colorant) et sa **structure**.

Selon la littérature spécialisée, il existe environ 35 types de noir de carbone de qualité variable qui sont utilisés comme agents de renforcement dans les caoutchoucs. Environ 80 de ses variations seraient utilisables pour toutes sortes d'applications. La teneur en carbone élémentaire dans la plupart des noirs de carbone se situe entre 97 et 99%, le restant étant constitué d'oxygène, d'hydrogène et d'azote, lesquels sont des résidus issus du procédé de fabrication.

Le **tableau 7.9** présente une liste non exhaustive des principales familles de noir de carbone ainsi que certaines de leurs caractéristiques, comme leur procédé de fabrication, les matières premières qu'il nécessite et leurs dimensions.

Tableau 7.9 Principales familles de noir de carbone et leurs caractéristiques

Type	Diamètre (nm)	Matières premières	Procédé de fabrication
Noir de fumée	50 – 100	Hydrocarbures de goudron	Combustion partielle
Noir de tunnel	10 – 30	Gaz naturel	
Noir de fourneau	10 – 80	Gaz naturel et liquide aromatique	
Noir thermique	150 – 500	Gaz naturel	Décomposition thermique
Noir d'acétylène	37 – 70	Acétylène	

Certaines des caractéristiques du noir de carbone, comme son apparence, sont semblables à celles d'autres composés tels que le graphite (naturel et synthétique), le charbon activé, la suie et le charbon de bois. Cependant, le noir de carbone et ces autres composés sont bien distinctifs; il faut donc éviter de les confondre.

Les utilisations du noir de carbone, très variées, comprennent les suivantes :

- › Agent de renforcement pour le caoutchouc, dont il augmente la résistance à la rupture, au déchirement, à l'abrasion et à l'usure
- › Pigment noir dans les encres, le ruban des machines à écrire, les peintures, les enduits, les vernis, les plastiques, etc.
- › Apprêt du cuir
- › Fabrication de matériaux de construction dont les batteries de piles sèches, les électrodes, les conducteurs électriques, etc.
- › Stabilisant dans la fabrication des polyoléfines, qu'il protège contre les rayons ultraviolets
- › Fabrication de matériaux isolants, qu'il rend résistants aux températures élevées

7.4.4 Charbon activé

Le charbon activé, ou « charbon actif », est un composé végétal (organique) ou minéral (inorganique) qui présente d'excellentes propriétés d'adsorption en raison de sa porosité élevée. On distingue ses deux types en fonction de son matériau d'origine. Le charbon activé a l'apparence d'un solide noir qui se présente sous trois formes différentes : poudre, grains, extrudés.

Il peut être obtenu à partir de toutes sortes de biomasses riches en carbone : tourbe, lignite, charbon de houille, brindilles, feuilles, coques de noix de coco, noyaux d'olives, etc. Les deux étapes nécessaires pour sa production sont les suivantes :

- 1) La calcination, ou carbonisation, de la biomasse dans un four rotatif
- 2) L'activation de la biomasse calcinée (à la vapeur d'eau, à l'oxygène ou au dioxyde de carbone) pour former son réseau de micropores (de 0,4 à 2 nm) et donc augmenter sa surface spécifique

Grâce à ses excellentes propriétés adsorbantes pour les composés apolaires et à son caractère hydrophobe, le charbon activé a de nombreuses applications :

- › Traitements industriels – purification et récupération de produits, décoloration, extraction minière, décaféination, stockage de l'hydrogène, etc.
- › Traitements dépolluants – élimination du chlore et d'autres produits toxiques des eaux résiduaires industrielles et de l'eau potable, filtration de l'air contaminé, etc.
- › Médecine et pharmacie – traitement contre les intoxications alimentaires et les gastro-entérites, purification de l'organisme par l'élimination des toxines
- › Produits cosmétiques – fabrication de masques de beauté, de dentifrices blanchissants, etc.

7.5 Notions de santé et de sécurité

On doit manipuler les produits organiques décrits dans ce chapitre en connaissant précisément les risques et les précautions liés à l'emploi de chacun d'eux, car leur degré de corrosivité, de toxicité et de nocivité dépend de leur nature chimique. Étant donné que, selon la littérature spécialisée, ces composés organiques sont presque tous (à l'exception du noir de carbone et du charbon activé) considérés comme toxiques et nocifs, on doit aussi toujours les manipuler en portant des équipements de protection individuelle (EPI) appropriés et savoir quelles mesures appliquer en cas d'accident. Le **tableau 7.10** présente des risques les concernant ainsi que les précautions à prendre au moment de leur manipulation.

Tableau 7.10 Risques et précautions à prendre lors de la manipulation des principaux produits organiques décrits dans ce chapitre

Composé	Risques	Précautions à prendre
BTX	<ul style="list-style-type: none"> • Ce sont des substances toxiques sans seuil d'exposition. • Une exposition prolongée sur le lieu de travail peut avoir des effets cancérogènes. • Leur forme liquide et leurs vapeurs sont très inflammables. • Ils peuvent causer des anomalies génétiques. • En cas d'ingestion ou d'inhalation, ils peuvent être mortels. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comme la vente et l'emploi du BTX sont strictement réglementés, connaître les risques associés à leur emploi. • Les manipuler et les stocker dans des locaux ventilés mécaniquement. • Les tenir à l'écart de toute source d'inflammation. • Faire subir aux travailleurs une évaluation annuelle concernant leur exposition à ce produit. • Éviter tout contact avec la peau et les yeux ainsi que l'inhalation des vapeurs et des aérosols.
Cyclohexane	<ul style="list-style-type: none"> • Sa forme liquide et ses vapeurs sont très inflammables. • En cas d'ingestion ou d'inhalation, il peut être mortel. • Il provoque une irritation cutanée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Informer et former les travailleurs relativement à sa manipulation et aux risques qu'il présente. • Le manipuler et le stocker dans des locaux ventilés. • Le tenir à l'écart de toute source d'inflammation. • Faire subir aux travailleurs une évaluation annuelle concernant leur exposition à ce produit.
Méthanol	<ul style="list-style-type: none"> • Il pose des risques d'incendie ou d'explosion s'il entre en contact avec de forts oxydants. • Une longue exposition peut provoquer des maux de tête, l'irritation des yeux et de la peau, des troubles gastriques ainsi qu'une déficience visuelle. • L'ingestion de quelques millilitres peut provoquer la cécité; l'ingestion de plus d'un demi-litre par kg de poids corporel est mortelle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le manipuler et le stocker dans des locaux ventilés. • Ne jamais avaler un liquide qui peut en contenir. • En cas d'ingestion, administrer des soins sur-le-champ.
Formaldéhyde	<ul style="list-style-type: none"> • Une exposition à des concentrations élevées peut causer des sensations de brûlure aux yeux, au nez et à la gorge. • Il s'agit d'une substance inflammable, corrosive, cancérogène et mutagène. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le manipuler et le stocker dans des locaux ventilés. • Connaître les règles particulières de prévention des risques d'exposition aux agents cancérogènes et mutagènes.



Tableau 7.10 Risques et précautions à prendre lors de la manipulation des principaux produits organiques décrits dans ce chapitre (*suite*)

Composé	Risques	Précautions à prendre
MTBE	<ul style="list-style-type: none"> • Sa forme liquide et ses vapeurs sont très inflammables. • Il peut causer des irritations cutanées modérées et de faibles irritations oculaires. 	<ul style="list-style-type: none"> • Éviter l'inhalation de vapeurs ou de brouillards. • Éviter tout contact avec la peau. • Le manipuler et le stocker dans des locaux ventilés.
Éthylène Propylène	<ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit de produits très inflammables. • Ils peuvent former des mélanges explosifs avec l'air. • À forte concentration, ils peuvent provoquer l'asphyxie et la mort. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les manipuler et les stocker dans des locaux ventilés. • Les tenir à l'écart de toute source d'inflammation.
Styrène	<ul style="list-style-type: none"> • Ses vapeurs peuvent être irritantes pour les yeux et les voies respiratoires supérieures. • À fortes concentrations, son inhalation peut mener à des convulsions, au coma et à la mort. • Sa forme liquide est inflammable. • Il peut accumuler une charge électrostatique par écoulement, par agitation ou par transvasement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le manipuler et le stocker dans des locaux ventilés. • Éviter tout contact avec la peau. • Le manipuler à l'écart de toute source de chaleur ou d'inflammation. • Utiliser des outils anti-étincelles.
Chlorure de vinyle	<ul style="list-style-type: none"> • Il peut s'enflammer s'il est exposé à une source d'inflammation. • Il peut exploser si ses vapeurs sont mélangées avec l'air. • Dans le cas d'une intoxication, il cause une dépression du système nerveux central. • Il est cancérigène. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le manipuler et le stocker dans des locaux ventilés. • Éliminer toute source d'inflammation.
CFC	<ul style="list-style-type: none"> • Une exposition à des concentrations élevées peut provoquer une irritation des voies respiratoires. • L'inhalation sur une période prolongée provoque l'asthme et d'autres maladies respiratoires. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le manipuler et le stocker dans des locaux ventilés.
Nitroparaffines	<ul style="list-style-type: none"> • Elles peuvent former des mélanges explosifs avec les oxydants forts. • En cas d'inhalation, elles provoquent l'irritation des voies respiratoires. • En cas d'intoxication grave, elles provoquent un œdème et une hémorragie pulmonaires. 	<ul style="list-style-type: none"> • Éviter tout contact avec la peau. • Les manipuler et les stocker dans des locaux ventilés. • Utiliser des outils non métalliques.

7.6 Exercices

A Exercices de révision

- A.1** Comment peut-on définir un composant organique?
- A.2** Nommez les caractéristiques des produits organiques.
- A.3** Énumérez les matières premières naturelles utilisées par l'industrie chimique organique.
- A.4** Quelles sont les quatre principales catégories de composés organiques fabriqués actuellement par l'industrie chimique mondiale?
- A.5** Nommez les deux sources pétrolières potentielles pour produire la fraction appelée « BTX ».
- A.6** Expliquez brièvement de quelle manière est fabriquée la fraction BTX de manière industrielle.
- A.7** Énumérez quelques applications industrielles du benzène.
- A.8** Écrivez l'équation représentant la synthèse du cyclohexane à partir du benzène et précisez les conditions opératoires nécessaires pour la réaliser : température, pression, type de catalyseur (s'il y a lieu).
- A.9** Énumérez quelques applications industrielles du cyclohexane.
- A.10** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production industrielle du cyclohexane à partir du benzène.
- A.11** Énumérez les trois types de matières premières qui peuvent servir à la production industrielle du méthanol.
- A.12** Le méthanol peut être obtenu comme produit à la suite de deux réactions qui ont lieu entre les composants du gaz de synthèse. Écrivez l'équation de ces réactions.
- A.13** Décrivez, avec le plus de détails possible, la production industrielle du méthanol à partir du gaz de synthèse.
- A.14** Énumérez quelques applications industrielles du méthanol.
- A.15** Nommez les deux manières de produire du formaldéhyde et écrivez ensuite l'équation des réactions correspondantes.
- A.16** Énumérez quelques applications industrielles du formaldéhyde.
- A.17** Écrivez le nom du composé organique qui correspond à l'abréviation « MTBE ».
- A.18** Décrivez, avec le plus de détails possible, le procédé industriel de fabrication du MTBE.
- A.19** Énumérez quelques applications industrielles du MTBE.
- A.20** Quels sont les deux monomères oléfiniques les plus produits industriellement?
- A.21** Quels sont les deux monomères vinyliques les plus produits industriellement?
- A.22** Énumérez quelques applications industrielles de l'éthylène.
- A.23** Énumérez quelques applications industrielles du propylène.
- A.24** Énumérez quelques applications industrielles du styrène.
- A.25** Décrivez, avec le plus de détails possible, le procédé industriel de fabrication du styrène.
- A.26** Énumérez quelques applications industrielles du chlorure de vinyle.
- A.27** Écrivez le nom de la famille des composés organiques qui correspond à l'abréviation « CFC ».
- A.28** Énumérez les qualités des CFC qui ont mené à sa production à l'échelle industrielle et qui lui permettent d'avoir de nombreuses applications.
- A.29** Énumérez quelques applications industrielles des paraffines.
- A.30** Énumérez quelques applications industrielles des noirs de carbone.
- A.31** Énumérez quelques applications industrielles du charbon activé.

B Exercices de réflexion

- B.1** Donnez trois exemples de produits intermédiaires et trois exemples de produits finis dont la matière première est le benzène.
- B.2** Parmi les trois composés organiques qui forment la fraction BTX, lequel est le plus produit industriellement et trouve le plus d'applications dans la synthèse ultérieure des produits intermédiaires et finis?
- B.3** Pourquoi l'usage du catalyseur de type $\text{Cu-ZnO-Al}_2\text{O}_3$, employé dans le procédé de fabrication du méthanol, nécessite-t-il que les concentrations en soufre et en chlore soient les plus faibles possibles dans la charge d'alimentation?
- B.4** Pourquoi ajoute-t-on du CO_2 au gaz de synthèse désulfuré qui alimente le procédé de fabrication du méthanol si ce gaz en contient déjà?

C Exercices d'application

- C.1** Nommez le procédé industriel illustré à la **figure 7.12**, les composants du schéma numérotés de 1 à 6 ainsi que les effluents qui ne sont pas précisés sur les flèches de sortie de chaque courant.

