



Mémoire de Fin d'Etude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme
de Master en Pétrochimie et Procédés Polymères

Présenté par

ABED Zineb

THEME

Modélisation et optimisation des paramètres de production
PEHD grade 5502 « CP2K » par réseaux neuronaux

Soutenu le : 30/06/2025

Devant le Jury composé de :

Boussouf Ibtissem	Présidente	Docteur	Université 20 Aout 1955-SKIKDA
Saadi Chahrazed	Rapporteuse	Docteur	Université 20 Aout 1955-SKIKDA
Chellil Wassila	Examinatrice	Docteur	Université 20 Aout 1955-SKIKDA
Zaidi Ahmed	Co- Rapporteur	Docteur/ Ingénieur	Sonatrach CP2K

Année Universitaire 2024 - 2025

"Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs n'a jamais tenté d'innover."

ALBERT EINSTEIN

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier notre DIEU, notre créateur pour m'avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je souhaite adresser, mes remerciements les plus sincères à mon encadrant Dr : SAADI CHAHRAZED pour sa disponibilité, sa patience et son précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail.

J'exprime ma sincère gratitude envers monsieur ZAIDI AHMED, ingénieur en mécanique au CP2K SKIKDA, pour son soutien précieux et son encouragement constants. Son aide pratique et sa disponibilité ont été essentielles pour la réalisation de ce travail, et je le remercie pour son encadrement de qualité, sa patience et son dévouement au sein de l'entreprise.

Également à remercier les membres du jury d'avoir consacré une partie de leur temps à la lecture de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à tous nos professeurs qui ont contribué à ma formation.

Mes derniers remerciements et ce ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Aux êtres qui me sont les plus chers mon père ABDELKADER et ma mère SERRATI DJAMILA. Que Dieu préserve bonne santé et longue vie.

A mon cher mari ZIAD, dont le soutien constant, ses encouragements et sa présence inébranlable ont été d'une grande aide tout au long de mon parcours. Il m'a permis de surmonter de nombreuses difficultés et m'a motivée à poursuivre mes études pour obtenir ce diplôme une seconde fois. Son amour, sa patience et sa compréhension ont été des piliers essentiels dans ma réussite. Merci du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi.

A ma fille future, tu n'es pas encore là, mais déjà tu habites mes pensées, mes rêves et mes espoirs. Que ce travail soit une preuve de présence et d'amour, et qu'il t'inspire un jour à croire en toi et à poursuivre tes ambitions avec courage et passion. Avec tout mon amour.

A mes chers frères « Ali, Zoubir, Hamza et Zakaria » et mes chères sœurs « Fayrouz, Moufida, Meriem ».

A ma petite sœur Nahla, en témoignage de mon amour et en reconnaissance de son soutien tout au long de mon parcours.

A toute ma famille, mes amies et mes collègues.

Merci à tous.

ZINEB

RÉSUMÉ

Ce mémoire a pour objectif de modéliser et d'optimiser les paramètres de production du polyéthylène haute densité (PEHD) en utilisant les réseaux de neurones artificiels. Les variables clés considérées sont les débits d'éthylène, d'isobutane, d'hexène et de catalyseur. Cette approche a permis de prédire avec précision la densité et le taux de solide, et d'améliorer la performance du procédé.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Position géographique du CP2K...	4
Figure I.2 : Photo représentatif des principales installations de l'unité Cp2k...	6
Figure I.3 : L'organisation d'unité CP2K...	7
Figure I.4 : Système de traitement de l'éthylène.....	10
Figure I.5 : Réacteur d'élimination d'O ₂	11
Figure I.6 : Réacteur d'élimination du CO.....	12
Figure I.7 : Réacteur d'élimination du CO ₂	13
Figure I.8 : Réacteur d'élimination d'H ₂ O	14
Figure I.9 : Traitement de l'hexène	14
Figure I.10 : Système de dégazage de l'isobutane	15
Figure I.11 : Système de traitement de l'isobutane Recyclé... ..	16
Figure I.12 : L'étape d'activation du catalyseur.....	17
Figure I.13 : Stockage du produit fini... ..	19
Figure II.1 : Schéma représentatif du polyéthylène	21
Figure II.2 : Principe de détermination du MFI.....	28
Figures II.3 : Appareil du point de ramollissement Vicat.....	29
Figure II.4 : Dispositif pour la mesure de la densité à 23°C.....	29
Figure II.5 : La géométrie du pénétrateur de la dureté SHORE D.....	30
Figure II.6 : Appareillage de mesure de la dureté SHORE D... ..	30
Figure II.7 : Schéma d'un Mouton-pendule pour les essais Charpy et Izod	31
Figure II.8 : comparative pour le test de la résilience	31
Figure II.9 : Courbe contrainte-déformation d'un polymère semi cristallin en traction uniaxiale.....	33
Figure III.1 : Schéma simple d'un réseau de neurone	39
Figure III.2 : Modèle de base d'un neurone formel.....	40