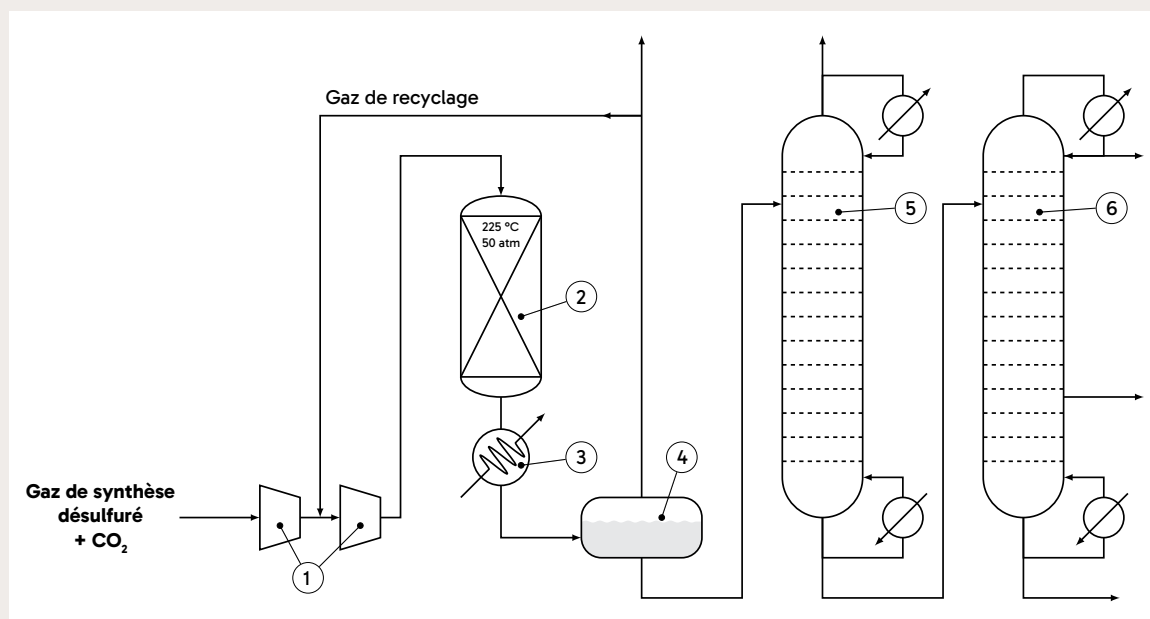


Figure 7.12 Schéma d'un procédé industriel de fabrication d'un composé organique à identifier

C.2 Nommez le procédé industriel illustré à la **figure 7.13**, les composants du schéma numérotés de 1 à 9 ainsi que les effluents qui ne sont pas précisés sur les flèches de sortie de chaque courant.

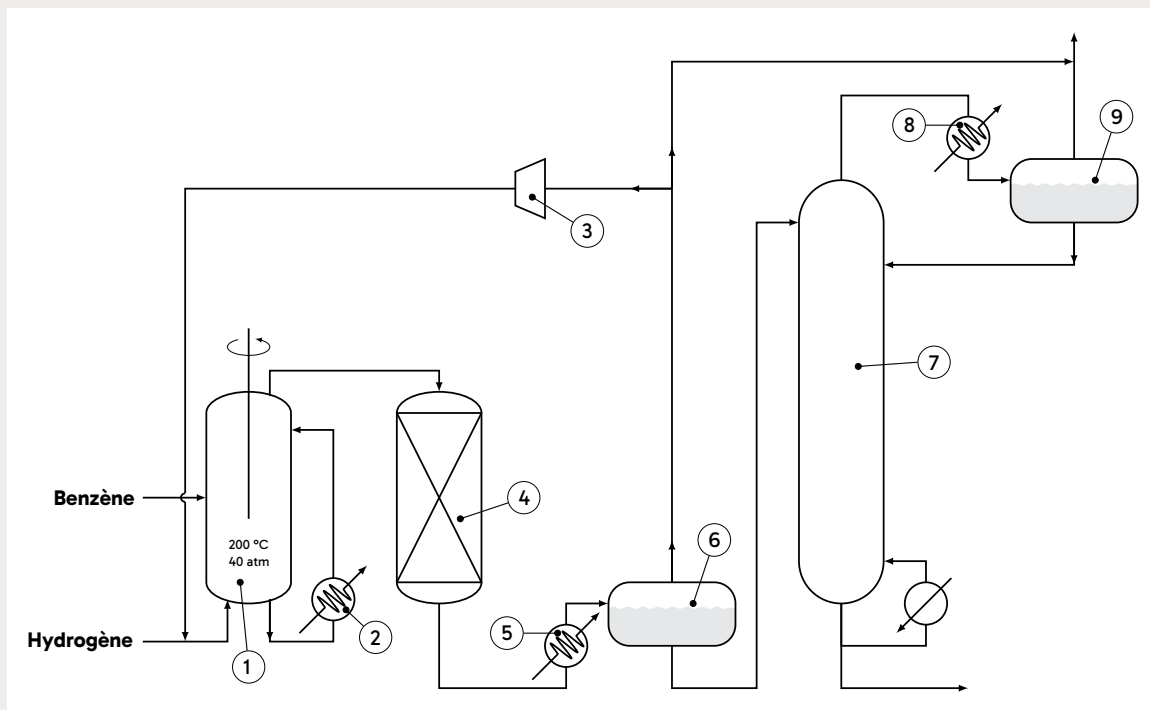


Figure 7.13 Schéma d'un procédé industriel de fabrication d'un composé organique à identifier

Chapitre 8

Productions métallurgiques



Salle de cuves d'électrolyse de l'aluminerie Alcoa Deschambault

Sommaire

8.1 Introduction	246
8.1.1 Définitions et terminologie	246
8.1.2 Généralités	247
8.2 Aluminium	249
8.2.1 Généralités	249
8.2.2 Caractéristiques de l'aluminium et de ses alliages	252
8.2.3 Procédé de fabrication de l'aluminium	254
8.2.4 Traitements de surface de l'aluminium	256
8.3 Cuivre	258
8.3.1 Généralités	258
8.3.2 Caractéristiques du cuivre et de ses alliages	259
8.3.3 Procédé de fabrication du cuivre	260
8.4 Usages des métaux et des alliages	264
8.5 Notions de santé et de sécurité	267
8.6 Exercices	268

8.1 Introduction

Le secteur métallurgique québécois compte des milliers d'usines de première et de deuxième transformation des métaux (ferreux et non ferreux). En raison de l'étendue du sujet et du cadre restreint du présent manuel, seuls les deux métaux les plus produits par le secteur métallurgique non ferreux québécois seront abordés dans ce chapitre : l'aluminium et le cuivre. Après avoir introduit les définitions et la terminologie spécifiques à l'industrie métallurgique, nous présenterons quelques généralités concernant ce secteur particulier. Les généralités, les caractéristiques ainsi que les procédés types qui touchent l'aluminium et le cuivre constituent la majeure partie de ce chapitre. Pour l'aluminium, nous aborderons les traitements de surface les plus employés par l'industrie, puis quelques usages des métaux extraits et exploités au Canada. Des notions de santé et de sécurité propres au secteur métallurgique seront exposées avant la section des exercices de révision, de réflexion et d'application.

8.1.1 Définitions et terminologie

La terminologie spécifique aux productions métallurgiques et les définitions qui y sont rattachées sont les suivantes :

- › *Affinage* = procédé qui consiste à augmenter la pureté d'un métal;
- › *Alumine* = oxyde d'aluminium (Al_2O_3) qui est transformé, par électrolyse, en aluminium primaire;
- › *Aluminium* = métal le plus abondant de l'écorce terrestre et possédant une combinaison unique de propriétés : léger, souple, malléable, ductile, résistant à la corrosion, bon conducteur d'énergie et de chaleur, recyclable à l'infini;
- › *Aluminium primaire* = aluminium brut produit par l'électrolyse de l'alumine;
- › *Aluminium secondaire* = aluminium produit par la refonte de l'aluminium recyclé;
- › *Alliage métallique* = mélange homogène solide d'un métal et d'autres substances (métalliques ou non métalliques);
- › *Anodisation* = technique de dépôt électrolytique d'une couche d'oxyde d'aluminium sur la surface de l'aluminium afin de la protéger de la corrosion;
- › *Anodisation dure* = traitement de surface de l'aluminium qui vise à déposer à la surface du métal une couche résistante à l'abrasion;
- › *Bauxite* = minerai qui contient plusieurs composants, principalement de l'alumine et des oxydes de fer;
- › *Bronze* = alliage binaire composé de cuivre et d'étain;
- › *Corroyage* = déformation à chaud d'un alliage métallique;
- › *Cuivre* = métal de transition très abondant dans la croûte terrestre sous forme de sels métalliques;
- › *Écrouissage* = déformation à froid d'un alliage métallique;
- › *Laiton* = alliage binaire composé de cuivre et de zinc;
- › *Laquage* = traitement de surface d'un métal qui consiste à appliquer une couche de peinture (laque) sur sa surface;
- › *Métal* = élément chimique d'apparence généralement lustrée (éclat métallique), bon conducteur de chaleur et d'électricité, avec une aptitude marquée à former des oxydes basiques et des cations;
- › *Métallurgie* = ensemble des procédés de fabrication, de mise en forme et de traitement des métaux et de leurs alliages;

- › *Première transformation des métaux* = étape de production d'un métal brut à partir d'un minerai, de la fonte brute ou de la ferraille au moyen de la fonte ou de l'affinage dans de hauts fourneaux ou des fours électriques;
- › *Deuxième transformation des métaux* = étape de transformation d'un métal brut en un bien d'usage précis;
- › *Sidérurgie* = branche de la transformation des métaux qui s'intéresse à la production du fer et de ses alliages;
- › *Traitements de surface* = ensemble de techniques chimiques, électrochimiques ou mécaniques qui peuvent être appliquées à un métal afin de modifier certaines de ses propriétés.

8.1.2 Généralités

L'industrie métallurgique au Québec est hétérogène et très énergivore (elle constitue environ 47,5% de la consommation industrielle d'électricité), car elle est composée d'un éventail d'entreprises de première et de deuxième transformation des métaux. Elle s'avère indispensable à l'économie de la province, aux innovations, aux nouvelles sources d'énergie et à l'écosystème industriel local. Les principaux métaux bruts et alliages générés par les entreprises québécoises de la première transformation sont : l'aluminium, le fer, l'acier, le cuivre, le zinc, le lithium, le titane, les métaux précieux (or, argent, platine, etc.) et les ferro-alliages.

Ces métaux ou alliages sont produits en lingots ou sous forme liquide. Les lingots, après laminage et étirage, serviront à fabriquer des barres, des tiges, des fils, des feuilles et des rubans métalliques. Les métaux liquides sont coulés dans des moules pour fabriquer certains produits métalliques de base. Les entreprises québécoises de la deuxième transformation produisent une multitude de biens destinés à différents usages : construction, transport, emballage, électricité, télécommunications, etc. Elles sont situées dans les régions suivantes :

- › Montérégie
- › Saguenay–Lac-Saint-Jean
- › Côte-Nord
- › Abitibi-Témiscamingue
- › Mauricie
- › Montréal

L'industrie métallurgique comporte trois spécialités principales :

- › La sidérurgie, soit la production d'acier et d'alliages ferreux
- › La production de métaux non ferreux et non précieux, comme l'aluminium et le cuivre
- › La production de métaux précieux, comme l'or

Chef de file, le Québec extrait et transforme près de 7% de l'aluminium à l'échelle mondiale, en plus du fer, du cuivre, du zinc et de beaucoup d'autres métaux. Le **tableau 8.1** présente les principaux métaux extraits et transformés par l'industrie métallurgique québécoise ainsi que quelques-unes de leurs caractéristiques.

Tableau 8.1 Caractéristiques des principaux métaux exploités par l'industrie métallurgique québécoise

Métal	Caractéristiques
Aluminium (Al)	<ul style="list-style-type: none"> • Métal de couleur blanche ou gris argenté, très abondant dans la nature • Ductile, malléable, élastique, léger, bon conducteur et résistant à la corrosion • Imperméable à l'air, à l'eau, aux rayons UV et aux micro-organismes • Recyclable à l'infini
Fer (Fe)	<ul style="list-style-type: none"> • Métal de couleur argentée • Ductile, malléable et non résistant à la corrosion (rouille facilement) • Métal le plus utilisé, surtout sous forme d'alliages
Cuivre (Cu)	<ul style="list-style-type: none"> • Métal de couleur rouge-brun • Ductile, malléable, lourd et non résistant à la corrosion (devenir vert) • Excellente conductibilité thermique et électrique • Antimicrobien • Recyclable à l'infini • Utilisé pour former plusieurs centaines d'alliages
Lithium (Li)	<ul style="list-style-type: none"> • Métal de couleur gris argenté • Mou et le plus léger des éléments solides • Très vulnérable à l'oxydation au contact de l'air et de l'eau (doit être conservé dans l'huile)
Or (Au)	<ul style="list-style-type: none"> • Métal précieux de couleur dorée • Ductile, malléable, lourd et résistant à la corrosion • Très bonne conductivité • Non toxique pour l'organisme humain
Zinc (Zn)	<ul style="list-style-type: none"> • Métal très brillant de couleur gris-blanc • Rigide, malléable et résistant à la corrosion • Utilisé sous forme d'alliages

Étant donné leur production importante et leur place principale dans l'industrie métallurgique québécoise et mondiale, l'aluminium et le cuivre seront les deux seuls métaux, parmi l'ensemble de ceux retrouvés au **tableau 8.1**, qui seront détaillés dans ce chapitre, aux **sections 8.2** et **8.3**.

8.2 Aluminium

8.2.1 Généralités

À l'état natif, l'aluminium se trouve sous forme d'oxyde d'aluminium hydraté, mélangé à de la silice et à des oxydes de fer dans une roche sédimentaire de type minéral rouge, la bauxite. L'exploitation de la bauxite, matière première pour la production de l'aluminium, se fait par le creusement de mines, de galeries ou de carrières à ciel ouvert. Parmi les différents types de bauxite qu'on exploite mondialement, il y a la bauxite blanche, rouge et grise. Ces trois variations ont des teneurs en silice et en oxydes de fer qui diffèrent les unes des autres et elles ont divers usages. Par exemple, la bauxite blanche est la plus riche en silice et elle est employée en verrerie et en céramique. Les principaux pays producteurs de bauxite sont la Guinée, l'Australie, le Brésil et la Jamaïque.

Lors de sa découverte, l'aluminium a été considéré comme un métal précieux et rare en raison de son aspect et de sa légèreté. Mais il n'a pas été considéré comme tel très longtemps, car il a rapidement été répertorié par la suite comme un constituant important (8 %) de l'écorce terrestre. Même s'il a perdu son rang de métal précieux, il demeure un matériau industriel de masse et le matériau moderne par excellence parce qu'il est léger, résistant, durable, souple, malléable, conducteur et recyclable à l'infini.

Le schéma de fabrication de produits finis à base d'aluminium est représenté à la [figure 8.1](#), à la page suivante et permet d'identifier les étapes nécessaires pour produire de l'**aluminium primaire** et **secondaire**. Actuellement, la production mondiale industrielle annuelle de l'aluminium primaire et secondaire est d'environ 30 millions de tonnes. Le procédé de fabrication de l'**aluminium primaire** est composé de trois étapes impliquant des techniques et un savoir-faire spécifique :

- 1) L'extraction de la bauxite dans une mine ou dans une carrière à ciel ouvert
- 2) L'extraction de l'alumine de la bauxite au moyen d'un procédé chimique (Bayer) dans une usine chimique
- 3) La décomposition par électrolyse (procédé Hall-Héroult) de l'alumine en aluminium primaire

L'aluminium primaire ainsi obtenu est coulé dans la section de la fonderie pour créer quatre types de produits semi-finis :

- › Des plaques
- › Des billettes
- › Des lingots en T
- › Des tiges

Les produits semi-finis sont ensuite transformés par laminage ou par extrusion en produits finis d'usage courant : automobiles, avions, emballages divers, matériaux de construction, contenants, équipements divers, etc. Les déchets d'aluminium provenant de l'industrie manufacturière ou constituant les produits finis usés sont soumis à une seconde fusion dans des fours de réchauffage pour conduire à l'**aluminium secondaire**, qui pourra ensuite subir les mêmes traitements que l'aluminium primaire.

La photo présentée à la **figure 8.2** permet de visualiser la texture et la couleur des trois principaux composants qui interviennent dans la chaîne de production de l'aluminium :

- › La bauxite, la matière première
- › L'alumine, le produit intermédiaire
- › L'aluminium, le produit fini

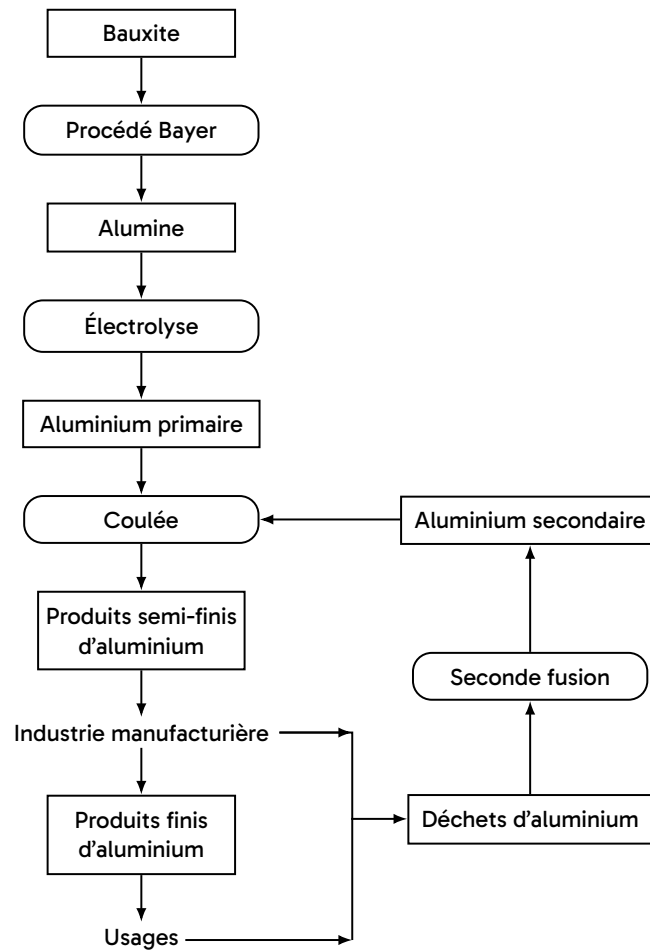


Figure 8.1 Schéma de la fabrication de produits finis d'aluminium



Figure 8.2 Photo d'une plaquette contenant les trois principaux composants intervenant dans la chaîne de production de l'aluminium

8.2.2 Caractéristiques de l'aluminium et de ses alliages

L'aluminium constitue un métal industriel de l'avenir. Il se distingue des autres métaux par un ensemble de propriétés physiques, chimiques et mécaniques uniques. Ces propriétés font de lui l'un des métaux les plus utilisés à l'échelle mondiale et, dans certaines circonstances, elles le rendent irremplaçable. De plus, elles peuvent être sensiblement modifiées au moyen de traitements thermiques ou grâce à l'ajout d'autres composants pour obtenir des alliages divers, en fonction des utilisations envisagées. Les caractéristiques de l'aluminium sont présentées au [tableau 8.2](#).

Tableau 8.2 Caractéristiques de l'aluminium

Caractéristique	Symbole ou valeur	Commentaires
Symbole chimique	Al	
Numéro atomique	13	
Masse atomique	27 g/mol	
Réseau cristallin	Cubique à faces centrées	Cet arrangement permet le glissement de ses plans structuraux et lui confère sa grande malléabilité.
Température de fusion	660 °C	La plupart de ses alliages ont une température de fusion plus basse.
Point d'ébullition	2056 °C	
Masse volumique à 20 °C	2,7 g/cm ³	Elle est environ trois fois plus faible que celle des aciers. Cette légèreté est une caractéristique importante dans les domaines de la construction et du transport.
Résistivité électrique à 20 °C	2,63 μΩ·cm	Bien que sa résistivité électrique soit inférieure d'un tiers à celle du cuivre, il est le préféré parmi les conducteurs électriques en raison de sa faible masse volumique.
Conductivité thermique à 20 °C	240 W/m·°C	Sa conductivité thermique, inférieure à celle du cuivre, mais supérieure à celle de l'acier inoxydable, est appréciable pour construire des échangeurs de chaleur et divers objets du quotidien.
Module d'élasticité	67 000 MPa	Son module d'élasticité est environ trois fois plus faible que celui des aciers, ce qui signifie que, sous les mêmes contraintes, il se déforme trois fois plus qu'une structure en acier. Cette caractéristique doit être prise en compte dans le domaine de la construction.
Pouvoir réflecteur	De 85 à 90 % dans le spectre visible, et de 90 à 98 % dans l'infrarouge	Son pouvoir réflecteur est inférieur à celui de l'argent, mais on préfère l'aluminium pour la surface des miroirs de télescopes, car il ne ternit pas.

Puisque ses propriétés mécaniques sont faibles, l'aluminium est souvent utilisé sous forme d'alliages, ce qui augmente sa résistance mécanique mais diminue d'autres propriétés. Pour trouver le meilleur compromis entre ses propriétés et l'usage désiré, les métallurgistes peuvent agir sur les éléments de l'alliage ou sur les traitements thermiques ou thermomécaniques, selon le cas. Les caractéristiques des alliages à base d'aluminium sont présentées au **tableau 8.3**.

Tableau 8.3 Caractéristiques des alliages d'aluminium

Caractéristique	Commentaires
Éléments d'alliage	Cuivre, manganèse, silicium, magnésium et zinc – seuls ou associés
Teneur en éléments d'alliage	Quelques pour cent
Corroyage (déformation à chaud)	<ul style="list-style-type: none"> • L'alliage est coulé en plaques ou en billettes, puis mis en forme à chaud par laminage, filage, forgeage ou matriçage. • Les propriétés améliorées par cette technique sont, selon les applications envisagées : la résistance mécanique, la ductilité, la conductivité électrique, la résistance à la fatigue et la résistance à la propagation des fissures.
Moulage	<ul style="list-style-type: none"> • L'alliage est coulé dans des moules, d'où sortent des produits finis. • Les améliorations apportées par cette technique sont, selon les applications envisagées : une bonne coulabilité, le peu de retrait à la solidification et l'absence de formation de fissures.
Écrouissage (déformation à froid)	<ul style="list-style-type: none"> • Cette méthode sert à durcir les métaux. • Porté à haute température, un alliage forme une solution solide (les éléments de l'alliage sont uniformément mélangés). Grâce à un refroidissement rapide (trempe), la solution solide conserve à froid la structure gagnée à haute température. Les éléments ont donc tendance à se rassembler, ce qui mène à la formation des composés intermétalliques et au durcissement du métal.
Alliages aluminium-cuivre	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance mécanique • Bonne usinabilité • Résistance médiocre à la corrosion • Mauvaise soudabilité
Alliages aluminium-manganèse	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne aptitude à la mise en forme • Bonne résistance à la corrosion • Bonne soudabilité
Alliages aluminium-magnésium	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne aptitude à la mise en forme • Bonne résistance à la corrosion • Excellente soudabilité • Aptitude à l'anodisation
Alliages aluminium-zinc	<ul style="list-style-type: none"> • Très bonnes propriétés mécaniques • Résistance moyenne à la corrosion • Soudabilité moyenne



Tableau 8.3 Caractéristiques des alliages d'aluminium (*suite*)

Caractéristique	Commentaires
Alliages aluminium-silicium	<ul style="list-style-type: none"> • Propriétés mécaniques médiocres • Faible ductilité • Excellente coulabilité • Bonne résistance à la corrosion

8.2.3 Procédé de fabrication de l'aluminium

L'extraction de la bauxite, première étape du procédé de fabrication industrielle de l'aluminium, ne sera pas décrite dans ce manuel, car elle n'est pas accomplie par les techniciens de procédés industriels. Les deuxième et troisième étapes, c'est-à-dire l'extraction de l'alumine et sa décomposition en aluminium, sont quant à elles réalisées dans une aluminerie par ces techniciens. Elles seront donc exposées en détail dans ce qui suit. Le schéma présenté à la **figure 8.3** permet de visualiser l'enchaînement des diverses opérations qu'elles comportent.

Extraction de l'alumine de la bauxite au moyen du procédé chimique Bayer

La bauxite ne peut pas être utilisée telle quelle pour produire de l'aluminium. Contenant de 40 à 60 % d'alumine, elle doit être purifiée de ses autres composants, principalement de l'oxyde de fer, qui lui donne sa couleur rouge, et de la silice. Tel qu'illustré à la **figure 8.3**, la bauxite est acheminée dans le broyeur (1). Elle est ensuite mélangée avec du NaOH dans l'autoclave (2), sous pression et à haute température (de 200 à 250 °C). L'alumine est dissoute sous forme d'aluminate de sodium (phase liquide), et les impuretés précipitent (phase solide). Le mélange ainsi obtenu passe dans le décanteur (3), où il est additionné d'un flocculant. La décantation des impuretés sous forme de boues rouges permet une séparation grossière de la solution d'aluminate de sodium, qui traverse ensuite un filtre-pressé (4) avant d'être envoyée dans le décomposeur (5). Dans le décomposeur, la solution d'aluminate de sodium est transformée en hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ et en NaOH (lequel peut être réutilisé dans le procédé). L'hydroxyde d'aluminium passe ensuite dans le four de calcination (6), où il est chauffé et calciné à une température avoisinant les 1200 °C. Il est ainsi transformé en alumine de haute pureté (environ 99%).

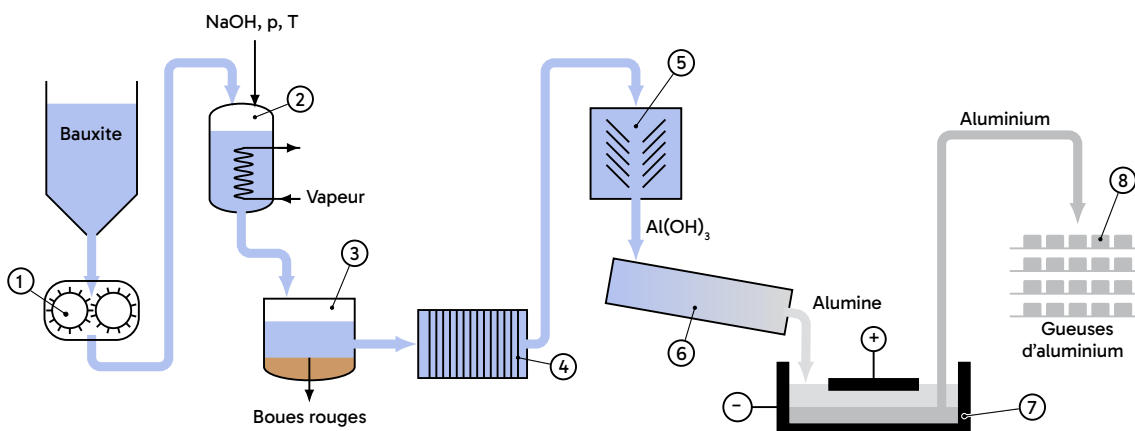


Figure 8.3 Schéma de la production industrielle de l'aluminium (1 = broyeur; 2 = autoclave; 3 = décanteur; 4 = filtre-pressé; 5 = décomposeur; 6 = four de calcination; 7 = cuve d'électrolyse; 8 = fonderie)

Décomposition de l'alumine en aluminium par électrolyse (procédé Hall-Héroult)

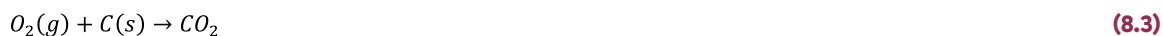
L'alumine solide obtenue à la sortie du four de calcination (6) doit être fondue avant d'être introduite dans la cuve d'électrolyse (7) pour y être décomposée. Le haut point de fusion de l'alumine (environ 2040 °C) rendait autrefois sa fonte difficile. Ce problème a été résolu grâce à un fondant, la cryolithe (Na_3AlF_6), l'un de ses rares solvants. L'ajout de la cryolithe à l'alumine provoque l'abaissement de son point de fusion à environ 950 °C. Pour que l'aluminium ait une conductibilité, une masse volumique et une viscosité convenables, on y incorpore également du fluorure de calcium ou du fluorure d'aluminium. Le mélange ainsi obtenu est envoyé dans la cuve d'électrolyse (7), qui est traversée par un courant électrique de haute intensité.