Figure III.3 : Réseau multicouche.....	41
Figure III.4 : Réseau de neurone dynamique (Modèle de Hopfield)	41
Figure III.5 : Quelques architectures des réseaux neuronaux	42
Figure III.6 : Modèle non linéaire d'un neurone (Haykin, 1999).....	42
Figure IV.1 : Évaluation des performances du modèle pour la prédiction de la densité et du taux de solides... ..	50
Figure IV.2 : Architecture du réseau de neurones artificiels pour la prédiction de la densité et taux de solides du PEHD	52
Figure IV.3 : Analyse du profileur de prévision des paramètres influents sur la densité et le taux de solides en fonction des débits d'alimentation.....	53
Figure IV.4 : Surface de réponse 3D de la densité en fonction des débits FC_HEX et FC_Eth.....	55
Figure IV.5 : Surface de réponse 3D du taux de solides en fonction des débits d'éthylène (FC_Eth) et d'hexène (FC_HEX)	56
Figure IV.6 : Graphique des résidus en fonction des valeurs prédites de la densité (phase d'apprentissage et de validation)	57
Figure IV.7 : Graphique des résidus en fonction des valeurs prédites du taux de solide (phase d'apprentissage à gauche, validation à droite).....	58
Figure IV.8 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la densité (phase d'apprentissage à gauche, validation à droite)	59
Figure IV.9 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues du taux de solide (Apprentissage à gauche, Validation à droite)	60
Figure IV.10 : Taux de solide expérimental vs taux de solide prédit.....	63
Figure IV.11 : Densité expérimentale vs densité prédite	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Différents grades du PEHD produits au niveau de CP2K et leurs utilisations...8

Tableau IV.1 : Liste des paramètres clés et types de données dans le processus de production du PEHD.....48

Tableau IV.2 : Paramètres de travail et niveaux pour l'étude expérimentale de la production de PEHD.....62

Abréviations

CP2K : Complexe Pétrochimie 2 Skikda.

PEHD : Polyéthylène à Haute Densité.

ENIP : Entreprise Nationale des Industries Pétrochimiques.

POLYMED : Méditerranéenne des Polymères.

BAD : Banque Algérienne de Développement.

FIR : Force d'Intervention et de Réserve.

CP1K : Complexe Pétrochimique 1 de Skikda.

LRP : Liquéfaction Raffinage et Pétrochimie.

RPC : division Pétrochimique.

PE : Polyéthylène.

PP : Polypropylène.

PVC : Polychlorure de Vinyle.

PS : Polystyrène.

PEBD : Polyéthylène Basse Densité.

PEMD : Polyéthylène Moyenne Densité.

PE-BDL : polyéthylène à basse densité linéaire.

PE-UHPM : polyéthylène à masse molaire élevée.

PE-R : polyéthylène réticulé.

PE-RHD : polyéthylène réticulé à haute densité.

PE-TBD : polyéthylène à très basse densité.

PEBDR : Polyéthylène Basse Densité Radicalaire.

IF : Indice de Fluidité à chaud.

T_g : Température de transition vitreuse.

UV : Ultraviolet.

MFI : Indice de Fluidité.

ASTM: Anciennement American Society for Testing and Materials.

SOR : Relaxation Successive.

EDO : Equations Différentielles Ordinaires.

EDP : Equations Différentielles Partielles.

RN : Réseau de Neurones.

RNA : Réseau de Neurones Artificiels.

FC_Eth : Débit d'Ethylène.

FC_HEX : Débit d'Hexène.

FC_isob : Débit d'Isobutane Recyclé.

FEEDER_CAT : Dosage du Catalyseur.

TC_reac : Température du réacteur.

PI_reac : Pression d'alimentation du réacteur.

TDI_REFR : Température du réfrigérant.

MLP : Perceptron Multicouche.

RMSE : Erreur quadratique moyenne.

R² : Coefficient de détermination.

SSE : Somme des carrés des écarts.

MLP : Multi-Layer Perceptron.