Une anode (électrode positive), qui attire les ions négatifs (O^{2-}), est placée en haut du bain électrolytique pour que l'oxygène puisse se dégager sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) en se liant avec le carbone constituant l'anode. Ce CO_2 est d'ailleurs la raison pour laquelle les alumineries sont considérées comme étant des contributeurs importants aux gaz à effet de serre (GES). Une cathode (électrode négative), qui attire les ions positifs (Al^{3+}), est située au fond du bain d'électrolyse.

Dans ce bain électrolytique, l'alumine est d'abord décomposée en aluminium et en oxygène :



L'oxygène réagit avec le carbone de l'anode et forme du dioxyde de carbone (CO_2).



Puisque les anodes se consomment durant le processus d'électrolyse, leur hauteur doit pouvoir être réglée dans la cuve à mesure qu'elles s'usent. Une anode peut durer en moyenne de 20 à 25 jours, ce qui signifie qu'une aluminerie moderne pourrait consommer environ 200 000 anodes par année.

L'aluminium produit par l'électrolyse est liquide en raison de la haute température du bain électrolytique (950 °C), maintenue le plus stable possible durant le procédé.



La réaction globale qui se produit dans le bain électrolytique est la suivante :



L'aluminium liquide se dépose au fond de la cuve électrolytique, sur la cathode (formée de briques réfractaires et de carbone), car sa masse volumique est plus élevée que celle du bain d'électrolyse. Il faut alors enlever périodiquement l'aluminium produit en le siphonnant dans une poche, puis l'envoyer vers la section de la fonderie (8). C'est là que le métal est coulé tel quel, ou mélangé avec d'autres métaux pour former des alliages. L'aluminium est coulé sous quatre formes :

- a) Des plaques de laminage pour la fabrication de tôles ou de bandes d'aluminium d'épaisseurs variées
- b) Des billettes de filage cylindriques pour la menuiserie métallique
- c) Des tiges pour la fabrication de fils machines à usage électrique et mécanique
- d) Des lingots en T destinés à la fonderie

Selon les données fournies par l'industrie métallurgique, pour produire une tonne d'aluminium par un procédé de type Bayer suivi de l'électrolyse, il faut plusieurs matières premières (figure 8.4).

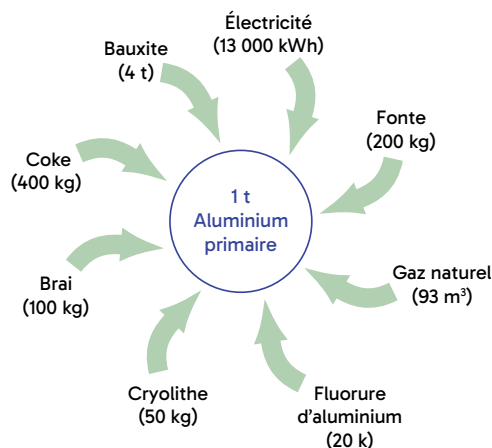


Figure 8.4 Matières premières nécessaires à la production de l'aluminium primaire

L'énergie électrique est une matière première essentielle à la fabrication industrielle de l'aluminium, son coût représentant de 20 à 30 % du coût de revient. On estime qu'une aluminerie moderne produisant 500 000 tonnes d'aluminium chaque année consomme autant d'énergie qu'une ville d'un million d'habitants et génère près de 200 000 tonnes de GES.

8.2.4 Traitements de surface de l'aluminium

Plusieurs propriétés de l'aluminium, telles que son aspect et sa résistance à la corrosion et/ou à la fatigue, peuvent être modifiées grâce à un traitement de sa surface. Pour ce faire, des traitements chimiques, électrochimiques ou mécaniques peuvent y être appliqués. Parmi l'ensemble des possibilités, le laquage et l'anodisation sont les deux techniques les plus employées dans la pratique industrielle.

Le **laquage** consiste à recouvrir un métal (y compris l'aluminium) d'une couche de laque. Il peut se faire de deux manières :

- › Le **prélaquage** – L'application est faite avant la mise en forme définitive de la pièce. Dans ce cas, la laque doit pouvoir résister aux déformations ultérieures de la pièce.
- › Le **thermolaquage** – Il s'agit de l'application d'une peinture en poudre sur des pièces déjà mises en forme.

L'**anodisation** est une technique électrochimique de traitement de surface spécifique à l'aluminium. Elle consiste à remplacer la fine couche d'alumine qui se forme naturellement à la surface du métal exposé à l'air par une nouvelle couche du même oxyde d'une épaisseur variant entre 10 et 30 μm . Cette nouvelle couche d'oxyde est beaucoup plus résistante aux agents extérieurs. Obtenue par oxydation anodique, elle est poreuse et peut être colorée (lorsque désiré) avant d'être colmatée par ébullantage. La couleur est ainsi emprisonnée dans la surface du métal. L'**anodisation dure** est une variante qui permet de déposer à la surface de l'aluminium une couche résistante à l'abrasion. Dans ce cas particulier, l'anodisation est réalisée avec un électrolyte d'acide sulfurique à basse température ainsi qu'une tension et une densité de courant élevées.

Le processus d'anodisation s'effectue en trempant la surface à traiter dans des bassins chimiques et électrochimiques, avec rinçage à l'eau entre chaque bassin. Pour ce faire, les pièces à anodiser sont attachées sur des armatures, ce qui permet à l'ensemble de circuler facilement entre les bassins pour l'accomplissement successif des étapes suivantes :

- 1) La préparation de la surface à traiter par anodisation commence par un nettoyage avec un savon alcalin (pour enlever les huiles et les graisses déposées sur la surface); elle se termine par un décapage à l'aide d'une solution caustique (afin d'enlever l'alumine naturelle formée sur la surface à traiter).
- 2) Le dépôt de la couche d'alumine anhydre sur la surface de l'aluminium est effectué par le passage d'un courant continu, pendant une période déterminée, dans un bassin d'anodisation. Ce bassin contient les pièces à traiter, qui sont immergées dans un électrolyte (solution diluée d'acide sulfurique). Puisque la couche d'alumine anhydre créée est poreuse, elle doit être scellée rapidement.
- 3) La coloration éventuelle de la couche d'alumine anhydre s'effectue par le trempage des pièces anodisées dans une autre cuve, contenant un sel métallique, et l'emploi d'un courant alternatif. Si la coloration de la pièce anodisée n'est pas nécessaire ni souhaitée, cette étape est absente de la séquence de traitements.
- 4) Le colmatage final de la couche d'alumine poreuse est nécessaire afin d'empêcher les impuretés de s'y incruster. Cette étape est réalisée par hydratation : l'eau bouillante fait gonfler la couche, ce qui obstrue les pores.

L'anodisation est très largement utilisée pour traiter des objets de décoration, de menuiserie métallique ou du quotidien : composants de voitures, avions, etc. Les photos montrées aux figures 8.5 (ci-dessous) et 8.6 (page suivante) présentent des bassins industriels d'anodisation et des pièces anodisées au laboratoire de traitements de surface du Cégep de Lévis.



Figure 8.5 Bassins industriels d'anodisation et de coloration (la photo de gauche a été prise à Almaho inc., à Lévis; celle de droite, à AnodiQ inc., à Saint-Nicolas)

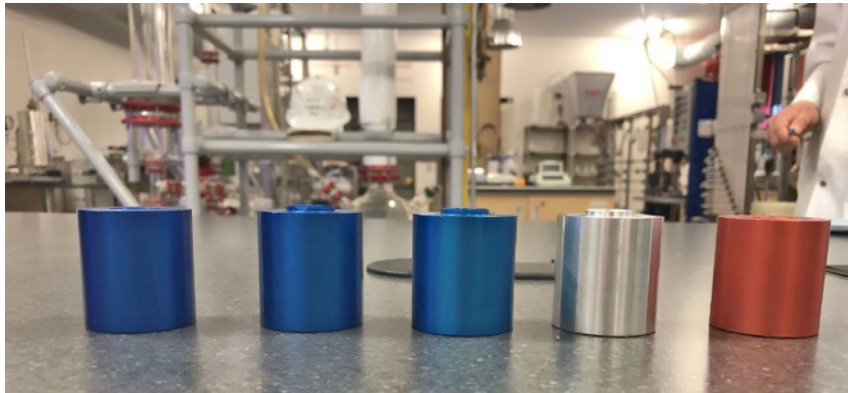


Figure 8.6 Pièces usinées et anodisées dans le laboratoire du programme Techniques de procédés industriels du Cégep de Lévis

8.3 Cuivre

8.3.1 Généralités

Le cuivre pur n'existe plus à l'état natif dans la croûte terrestre comme on l'y avait retrouvé pendant l'Antiquité. L'extraction du cuivre entre 2300 et 1800 av. J.-C. a été faite dans l'île de Chypre, d'où son nom (du latin *cyprium*, qui signifie « bronze de Chypre »). Les réserves actuelles de cuivre, sous forme de sels riches en cuivre (de 30 à 90 %), se présentent dans des minerais de type sulfuré (chalcopyrite) et carbonaté (azurite bleue et malachite verte), d'où il est extrait comme métal pur. La date de la découverte du cuivre n'est pas exactement répertoriée, mais les premiers objets découverts par l'archéologie datent de 5000 av. J.-C.

Parmi les principaux pays producteurs de cuivre, on compte actuellement le Chili, le Pérou, la République démocratique du Congo et la Chine. La production mondiale de cuivre est actuellement d'environ 25 millions de tonnes chaque année. Le Canada est responsable de 2,4 % de ce volume, grâce à ses cinq raffineries de cuivre – situées à Terre-Neuve-et-Labrador, au Québec, en Ontario et en Alberta –, ce qui le place au douzième rang du classement mondial.

L'extraction du cuivre peut se faire à l'aide de l'une des trois techniques suivantes :

- ▶ La **pyrométallurgie** – Elle consiste à griller le minerai à des températures très élevées jusqu'à le faire fondre pour ensuite en extraire le métal d'intérêt et le séparer des impuretés à l'aide d'une succession de différentes opérations de purification.
- ▶ L'**hydrométallurgie** – Il s'agit d'un processus qui utilise des solutions aqueuses de divers composants chimiques afin d'extraire le cuivre de son minerai.
- ▶ L'**électrométallurgie** – Elle consiste à utiliser un courant électrique pour favoriser une réaction chimique d'oxydoréduction entre le métal et le minerai.

Le procédé type d'extraction du cuivre de son minerai, employé par la fonderie québécoise Horne, située à Rouyn-Noranda, sera décrit à la [section 8.3.3](#).

8.3.2 Caractéristiques du cuivre et de ses alliages

Les caractéristiques du cuivre sont présentées au [tableau 8.4](#).

Tableau 8.4 Caractéristiques du cuivre

Caractéristique	Symbole ou valeur	Commentaires
Symbole chimique	Cu	
Numéro atomique	29	
Masse atomique	63,546 g/mol	
Réseau cristallin	Cubique à faces centrées	Cet arrangement permet le glissement de ses plans structuraux et lui confère sa grande malléabilité.
Température de fusion	1083 °C	La plupart de ses alliages ont une température de fusion plus faible.
Point d'ébullition	2562 °C	
Masse volumique à 20 °C	8,93 g/cm ³	
Résistivité électrique à 20 °C	1,71 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	
Conductivité thermique à 20 °C	385 W/m \cdot °C	Sa conductivité thermique élevée est mise en valeur dans la plomberie, la construction ainsi que la fabrication de différentes pièces et objets du quotidien.
Module d'élasticité	125 000 MPa	Il est très ductile, ce qui signifie qu'il peut être étiré sans pour autant se rompre.
Résistance à l'oxydation	Faible	À l'air libre, il se recouvre d'une couche de couleur gris-vert, appelée « patine » ou « vert-de-gris ». C'est le dioxyde de carbone, et non l'air, qui provoque son oxydation.

L'analyse de ses caractéristiques permet de constater que le cuivre est un métal aux propriétés particulières :

- › Il est très malléable et ductile.
- › Il présente une bonne conductivité thermique et électrique (la meilleure après l'argent).
- › Il résiste bien à la corrosion – contrairement au fer et à l'acier, le cuivre ne rouille pas. Lorsqu'il est exposé aux intempéries, il se couvre d'une mince couche d'oxyde qui le protège et lui permet de rester intact pendant des centaines d'années.
- › Il est recyclable à l'infini sans perte de ses propriétés.
- › Il présente un excellent pouvoir fongicide.

Grâce à ses propriétés, le cuivre est un élément essentiel à notre quotidien, car il est omniprésent dans nos vies. Les applications principales du cuivre seront exposées à la [section 8.4](#).

Pour améliorer certaines de ces propriétés, le cuivre est parfois utilisé sous forme d'alliages, dont les caractéristiques sont présentées au [tableau 8.5](#).

Tableau 8.5 Caractéristiques des alliages de cuivre

Caractéristique	Commentaires
Éléments d'alliage	Aluminium, béryllium, cadmium, nickel, étain, tellure et zinc – seuls ou associés
Teneur en éléments d'alliage	De quelques dixièmes de pour cent jusqu'à des dizaines de pour cent
Laitons	<ul style="list-style-type: none"> • Alliages de cuivre et de zinc, à haute teneur en zinc (jusqu'à 45%) • Excellente mise en forme • Usinage de précision • Bonne résistance à la corrosion et à l'érosion
Bronzes	<ul style="list-style-type: none"> • Alliages de cuivre et d'étain, à haute teneur en étain (jusqu'à 20%) • Plus résistants à la corrosion marine que les laitons • Bonnes propriétés mécaniques • Bonne résistance au frottement et à l'usure • Bonne sonorité (pour les instruments de musique)
Alliages cuivre-béryllium	<ul style="list-style-type: none"> • Teneur en béryllium de 2% • Meilleures propriétés mécaniques que celles du cuivre pur • Conductivité plus élevée que celle du cuivre pur
Alliages cuivre-cadmium	<ul style="list-style-type: none"> • Teneur en cadmium de 0,7 à 1% • Bien meilleures propriétés mécaniques que celles du cuivre pur
Alliages cuivre-tellure	<ul style="list-style-type: none"> • Teneur en tellure de 0,3 à 0,7% • Meilleures propriétés mécaniques que celles du cuivre pur • Meilleure usinabilité que celle du cuivre pur

8.3.3 Procédé de fabrication du cuivre

Le schéma de la production industrielle du cuivre, à partir de l'extraction du minerai jusqu'à l'obtention de lingots, est représenté à la [figure 8.7](#). Il permet d'identifier les trois principaux processus de transformation de la matière première (minerai de chalcopryrite) en produit fini (lingots de cuivre) :

- 1) **Le traitement du minerai** est un ensemble de plusieurs étapes qui vise à augmenter la teneur en cuivre du minerai. Lorsqu'il est extrait de la mine, le minerai de chalcopryrite ($\text{Cu}_2\text{S}-\text{FeS}_2-\text{FeS}$) contient à peine 1% de cuivre. Il est d'abord concassé, puis broyé et trié mécaniquement (tamisé) pour ensuite être soumis à un enrichissement par flottation. L'industrie utilise les agents de flottation suivants : huile de pin, acide crétylique et alcools à longues chaînes. Grâce à cette technique, le cuivre flotte à la surface, car il est plus léger que

les autres minerais, qui, eux, coulent au fond. Les produits légers et lourds issus de la flottation sont ensuite décantés, filtrés et séchés. À la fin de cette étape de traitement, le minerai contient entre 20 et 50 % de cuivre et il est livré aux fonderies, où il sera purifié davantage par un procédé pyrométallurgique.

- 2) L'**élaboration du minerai** consiste à le purifier et à augmenter sa teneur en cuivre jusqu'à une proportion de 98 %. Cette étape est constituée de deux processus successifs de purification et de concentration : la fusion mène à une teneur en cuivre d'environ 70 % et la conversion (métal presque pur – 98 % de cuivre). Ces deux processus sont réalisés dans des réacteurs et des convertisseurs spécifiques. Une description détaillée en sera donnée séparément dans ce qui suit, car ils sont au cœur du procédé de fabrication du cuivre.
- 3) L'**affinage** vise l'obtention d'un métal presque pur (99,95 %) et se réalise de deux manières : thermique et électrolytique. Ces deux processus de purification seront également exposés en détail de façon séparée dans cette section.

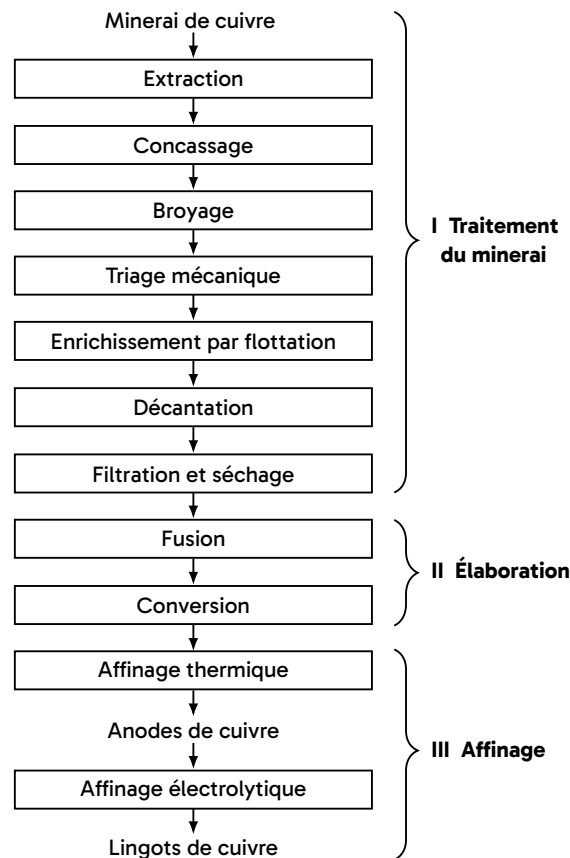


Figure 8.7 Schéma de la production industrielle du cuivre à partir de son minerai

Élaboration du minerai de cuivre par pyrométallurgie

À la fonderie Horne, à Rouyn-Noranda, l'élaboration du minerai de cuivre s'effectue d'abord dans un réacteur Noranda (unique au monde et conçu sur mesure), puis dans un convertisseur Noranda.

Réacteur Noranda de la fonderie Horne

Le réacteur Noranda est une immense cuve horizontale d'environ 21,3 mètres de longueur et de 5,2 mètres de diamètre. Un schéma de principe de ce réacteur est présenté à la **figure 8.8**. Le réacteur Noranda (chauffé à environ 1200 °C) est alimenté en continu avec un mélange constitué de minerai concentré (comportant en moyenne 25% cuivre), de produits recyclés, de charbon et de silice. Son intérieur est recouvert de briques réfractaires qui ont pour rôle de maintenir la température et de protéger l'acier qui le constitue. À sa base, il y a 54 tuyères qui injectent à haute pression de l'air enrichi d'oxygène afin d'amorcer la réaction de combustion du charbon et de créer une turbulence dans le métal en fusion pour forcer les composants du mélange d'alimentation à réagir entre eux selon les réactions chimiques suivantes :



L'énergie nécessaire à ces deux réactions est fournie par la combustion du charbon. Poussée par le procédé en continu, la masse de métal en fusion poursuit son chemin dans le réacteur et se sépare en deux phases : la scorie et la matte.

La **scorie** est formée de $FeSiO_2$, à la suite de la réaction entre la silice ajoutée et le fer du minerai. Elle est enlevée du réacteur et refroidie pendant 24 heures dans une immense cuve de métal pour ensuite être concassée, broyée et acheminée au concentrateur, où elle est traitée comme un minerai de cuivre. Par la suite, elle est réalimentée dans le réacteur.

La **matte** se retrouve au fond du réacteur, où elle est évacuée par une ouverture; elle atterrit dans des poches de 13 tonnes sur rails qui la transporteront jusqu'au convertisseur. La pureté de la matte à la sortie du réacteur est évaluée toutes les heures par des tests de fluorescence X et une fois par jour au moyen de méthodes de chimie humide pour valider les résultats obtenus par fluorescence X.

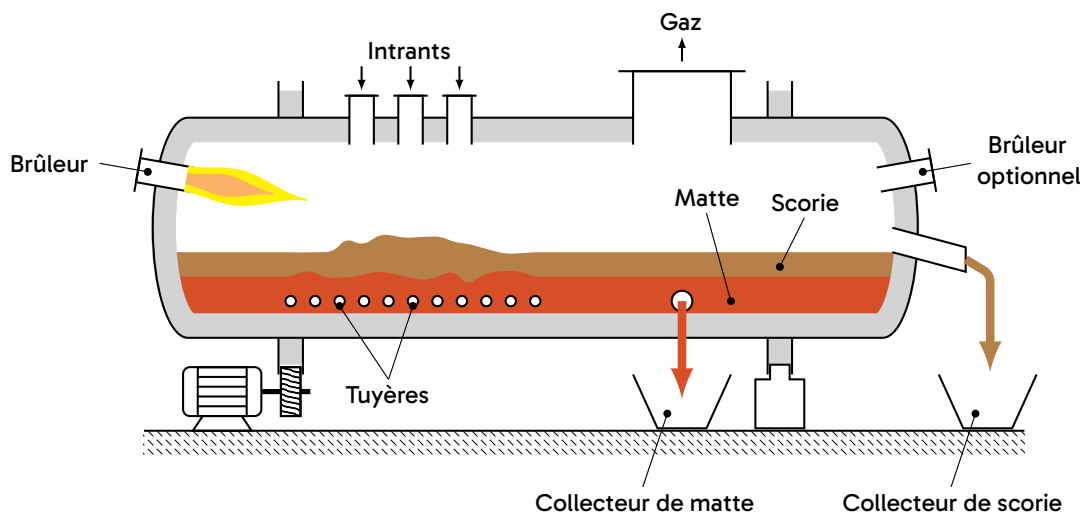


Figure 8.8 Schéma de principe du réacteur de la fonderie Horne

Convertisseur Noranda de la fonderie Horne

Le convertisseur Noranda (CvN) est un immense four cylindrique horizontal (environ 20 mètres de longueur et 4,6 mètres de diamètre) qui est construit et fonctionne comme le réacteur Noranda. Ce convertisseur a pour rôle de transformer la matte sortie du réacteur RN (70% de cuivre) en cuivre métallique presque pur (97% de cuivre). De l'air à haute teneur en oxygène est injecté dans le CvN par ses tuyères pour maintenir sa température à environ 1300 °C. Les sulfures de fer sont les premiers à se faire oxyder; ils forment la scorie produite par le CvN. Les sulfures de cuivre, quant à eux, forment une couche intermédiaire appelée « métal blanc ». La matte se dépose au fond du CvN. Les réactions qui ont lieu dans le CvN sont les suivantes :



De l'air est injecté de façon continue dans le CvN pour que la matte atteigne une pureté en cuivre d'environ 97%. Le processus prend environ quatre heures. Après ce délai, des analyses sont effectuées pour vérifier si la matte ne contient pas une trop forte teneur en éléments mineurs indésirables. Si tel est le cas, de l'air est à nouveau injecté dans le mélange.

Affinage du cuivre

L'affinage de la matte provenant du CvN (97% de cuivre) se réalise de manière thermique d'abord, puis de manière électrolytique.

Affinage thermique et moulage des anodes de cuivre

La matte provenant du CvN est envoyée dans les fours à anodes, des vaisseaux cylindriques en acier recouverts de briques isolantes et de briques réfractaires. Le rôle de l'affinage thermique est d'éliminer l'excès d'oxygène et de permettre la coulée du cuivre. On injecte du gaz naturel (CH_4) dans le four à anodes pour le faire réagir avec l'oxygène, selon l'équation suivante :



Lorsque ce premier affinage est fait, le cuivre est prêt à être coulé en anodes. Il est alors versé dans des moules fixés sur une grande roue. Les anodes, une fois refroidies, sont prêtes à subir leur purification finale par affinage électrolytique. À la fin de l'affinage thermique, elles présentent une pureté d'environ 99,1%, ce qui est insuffisant pour les applications en électricité et en électronique, et pèsent environ 444 tonnes chacune. Les impuretés qui restent dans les anodes de cuivre sont constituées de métaux précieux comme l'or et le platine.

Affinage électrolytique du cuivre

Les anodes de cuivre obtenues à la suite de l'affinage thermique ne sont pas traitées par électrolyse à la fonderie Horne; elles sont plutôt envoyées à l'affinerie CCR (appartenant également à Noranda inc.), à Montréal, pour y subir ce traitement. Le schéma de principe d'un bain électrolytique de cuivre est représenté à la [figure 8.9](#), à la page suivante.

Dans le bain électrolytique rempli d'une solution de sulfate de cuivre et d'acide sulfurique, on fixe l'anode de cuivre près de la cathode et on y fait passer un courant électrique pendant une période de 21 à 28 jours. L'anode de cuivre, sous l'effet du courant électrique, se dissout dans la solution; les ions de cuivre ainsi formés sont attirés par la cathode et y forment une couche de cuivre très pur (99,95%). Les impuretés (contenant de l'or et du platine) ne sont pas attirées par la cathode; elles se déposent donc au fond du bain électrolytique sous forme de boue anodique. Elles sont récoltées et purifiées, ce qui génère un plus grand profit que la production du cuivre elle-même. Les cathodes de cuivre pur sont coulées en lingots, qui sont ensuite vendus.

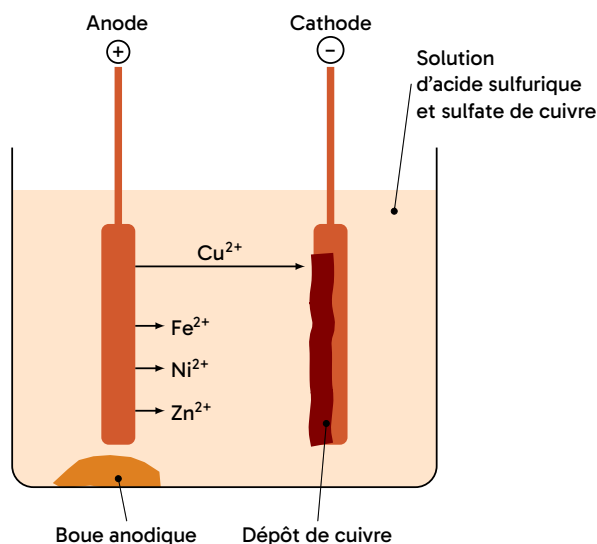


Figure 8.9 Schéma de principe d'un bain électrolytique de cuivre

Traitements de gaz

La chalcopirite à l'état brut contient du sulfate de fer, qui doit être éliminé durant le processus de fabrication du cuivre. Le soufre est éliminé tout au long du procédé, et les gaz obtenus sont récupérés dans un précipitateur de poussières, purifiés dans une chambre d'épuration des gaz et ensuite mis en contact avec de l'eau afin de former de l'acide sulfurique concentré. Cet acide est vendu à certaines industries et certains laboratoires qui en font usage et fournit ainsi un revenu supplémentaire à la fonderie Horne.