Lettres grecques

E : module d'élasticité (N/m²).

σ : contrainte (N/m²).

ϵ : allongement ou déformation (%).

F : charge de traction supportée par l'éprouvette (N).

S : section initial (m²).

ΔL : déformation à la rupture.

L₀ : longueur initiale de l'éprouvette.

L : longueur finale de l'éprouvette.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, les matériaux plastiques jouent un rôle primordial dans tous les domaines de la vie. Ils accompagnent la vie trépidante de la société moderne, ils facilitent la vie quotidienne et sont un élément indissociable de la technologie industrielle.

Les matériaux polymères offrent une facilité de transformation et sont donc largement utilisés dans tous les secteurs industriels

Au niveau de la Société Nationale « SONATRACH » et exactement dans son complexe Pétrochimique « CP2K » de la zone industrielle de Skikda, se fait la production de l'un des matériaux plastiques qui est couramment utilisée : Le Polyéthylène à Haute Densité « PEHD » par voie d'une réaction de polymérisation de l'éthylène.

Neuf grades du PEHD sont produites selon le procédé PHILIPS :5502,TR140,TR 144, TR402, TR418, 6006L, 6030, 6040, et 6080.Chaque grades est destiné pour un mode de transformation qui convient avec son application (fabrication : des objets plastiques des films et pipes pour gaz et eau...).

Mon stage a été effectué au niveau de département de production CP2K pour analyse approfondie des différents paramètres influençant la production du PEHD.

L'objectif de ce mémoire de fin d'étude est : comment modéliser et optimiser les différents paramètres de production du polyéthylène haute densité (PEHD), notamment le grade 5502, afin d'améliorer l'efficacité du processus de fabrication, d'assurer la qualité du produit final, de réduire les couts et d'atteindre une production durable tout en respectant les normes industrielles et environnementales.

Cela implique d'analyser les paramètres influençant la production, tels que débit d'éthylène, débit d'isobutane, consommation catalyseur, la densité, taux de solide... puis de

développer des modèles mathématiques permettant de prévoir et d'optimiser ces paramètres pour maximiser le rendement et la qualité du PEHD.

Ce manuscrit comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre possède généralités sur l'entreprise « CP2K ».

Le deuxième chapitre présente le polyéthylène à haute densité « PEHD ».

Le troisième chapitre présente méthodes numériques et les réseaux neuronaux.

Le quatrième présente chapitre modélisation et optimisation des paramètres de production PEHD grade 5502.

Pour compléter le présent travail. Le mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur l'entreprise « CP2K »

I.1 Introduction

Ce chapitre propose une vue d'ensemble du complexe pétrochimique 2 de SKIKDA « CP2K » ; en mettant en avant son implantation géographique, les grandes étapes ayant marqué la construction et la mise en service de l'unité de production de polyéthylène haute densité (PEHD). Il retracera également l'évolution historique du polyéthylène, depuis sa découverte jusqu'à son développement industriel. L'organisation interne du complexe sera ensuite détaillée, avec une présentation des différents départements et des rôles spécifiques qui leur sont attribués. En conclusion, la gamme des grades de PEHD produits par CP2K sera présentée, avant d'aborder les principaux types de polyéthylène ainsi que les principales voies de synthèse utilisées pour leur élaboration.

I.2 Historique

Dans le cadre de la diversification des produits pétrochimiques et en 1988 ENIP et REPSOL ont décidé d'inclure le projet POLYMED « Méditerranéenne des Polymères » qui a été créé dans le cadre d'un partenariat international entrant dans la stratégie de développement de l'ENIP, en 1989 le projet a été confirmé et en 1990 ENIP et REPSOL ont signé un protocole d'accord et par la suite la société d'économie mixte Algéro-Espagnole POLYMED a été créée en décembre de la même année (64% ENIP / 13% BAD / 23%REPSOL QUIMICA).

En avril 1991 fut la signature d'un contrat de réalisation du projet avec un consortium de trois sociétés espagnoles : INITEC, DRAGADOS, TECNICA REUNIDAS. La mise en place du financement espagnol d'une durée de 4 ans jusqu'à 1995 ou la reprise des travaux d'engineering.

En 1996 l'ouverture du chantier et en 1997 le lancement des travaux de génie civil et des infrastructures. En 2002 l'achèvement de la construction de l'usine et la signature de la restructuration financière de POLYMED au niveau de la chefferie du gouvernement ministériel et accord du chef du gouvernement pour son plan de restructuration financière.