8.4 Usages des métaux et des alliages

Les applications des métaux et des alliages sont très variées et elles dépendent des caractéristiques de chacun. L'usage des objets et des constructions métalliques doit satisfaire à un ensemble d'exigences fonctionnelles, technologiques, économiques et sociales. De manière globale, on a constaté ce qui suit :

- › La plupart des métaux et des alliages possèdent une excellente ductilité, propriété qui peut être mise à profit pour la fabrication de fils et de câbles.
- › Plusieurs métaux et leurs alliages présentent une bonne dureté, caractéristique recherchée dans le domaine de la construction pour un matériau de finition, car sa surface reste intacte au fil du temps.

- › La plupart des métaux et de leurs alliages possèdent une bonne malléabilité, ce qui fait d'eux des matériaux de choix pour les emballages alimentaires et la joaillerie.
- › Puisque la majorité des métaux et de leurs alliages sont d'excellents conducteurs, ils servent à fabriquer des fils électriques.
- › La légèreté (faible masse volumique) de certains métaux est mise à profit pour construire des articles destinés au transport en tout genre.
- › La résistance à la corrosion de certains métaux et alliages fait d'eux un choix judicieux pour fabriquer des objets qui sont sujets à la dégradation durant leur usage.

Le **tableau 8.6** présente une liste non exhaustive des principaux métaux et de leurs alliages ainsi que de leurs usages.

Tableau 8.6 Usages des principaux métaux et de leurs alliages

Métal ou alliage	Usages
Aluminium (Al)	<ul style="list-style-type: none"> • Secteur du bâtiment : portes et fenêtres, toitures et structures aériennes • Secteur alimentaire : canettes, barquettes, couvercles et emballages • Secteur du transport : avions, automobiles, trains et navires • Fils électriques • Bateaux
Alliages d'aluminium	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie chimique • Industrie alimentaire • Industrie du transport • Industrie des loisirs et du sport • Cryogénie • Construction de bâtiments • Tuyauterie • Chaudronnerie • Armement
Cuivre (Cu)	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures • Appareils technologiques • Dispositifs médicaux • Industrie agroalimentaire • Instruments de musique • Fils électriques • Œuvres d'art
Alliages de cuivre : laitons	<ul style="list-style-type: none"> • Construction navale • Gravure et guillochage • Bijouterie • Ustensiles de cuisine et objets décoratifs • Robinetterie • Objets artisanaux • Douilles d'obus et armes à feu



Tableau 8.6 Usages des principaux métaux et de leurs alliages (*suite*)

Métal ou alliage	Usages
Alliages de cuivre : bronzes	<ul style="list-style-type: none"> • Plomberie pour systèmes à vapeur, pompes, vannes • Coussinets et engrenages • Objets d'art • Architecture • Ingénierie
Lithium (Li)	<ul style="list-style-type: none"> • Piles rechargeables • Appareils électroniques • Chimie fine • Médecine • Industrie du verre et des céramiques techniques • Production de lubrifiants • Production d'alliages
Magnésium (Mg)	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie aéronautique • Industrie spatiale • Équipements de manutention • Outillage portatif • Industrie du transport
Or (Au)	<ul style="list-style-type: none"> • Secteur électronique : connecteurs électriques et composants d'ordinateurs • Bijouterie et artisanat : œuvres d'art • Monnaie ancienne • Santé : implants, stimulateurs cardiaques et divers traitements
Titane (Ti)	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie aéronautique • Industrie aérospatiale • Industrie chimique • Industrie militaire • Industrie du sport • Optique • Automobiles • Industrie biomédicale
Zinc (Zn)	<ul style="list-style-type: none"> • Galvanisation : revêtements contre la corrosion • Accessoires du bâtiment : gouttières, clôtures et couvertures de bâtiment • Fils électriques • Stockage de l'énergie : piles • Pigment dans les peintures antirouille • Plaques de photogravure

8.5 Notions de santé et de sécurité

Dans cette section, nous ne décrivons que les risques liés à la santé et à la sécurité des travailleurs dans les fonderies traitant l'aluminium et le cuivre. Cependant, ces risques sont partiellement ou intégralement transposables aux procédés de fabrication industrielle d'autres métaux. Les deux procédés de fabrication de l'aluminium et du cuivre sont considérés comme faisant partie de la catégorie des processus lourds (environnement dynamique et à haut risque), donc les risques sont importants pour le personnel travaillant dans ces fonderies. Le **tableau 8.7** présente une énumération des principaux risques auxquels sont exposés les travailleurs des fonderies ainsi que les précautions à prendre.

Tableau 8.7 Risques liés à la santé et à la sécurité des travailleurs des fonderies d'aluminium et de cuivre

Risques liés à la santé et à la sécurité des travailleurs des fonderies	Précautions à prendre
<ul style="list-style-type: none">• Stress thermique• Déshydratation• Brûlure thermique par projection de métal• Bruit• Exposition aux champs électromagnétiques et à la fumée• Électrisation et électrocution• Risques oculaires• Irritations cutanées dues aux manipulations de divers agents chimiques (métaux lourds, acides forts et bases fortes)• Troubles respiratoires : toux, respiration sifflante, asthme, maladies pulmonaires obstructives• Incendies• Explosions	<ul style="list-style-type: none">• Port d'équipements de protection adaptés aux divers secteurs de la fonderie : combinaisons (en cuir ou en tissu aluminisé), gants, chaussures, lunettes, casque, masque, etc.• Offre de formations sur la santé et la sécurité au travail dans les fonderies• Offre de formations sur les pratiques professionnelles sécuritaires• Ventilation adéquate• Respect des règles de sécurité propres à chaque secteur de la fonderie• Mesures et analyses de la qualité de l'air par l'employeur ou par un laboratoire extérieur• Entreposage adéquat des produits chimiques• Visites médicales régulières pour les membres du personnel de la fonderie qui sont exposés aux poussières de métaux

8.6 Exercices

A Exercices de révision

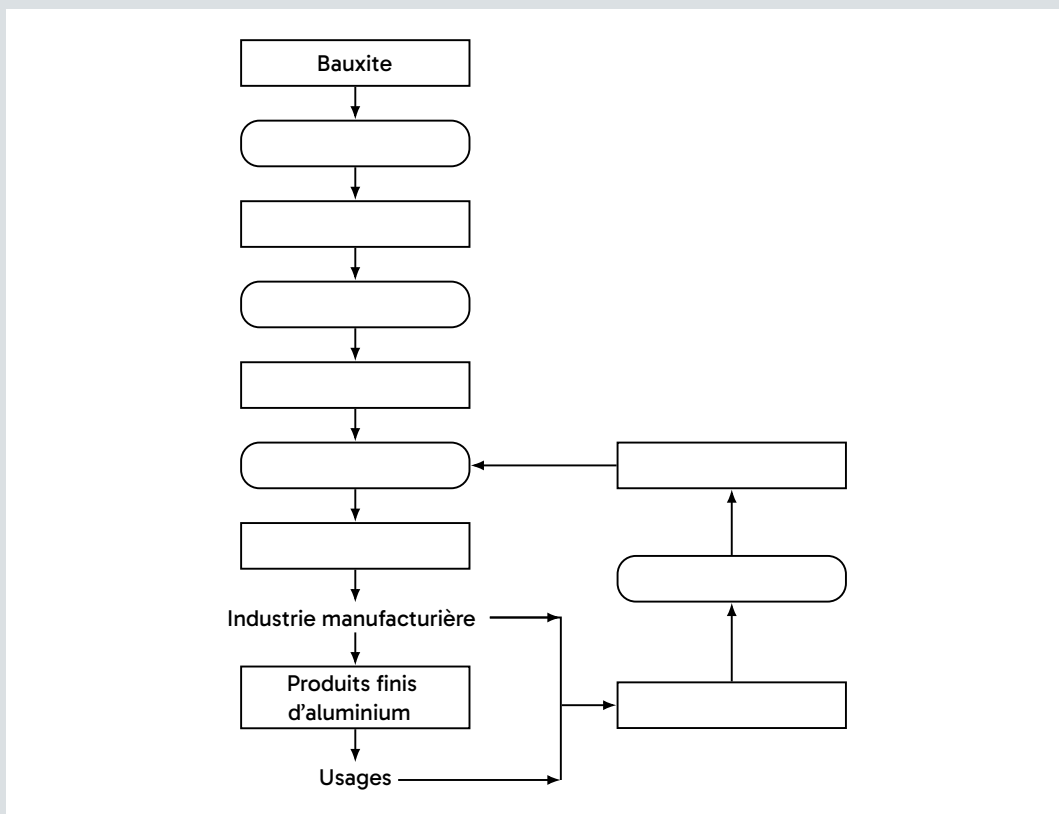
- A.1** Quelles sont les trois principales spécialités de l'industrie métallurgique?
- A.2** Sous quelle forme sont produits les métaux et les alliages?
- A.3** Quelle est la signification du terme « alliage »?
- A.4** Sous quelle forme se trouve l'aluminium à l'état natif?
- A.5** Sous quelle forme se trouve le cuivre à l'état natif?
- A.6** Nommez les deux métaux non ferreux les plus produits dans les fonderies québécoises.
- A.7** Nommez au moins cinq propriétés caractéristiques de l'aluminium.
- A.8** Nommez au moins cinq propriétés caractéristiques du cuivre.
- A.9** Nommez les trois principaux composants qui interviennent dans la chaîne de fabrication industrielle de l'aluminium.
- A.10** À quel métal l'opération de corroyage est-elle appliquée, et en quoi consiste-t-elle?
- A.11** À quel métal l'opération de moulage est-elle appliquée, et en quoi consiste-t-elle?
- A.12** À quel métal l'opération d'érouissage est-elle appliquée, et en quoi consiste-t-elle?
- A.13** Décrivez le procédé de transformation de la bauxite en alumine.
- A.14** Décrivez le procédé électrolytique de transformation de l'alumine en aluminium. Donnez les équations relatives à la cathode et à l'anode ainsi que la réaction globale qui a lieu dans la cuve électrolytique.
- A.15** Énumérez les matières premières nécessaires à l'obtention de l'aluminium.
- A.16** Énumérez tous les types de traitements de surface qui peuvent être appliqués à l'aluminium.
- A.17** Nommez et décrivez ensuite les deux traitements de surface les plus employés par l'industrie pour l'aluminium.
- A.18** Quel rang ou quelle position le Canada occupe-t-il parmi les producteurs mondiaux de cuivre, et combien d'affineries de cuivre y sont en exploitation?
- A.19** Nommez les trois techniques qui servent à extraire le cuivre de la chalcoppyrite et expliquez-en brièvement le fonctionnement.
- A.20** Nommez les trois grandes étapes du procédé de fabrication du cuivre.
- A.21** Décrivez en détail l'étape de traitement du minerai de chalcoppyrite.
- A.22** Décrivez en détail l'étape d'élaboration du cuivre.
- A.23** Décrivez en détail l'étape d'affinage du cuivre.
- A.24** Nommez quelques risques liés au travail dans une fonderie.
- A.25** Nommez des précautions qu'il faut prendre pour travailler de manière sécuritaire dans une fonderie.

B Exercices de réflexion

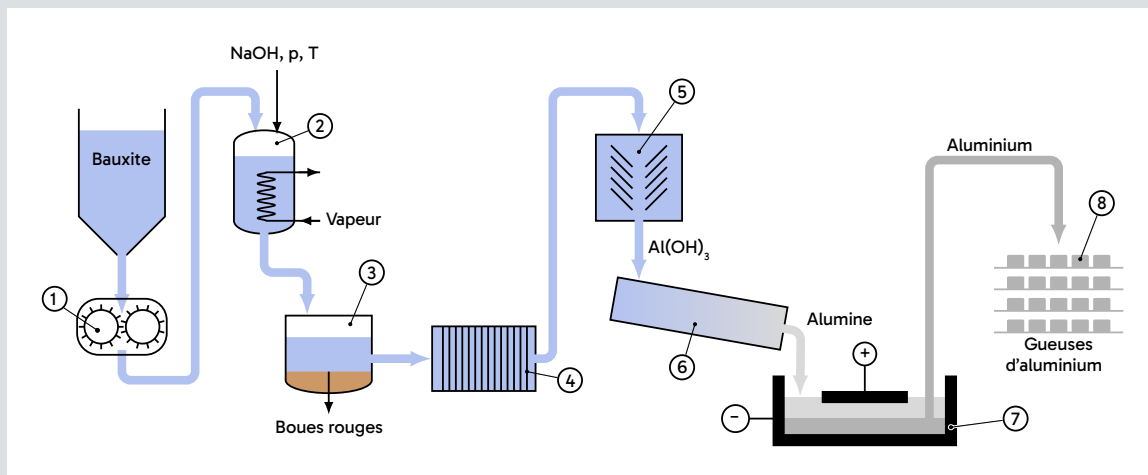
- B.1** Quelle est l'utilité de la bauxite?
- B.2** Quelle est la différence entre l'aluminium primaire et l'aluminium secondaire?
- B.3** Jusqu'à quelle teneur maximale peut-on ajouter un élément d'alliage à l'aluminium?
- B.4** Jusqu'à quelle teneur maximale peut-on ajouter un élément d'alliage au cuivre?
- B.5** Existe-t-il des différences entre les méthodes d'affinage électrolytique et thermique? Si oui, nommez-les.
- B.6** Pour concevoir quel type d'objets la ductilité de la plupart des métaux est-elle mise à profit?
- B.7** Pour concevoir quel type d'objets la dureté de certains métaux est-elle mise à profit?
- B.8** Pour concevoir quel type d'objets la malléabilité de la plupart des métaux est-elle mise à profit?
- B.9** Pour concevoir quel type d'objets la bonne conductivité de certains métaux est-elle mise à profit?
- B.10** Pour concevoir quel type d'objets la légèreté (faible masse volumique) de certains métaux est-elle mise à profit?
- B.11** Pour concevoir quel type d'objets la résistance à la corrosion de certains métaux est-elle mise à profit?
- B.12** Quel type d'aluminium, primaire ou secondaire, est actuellement produit à l'échelle mondiale?

C Exercices d'application

- C.1** Complétez le schéma de principe de la fabrication industrielle de l'aluminium présenté ci-dessous.



C.2 Nommez tous les équipements (1 à 8) de la chaîne de fabrication de l'aluminium représentés dans le schéma ci-dessous. Décrivez ensuite le procédé de transformation de la bauxite en aluminium primaire.



Solutionnaire

À noter : Les réponses aux exercices de réflexion et d'application sont présentées ci-après. Les réponses aux exercices de révision peuvent facilement être repérées dans les textes des chapitres.

Chapitre 1

Introduction aux productions industrielles

Exercices de réflexion

- B.1** Un schéma de procédé est une représentation graphique globale de la nature des appareils composant un procédé ainsi que le sens de circulation des matières depuis l'entrée jusqu'à la sortie de celui-ci. Sur ce schéma, on ne représente ni l'instrumentation, ni les boucles de contrôle du procédé. Le schéma P&ID est plus complexe, car c'est la représentation la plus fidèle du procédé industriel sur laquelle on retrouve l'ensemble des appareils et équipements, la tuyauterie, la robinetterie ainsi que les instruments de mesure, de contrôle et de régulation qui le composent.
- B.2** Les deux sources traditionnelles les plus utilisées par les productions industrielles sont les combustibles et l'énergie. Ces deux sources sont connues et exploitées depuis la nuit des temps par l'humanité comme elles sont économiquement viables pour un tel usage.
- B.3** Les trois matières premières naturelles organiques épuisables présentées dans ce chapitre sont le pétrole, le gaz naturel et le charbon. Ces matières premières sont considérées comme épuisables car elles sont de nature fossile, ce qui suppose que les réserves mondiales peuvent s'épuiser plus ou moins vite, en fonction du rythme d'exploitation.
- B.4** Pour caractériser une production industrielle, il serait préférable et plus significatif de calculer sa productivité, car elle peut varier significativement d'une période à l'autre en fonction des conditions opératoires et de la qualité des matières premières.

Productions pétrolières

Exercices de réflexion

- B.1** a) La pression dans la colonne : normale (atmosphérique) ou réduite (vide).
 b) La distillation atmosphérique est plus facilement réalisable à l'échelle industrielle.
 c) L'industrie pétrolière fait usage de deux types de distillation pour séparer le plus de fractions (coupes) à partir du pétrole brut.
- B.2** 1 = aucune; 2 = P; 3 = A; 4 = O; 5 = aucune; 6 = N; 7 = A; 8 = aucune; 9 = I; 10 = A
- B.3** Unité de distillation du pétrole
 1 = dessaleur; 2 et 7 = fours; 3 = colonne de distillation à pression atmosphérique; 4, 5, 6, 9, 10 = colonnes de stripage; 8 = colonne de distillation sous vide
 a = eau salée; b = gaz (C₁-C₆); c = naphta; d = kérosène; e = gazole; f = résidu atmosphérique; g = gazole lourd; h = fuel 1; i = fuel 2; j = résidu sous vide

Exercices d'application

- C.1** Point d'ébullition = 55,2 °C; Indice d'octane = 110; solubilité dans l'essence = miscible à l'essence. Oui, le MTBE peut être ajouté à l'essence automobile.
- C.2** a)
$$C_8H_{18} \xrightarrow{\text{craquage catalytique}} C_2H_4 + C_6H_{14}$$

 b) A = C₆H₁₄/Alcanes
 c) CH₃ - (CH₂)₄ - CH₃; CH₃ - CH(CH₃) - (CH₂)₂ - CH₃;
 CH₃ - CH₂ - CH(CH₃) - CH₂ - CH₃
 CH₃ - C(CH₃)₂ - CH₂ - CH₃
- C.3** a) A = CH₃ - (CH₂)₅ - CH₃

$$CH_3 - (CH_2)_5 - CH_3 + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$$

 b)
$$CH_3 - (CH_2)_5 - CH_3 \xrightarrow{\text{craquage catalytique}} C_3H_8 + B$$

 B = C₄H₈ = CH₃ - CH = CH - CH₃

Chapitre 3

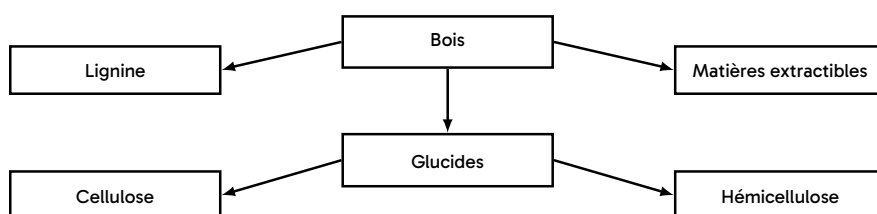
Productions papetières

Exercices de réflexion

- B.1** Un siphon dans la sécherie est placé à l'intérieur des cylindres chauffés afin d'éliminer les condensats qui résultent du refroidissement de la vapeur vive.
- B.2** Le bois résineux présente des fibres cellulosiques plus longues que les feuillus, donc mieux adaptées à la fabrication de la pâte à papiers.

Exercices d'application

C.1



C.2

	Pâtes mécaniques	Pâtes chimiques
Principe fabrication	Réduction en pâte au moyen de l'énergie mécanique (peu ou pas d'énergie chimique et de chaleur)	Réduction en pâte à l'aide de produits chimiques et de chaleur (peu ou pas d'énergie mécanique)
Caractéristiques des fibres	Fibres courtes contenant des impuretés	Fibres longues et pures
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation presque intégrale de la matière première (de 90 à 95%) La présence de la lignine dans la pâte mécanique confère au papier une excellente opacité et une bonne imprimabilité. Le prix de revient est faible puisque le rendement est élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> Résistance mécanique élevée Blanchiment facile (pas de lignine) Stabilité de la feuille
Désavantages	<ul style="list-style-type: none"> La résistance mécanique est faible, car les fibres sont courtes. La présence de la lignine provoque le jaunissement du papier et sa détérioration au cours de son vieillissement. La lignine restante rend difficile le blanchiment. 	<ul style="list-style-type: none"> Faible rendement (prix de revient grand) Faible qualité d'impression Procédé polluant
Blanchiment	Difficile	Facile
Applications commerciales	<ul style="list-style-type: none"> Journaux Circulaires Papiers hygiéniques 	<ul style="list-style-type: none"> Papiers pour impression et écriture Papiers fins Papiers pour emballage

C.3

N°	Partie composante	Rôle
1	Caisse d'arrivée	<ul style="list-style-type: none">• Répartit uniformément la suspension dans le sens transversal de la machine.• Régularise les courants transversaux et les variations de concentration.• Régularise les gradients de vitesse dans le sens de marche.• Crée la turbulence nécessaire pour disperser les flocs de la suspension.• Délivre à travers les lèvres un jet uniforme qui entre en contact avec la toile à un point précis, sous l'angle voulu.
2	Table plate	<ul style="list-style-type: none">• Conduit à la formation de la feuille.• Permet une première évacuation de l'eau par égouttage.
3	Presses	<ul style="list-style-type: none">• Permet d'extraire le plus d'eau de la feuille.• Permet de consolider le matelas de fibres.• Diminue l'épaisseur du papier.• Améliore l'état de surface du papier.
4	Sécherie	<ul style="list-style-type: none">• Élimine l'eau résiduelle de la feuille le plus possible par évaporation, en séchant à la vapeur.
5	Lisse	<ul style="list-style-type: none">• Rend le papier bien lisse.
6	Enrouleuse	<ul style="list-style-type: none">• Enroule la feuille de papier sous forme de bobine géante.

La table plate est une bande sans fin finement tissée. Ses mailles laissent passer l'eau tout en retenant les fibres. Elle se déplace continuellement entre trois rouleaux : celui de tête, celui aspirant la toile et celui d'entraînement de la toile. Pour éliminer l'eau uniformément sur toute la toile, on dispose entre le rouleau de tête et celui aspirant plusieurs organes d'égouttage (*hydrofoils*).

Chapitre 4

Productions de bioproduits

Exercices de réflexion

- B.1** Oui, car le biométhane est obtenu d'une ressource renouvelable moins polluante que l'essence et le mazout qui proviennent du pétrole, une ressource fossile épuisable.
- B.2** Lorsqu'on dispose d'une biomasse humide, on pourrait la valoriser par méthanisation, voie humide de production de bioénergie.
- B.3** Le biométhane est le biogaz débarrassé de gaz carbonique (CO_2) et des impuretés (ammoniac et sulfure d'hydrogène).
- B.4** Parce que les biocarburants de deuxième génération sont obtenus à partir de biomasses qui sont complètement utilisables (tous les éléments lignocellulosiques sont transformés) en plus d'être indépendants d'une surface agricole, donc ils ne viennent pas en compétition avec la production alimentaire.
- B.5** Produire du bioéthanol de deuxième génération est plus difficile, car la technologie pour la première génération est bien maîtrisée tandis que celle de la deuxième génération présente encore des défis technologiques.

Exercices d'application

- C.1**
 - a) 35,71 m³ de biogaz par jour
 - b) 214,26 6 kWh d'énergie par jour
 - c) 0,3% des besoins énergétiques de cette municipalité pourront être couverts par l'utilisation du biogaz produit chaque jour.
 - d) L'utilisation du biogaz au lieu de combustibles fossiles pourrait réduire les émissions de CO_2 équivalent à 39 000 kWh d'énergie (produite par des combustibles fossiles).
 - e) Oui, l'implantation du biodigesteur est économiquement et environnementalement justifiable, car la municipalité produit beaucoup moins de gaz carbonique (60% de moins) en employant cette méthode, en plus de dégrader les déchets organiques.

Productions de matières plastiques

Exercices de réflexion

B.1 Polymère ramifié (branché) : f

Copolymère alterné (1/1) : e

Copolymère : b, c, d, e, f

Deux polymères non combinés : a

Deux polymères combinés : b, c, d, e, f

Copolymère statistique : b

Copolymère alterné (4/4) : aucun

Si les monomères de départ sont le styrène ($C_6H_5 - CH = CH_2$) et l'éthylène ($CH_2 = CH_2$), voici les structures de copolymères possibles :

➤ Copolymère alterné (1/1) : $-(C_6H_5 - CH - CH_2) - (CH_2 - CH_2) -$

➤ Copolymère bloc (2/2) : $-(C_6H_5 - CH - CH_2)_2 - (CH_2 - CH_2)_2 -$

➤ Copolymère statistique : $-(C_6H_5 - CH - CH_2) - (CH_2 - CH_2) - (CH_2 - CH_2) -$

Non, il n'est pas possible d'obtenir un polymère réticulé avec ce couple de monomères, car ils ont tous les deux des fonctionnalités de deux. Pour obtenir un polymère réticulé, il faudrait une fonctionnalité de trois.

B.2 La structure A est la plus susceptible de conduire à un polymère cristallin.

a) Elle est la plus simple et la plus linéaire.

b) $D < B < C < A$

B.3 a) A

b) C

c) A

d) C

B.4 Les deux grands types de réactions de polymérisation sont la polyaddition et la polycondensation. Dans le cas de la polyaddition, les réactifs formant la chaîne se soudent sans élimination de résidus de synthèse. Dans le cas de la polycondensation, les réactifs se soudent également, mais avec l'élimination d'un résidu simple.

Exercices d'application

C.1 polymérisation en masse du styrène

1 = réacteur de prépolymérisation; 2 = tour de polymérisation; 3 = condenseur-réfrigérant; 4 = réservoir de stockage

Styrène, azote et polystyrène.

Chapitre 6

Productions chimiques inorganiques

Exercices de réflexion

- B.1** L'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure de sodium (NaCl) avec les trois versions industrielles de réalisation (cellule d'électrolyse à diaphragme, à cathode de mercure et à membrane) permet de produire de manière simultanée le chlore, l'hydrogène et la soude caustique.
- B.2** La cellule d'électrolyse à membrane est actuellement le procédé le plus utilisé, car il est le plus économique (consommation d'énergie la plus faible comparativement aux deux autres procédés) et plus écologique (usage des matériaux non toxiques).
- B.3** La cellule d'électrolyse à cathode de mercure est le procédé de production de chlore le plus toxique et le plus polluant à cause du mercure, élément très toxique qui compose la cathode.
- B.4** La voie de synthèse de l'hydrogène la plus propre est celle de l'électrolyse de l'eau.
- B.5** Les deux produits inorganiques les plus fabriqués et les plus utilisés mondialement sont l'acide sulfurique et l'ammoniac.
- B.6** La réaction d'oxydation du dioxyde de soufre est une réaction très exotherme qui conduirait à un chauffage excessif et donc destructeur dans le cas de l'usage d'un seul lit de catalyseur. La division du catalyseur en quatre lits permet un refroidissement du mélange réactionnel entre chacun de ces lits.
- B.7** Seulement 8% de la production mondiale de l'acide chlorhydrique se fait par synthèse directe car le reste est obtenu de manière indirecte, l'acide chlorhydrique étant un produit secondaire de plusieurs synthèses.
- B.8** L'électrolyse d'une solution de saumure ne produit pas assez de soude caustique. La caustification sert à produire la quantité supplémentaire nécessaire.