Le 16 Janvier 2004 libération du financement SONATRACH pour le reste à réaliser et le démarrage de l'usine de POLYMED, en Janvier 2011 ENIP est réintégré au groupe SONATRACH à 100% sous forme d'une division Pétrochimique (PEC) ainsi l'usine de POLYMED sous une nouvelle appellation CP2K « Complexe Pétrochimique 2 de SKIKDA».

En 2016 dans la restructuration du groupe SONATRACH la DCG/PEC est entrée sous la coupe de LRP (Liquéfaction Raffinage et Pétrochimie).

I.3 Présentation du complexe CP2K

Le Complexe Pétrochimique CP2K est implanté à l'intérieur de la zone industrielle de Skikda, d'une superficie de 166800 m² dont 10% bâtis. Il se trouve à 6 km à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Skikda et à une hauteur moyenne d'environ 6 m au-dessus du niveau de la mer. Il est limité au nord par la mer Méditerranée, au sud par la route principale de la zone industrielle, à l'est la force d'intervention et de réserve (FIR) et à l'ouest CP1K (Complexe Pétrochimique 1 de SKIKDA).

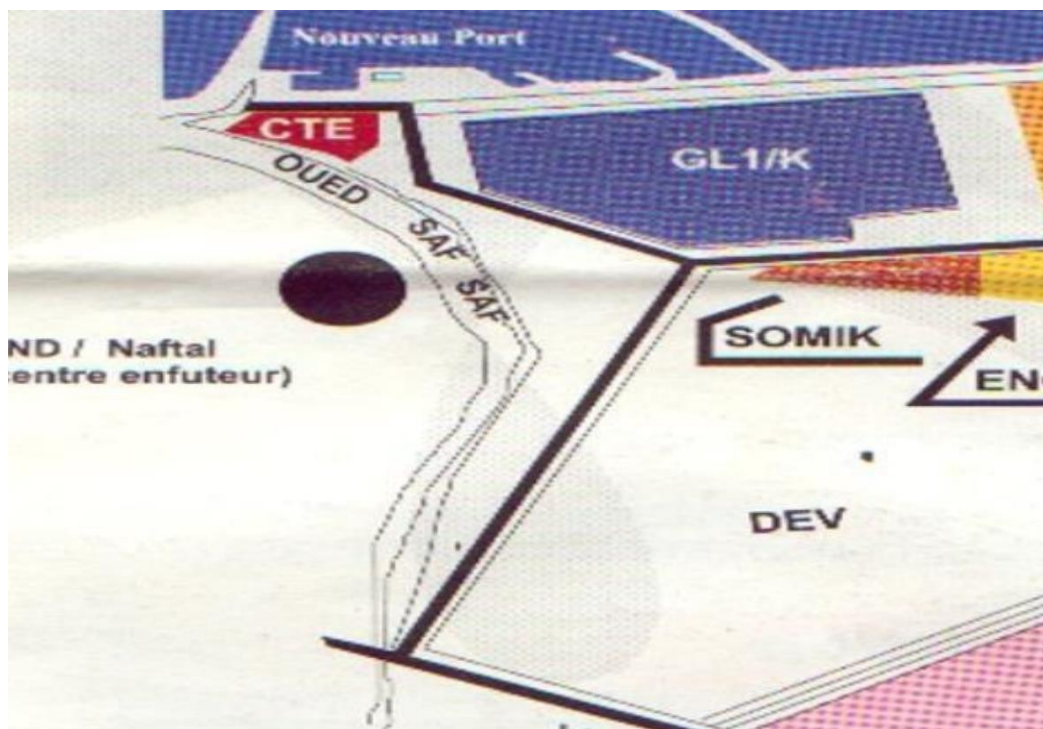


Figure I.1 : Position géographique du CP2K

I.3.1 Activités du complexe CP2K

Le CP2K est conçu pour produire du polyéthylène haute densité (PEHD) d'une capacité de 130 000 tonnes/an. [1]

I.3.2 Description du complexe CP2K

Le complexe est composé de 4 zones principales citées ci-dessous :

I.3.2.1 Zone d'off site.

Elle comporte les utilités (chaudières, air, azote, eau distillée, eau anti- incendie, eau potable et détente de gaz), l'activation du catalyseur.

I.3.2.2 Zone humide

Elle s'appelle aussi zone de réaction, les matières premières avant d'entrer au réacteur passent par les traiteurs afin d'éliminer les impuretés.

I.3.2.3 Zone sèche

Elle contient : l'extrudeuse, les soufflantes, les silos de stockage du produits (poudre et granulé) et l'ensachage.

I.3.2.4 Zone bâtiment

Elle englobe : le bloc administratif, la cantine et les vestiaires, le bloc sécurité et l'infirmerie, le magasin de la pièce de rechange et l'atelier de maintenance, le bloc exploitation, la sous station haute et basse tension ainsi que la salle de contrôle et le laboratoire. [1]

1.3.3 Les installations de procédé

Les principales installations présentées dans la figure 2 sont :

- ✓ **Le réacteur** : Tuyauterie en boucle fermée destinée pour la polymérisation ;
- ✓ **L'extrudeuse** : Système de finition de produit sous forme de granulés ;
- ✓ **L'ensachage** : Système automatique d'emballage du PEHD. [1]

Il existe d'autres installations auxiliaires nécessaires pour le procédé et qui sont :

- Production de vapeur, électricité, air etc....
- Traitement des effluents
- Stockage de la matière première et des additifs
- Magasin de stockage du produit fini.

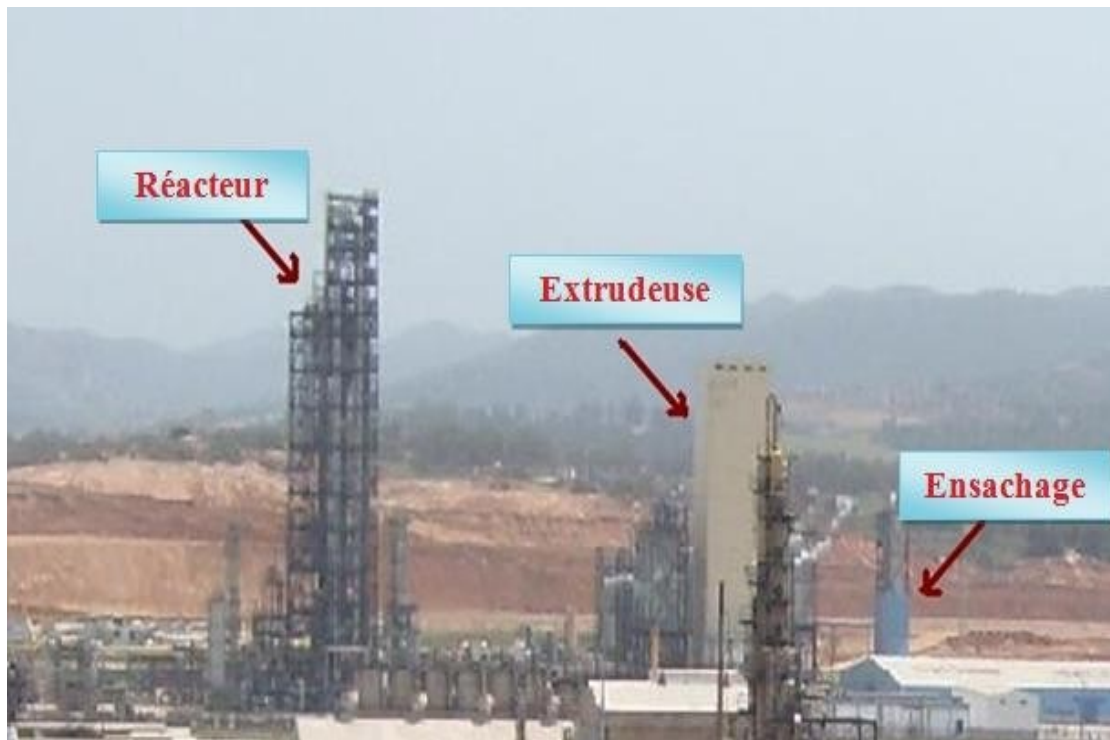


Figure I.2 : Photo représentatif des principales installations de l'unité Cp2k

I.4 Organisation du complexe CP2K

Le complexe CP2K est organisé comme suit :