Exercices d'application

C.1

Différences	Ressemblances
La réaction qui a lieu à la cathode	La saumure (NaCl) est la matière première de l'électrolyse.
La conformation et le fonctionnement de la cellule d'électrolyse à cathode de mercure	La réaction qui a lieu à l'anode
Un seul compartiment contenant les 2 électrodes dans le cas de la cellule d'électrolyse à cathode de mercure versus deux compartiments pour les deux autres types de cellules	Les produits finaux de l'électrolyse : chlore, hydrogène et soude

- C.2** Procédé industriel Bayer pour la production de l'acide sulfurique
1 = chambre de combustion; 2 = réacteur catalytique; 3 = absorbeur intermédiaire; 4 = absorbeur final
A = air; B = soufre liquide; C = acide sulfurique à 98 %; D = acide sulfurique à 98 %; E = gaz résiduels;
F = acide sulfurique concentré (oléum)
- C.3** Procédé industriel de synthèse directe de l'acide chlorhydrique
1 = brûleur; 2 = séparateur de phases L-G; 3 = colonne de lavage
A = $\text{Cl}_2 + \text{N}_2$; B = $\text{H}_2 + \text{N}_2$; C = Eau; D = Acide faible; E = Gaz non absorbés; F = Gaz inertes; G = Solution de HCl
- C.4** Procédé industriel Ostwald de fabrication d'acide nitrique
1 = réacteur catalytique; 2 = absorbeur intermédiaire; 3 = dénitreur
A = air; B = NH_3 ; C = air secondaire; D = eau; E = HNO_3 à 60 %

Chapitre 7

Productions chimiques organiques

Exercices de réflexion

- B.1** Produits intermédiaires : styrène, aniline, phénol
Produits finis : polymères, solvants, polyesters
- B.2** Le benzène
- B.3** Ce type de catalyseur peut être désactivé en présence de chlore et de soufre.
- B.4** L'ajout de CO_2 supplémentaire dans la charge d'alimentation est nécessaire pour atteindre un rapport précis entre les concentrations des composants à l'entrée, qui favorisera la formation du méthanol seulement.

Exercices d'application

- C.1** Procédé industriel de fabrication de méthanol
1 = compresseurs en cascade; 2 = réacteur; 3 = réfrigérant; 4 = séparateur gaz-liquide; 5 et 6 = colonnes de distillation à plateaux
Gaz de purge; Produits légers; Méthanol; Autres alcools; Produits lourds
- C.2** Procédé industriel de synthèse du cyclohexane
1 = réacteur d'hydrogénation en phase liquide; 2, 5 et 8 = réfrigérants; 3 = compresseur; 4 = réacteur d'hydrogénation en phase vapeur; 6 et 9 = séparateurs gaz-liquide; 7 = colonne de stabilisation
Produits légers; Cyclohexane

Chapitre 8

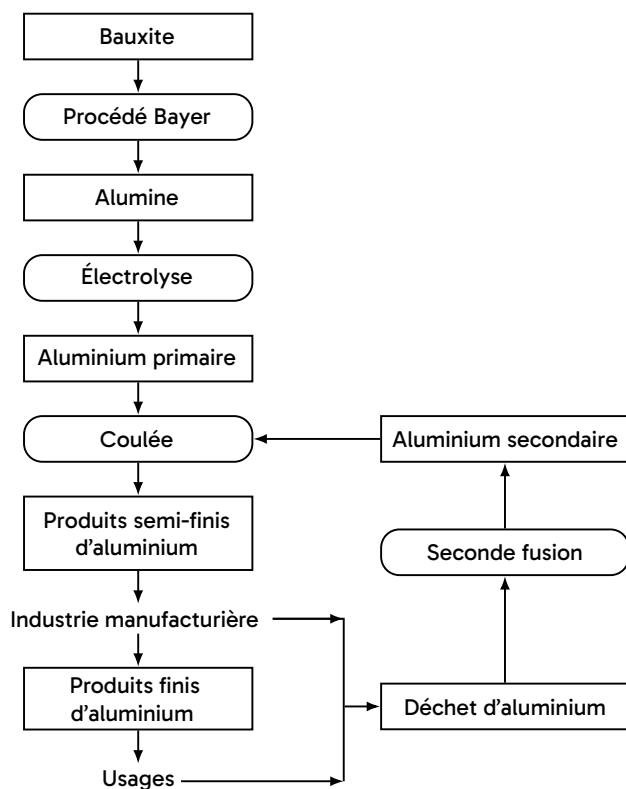
Productions métallurgiques

Exercices de réflexion

- B.1** La bauxite est la matière première dans le procédé de fabrication de l'aluminium.
- B.2** L'aluminium primaire est celui fondu pour une première fois tandis que celui secondaire est recyclé, donc fondu à plusieurs reprises.
- B.3** Quelques pourcents.
- B.4** Quelques pourcents.
- B.5** L'affinage thermique vise à éliminer l'excès d'oxygène et à permettre la coulée du cuivre. L'affinage électrolytique consiste à traiter le cuivre dans un bain d'électrolyse afin d'obtenir du cuivre de très haute pureté (99,95%).
- B.6** La ductilité est mise à profit pour concevoir des fils et des câbles.
- B.7** La dureté est mise à profit dans le domaine de la construction pour concevoir un matériel de finition, car sa surface reste intacte au fil du temps.
- B.8** La malléabilité est mise à profit pour concevoir les emballages alimentaires et la joaillerie.
- B.9** La bonne conductivité est mise à profit pour concevoir des fils conducteurs.
- B.10** La légèreté (masse volumique faible) est mise à profit pour concevoir des articles destinés au transport de tout genre.
- B.11** La résistance à la corrosion de certains métaux est mise à profit pour concevoir des objets qui sont sujets à la dégradation durant leur usage.
- B.12** Les deux types d'aluminium, primaire et secondaire, sont produits actuellement à l'échelle mondiale.

Exercices d'application

C.1



C.2 1 = broyeur; 2 = autoclave; 3 = décanteur; 4 = filtre-pressé; 5 = décomposeur; 6 = four de calcination; 7 = cuve d'électrolyse; 8 = fonderie

La bauxite est acheminée dans le broyeur (1). Elle est ensuite mélangée avec du NaOH dans l'autoclave (2), sous pression et à haute température. L'alumine est dissoute sous forme d'aluminate de sodium (phase liquide) et les impuretés précipitent (phase solide). Le mélange ainsi obtenu passe dans le décanteur (3) où il est additionné d'un flocculant. La décantation des impuretés sous forme de boues rouges permet une séparation grossière de la solution d'aluminate de sodium, qui sera ensuite passée à travers un filtre-pressé (4) avant d'être envoyée dans le décomposeur (5). Dans ce décomposeur, la solution d'aluminate de sodium est transformée en hydroxyde d'aluminium $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ et NaOH (peut être réutilisé dans le procédé). L'hydroxyde d'aluminium passe ensuite dans le four de calcination (6) ou il est chauffé et calciné. Par calcination, l'hydroxyde d'aluminium est transformé en alumine de haute pureté (environ 99%).

Médiagraphie

Monographies

- BACHMANN, Pierre et Paul TISSOT. *Précis de génie chimique*, Georg, Genève, © 1981, 449 p.
- BAÏLON, Jean-Paul et Jean-Marie DORLOT. *Des matériaux*, Presses Internationales Polytechnique, Montréal, © 2000, 736 p.
- BIMBENET, Jean-Jacques, Albert DUQUENOY et Gilles TRYSTRAM. *Génie des procédés alimentaires : des bases aux applications*, Dunod, Paris, © 2007, 574 p.
- BOSTYN, Stéphane, Olivier CHEDEVILLE et Henri FAUDUET. *Génie chimique et des procédés, 2^e année*, Dunod, Paris, © 2019, 264 p.
- CARREGA, Marc et Vincent VERNEY. *Matières plastiques : Propriétés, mise en forme et applications industrielles des matériaux polymères*, 4^e édition, Dunod, Paris, © 2017, 664 p.
- CHASSANIEUX, Christophe, Hervé LEFEBVRE et Sagrario PASCUAL. *L'indispensable en polymères*, Bréal, Rosny-sous-Bois, © 2008, 126 p.
- DAMIEN, Alain. *Guide du traitement des déchets*, 3^e édition, Dunod, Paris, © 2004, 432 p.
- DAMIEN, Alain. *La biomasse énergie : Définitions, ressources et modes de transformation*, 2^e édition, Dunod, Paris, © 2013, 294 p.
- DESSARTHE, A., et autres. *Plastiques, composites et élastomères dans les industries agro-alimentaires et connexes*, CETIM, Senlis, © 1996, 116 p.
- DUPEUX, Michel. *Aide-mémoire science des matériaux*, Dunod, Paris, © 2004, 336 p.
- DUVAL, Claude. *Matières plastiques et environnement*, 2^e édition, Dunod, Paris, © 2009, 336 p.
- FAUDUET, Henri. *Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique. Aspects théoriques et pratiques*, 2^e édition, Lavoisier, Paris, © 2012, 769 p.
- GRINBERG, Ivan. *L'aluminium, un si léger métal*, Gallimard, Paris, © 2003, 128 p.
- JUAPI, Luan. *Contrôle de la qualité – MSP, analyse des performances et contrôle de réception*, Dunod, © Paris, 2002, 282 p.
- KOLLER, Emilian. *Traitement des pollutions industrielles*, 2^e édition, Dunod, Paris, © 2009, 570 p.
- KOLLER, Emilian. *Aide-mémoire de génie chimique*, 4^e édition, Dunod, Paris, © 2013, 559 p.
- LAVALLÉE, Paul. *Les végéplastiques*, MultiMondes, Montréal, © 2016, 98 p.
- MURRY, Guy. *Aide-mémoire métallurgie – Métaux et alliages, comportements mécaniques, traitements thermiques*, Dunod, Paris, © 2023, 330 p.

- PERRIN, Robert et Jean-Pierre SCHARFF. *Chimie industrielle 1*, Masson, Paris, © 1993, 667 p.
- PERRIN, Robert et Jean-Pierre SCHARFF. *Chimie industrielle 2*, Masson, Paris, © 1993, 630 p.
- PLAMONDON, Chantal et Jay SINHA. *Vivre sans plastique : des outils écologiques à notre portée*, Les Éditions Écosociété, Montréal, © 2019, 237 p.
- PIPERAUD, Michel. *Précis de matières plastiques : Structures-propriétés, mise en œuvre, normalisation*, Nathan, Paris, © 1996, 232 p.
- ROIGT, Hubert. *Chimie sur mesure 4 – Les non-métaux*, Éditions Delphin, Trois-Rivières, © 1984, 104 p.
- RUP-Jacques, Sandrine et Éric JACQUES. *De la chimie fossile à la chimie durable*, Éditions Ellipses, Paris, © 2017, 257 p.
- VALLA, Jean-Philippe. *Le biogaz : manuel pratique*, Éditions de Terran, Escalquens, © 2016, 136 p.
- WENDT, Hartmut et Gerhard KREYSA. *Génie électrochimique, Principes et procédés*, Dunod, Paris, © 2001, 386 p.

Le manuel *Productions industrielles* s'adresse principalement aux personnes qui étudient dans le programme *Techniques de procédés industriels* et d'autres programmes techniques équivalents. Son originalité tient au fait qu'il est le premier ouvrage de langue française qui décrit l'ensemble des types d'industries du secteur de la fabrication et qui est adapté au niveau collégial. Son contenu vise plus particulièrement l'acquisition des compétences spécifiques à la formation technique industrielle : « Superviser le déroulement d'une production » et « Analyser le fonctionnement de procédés types industriels ».

Divisé en huit chapitres, cet ouvrage traite des notions théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension des procédés de fabrication de sept types de productions industrielles.

On y présente ces procédés en les reliant aux fonctions des techniciens et techniciennes dans différents domaines d'activité. La terminologie employée correspond d'ailleurs à celle qui est couramment utilisée dans l'industrie.

Ce manuel propose des schémas variés pour expliquer le fonctionnement de certains appareils, ce qui facilite la compréhension. Il offre également une série d'exercices à la fin de chaque chapitre ainsi qu'un solutionnaire complet en annexe.



À propos de l'auteure

Carmen M. Tibirna, M. Sc. (génie chimique), Ph. D. (chimie)

Carmen M. Tibirna a fait ses études en génie chimique organique à l'Université technique Gheorghe Asachi de Iasi, en Roumanie. Elle a ensuite travaillé comme chercheuse à l'Institut de chimie macromoléculaire Petru Poni de la même ville. Elle a bonifié sa formation d'une maîtrise en génie chimique et d'un doctorat en chimie, deux diplômes décernés par l'Université Laval, à Québec. Pendant ses études postdoctorales en chimie verte subventionnées par L'Oréal Paris, Mme Tibirna a enseigné à temps partiel comme chargée de cours à l'Université Laval. En parallèle, elle a commencé à enseigner au Cégep de Lévis en 2007. Un diplôme de deuxième cycle en enseignement du collégial (Performa) de l'Université de Sherbrooke s'est ajouté à sa formation universitaire en 2013.

À titre de professeure de génie chimique et coordonnatrice du programme *Techniques de génie chimique* du Cégep de Lévis, l'auteure a œuvré à l'élaboration et à l'implantation d'un nouveau programme, *Techniques de procédés industriels* (TPI), de 2016 à 2019. Elle est aussi engagée dans la création et le fonctionnement d'une entreprise-école affiliée à ce programme d'études. Carmen M. Tibirna est l'auteure de plusieurs articles scientifiques portant sur la chimie appliquée ainsi que d'un premier manuel technique de niveau collégial, *Procédés de séparation*, publié en 2023 par le CCDMD.

ISBN 978-2-89470-437-0



9 782894 704370