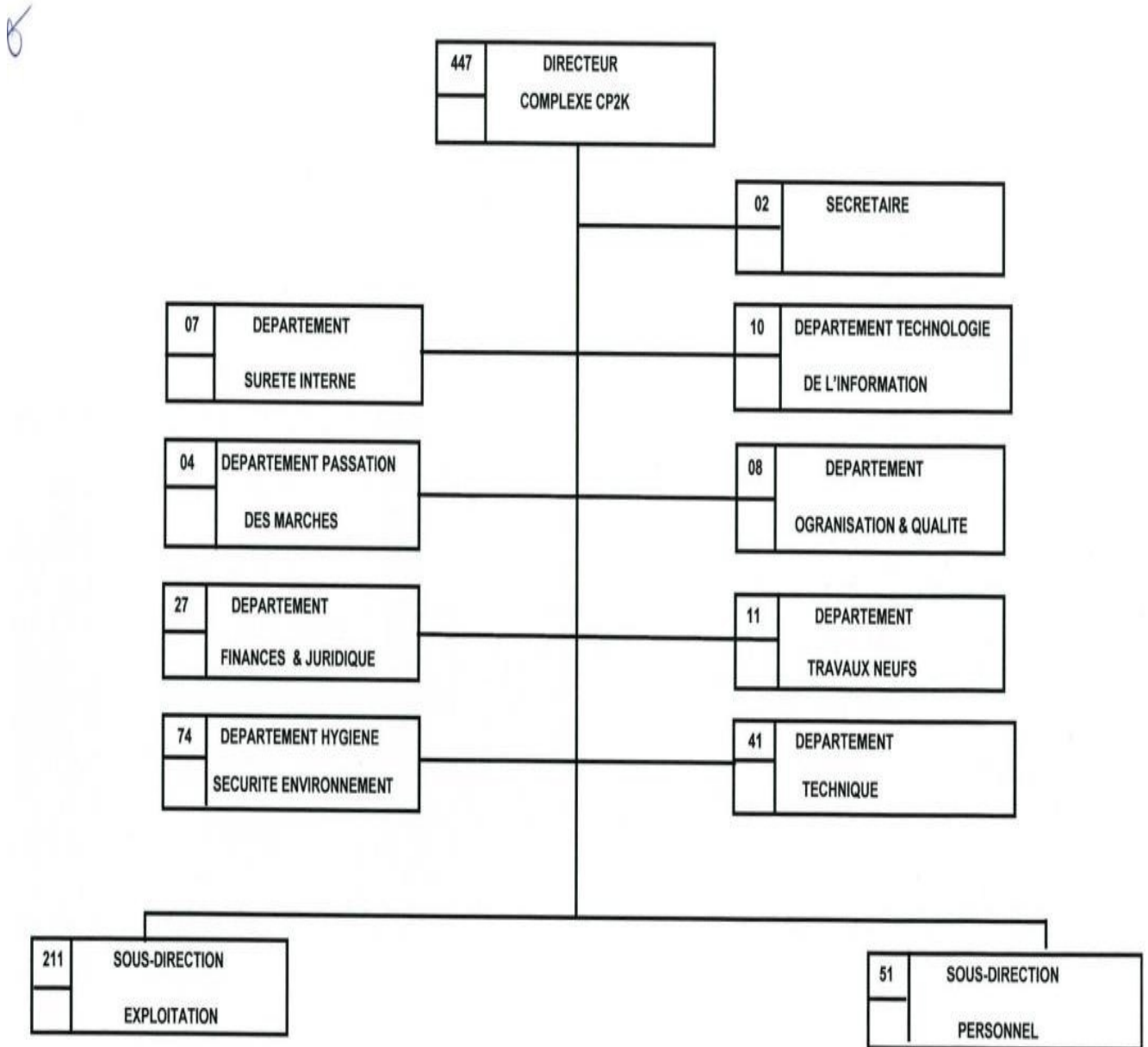


Figure I.3 : L'organisation d'unité CP2K

I.5 Les grades du PEHD produits au niveau de CP2K

Compte tenu des nombreuses applications du PEHD, telles que la fabrication de tuyaux, de films plastiques pour divers usages, de bouteilles, etc., différents grades doivent être produits.

Le complexe CP2K propose neuf grades de PEHD, chacun étant caractérisé par son indice de fluidité et sa densité, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.1 : Différents grades du PEHD produits au niveau de CP2K et leurs utilisations

Grade	Indice de fluidité (poudre/granulé)	Densité	Utilisation
TR402	0,11 -0,19 / 0,08-0,14	0,9430 -0,9460	Pipe :(Tube eau).
TR418	-	-	Tube gaz.
5502	0,55 -0,70/ 0,27-0,43	0,9530 -0,9580	Soufflage : des bouteilles de petite et grande taille.
TR140	0,33 -0,48 / 0,20-0,36	0,9430 -0,9480	Film : usage général toute sacherie.
TR144	0,25 -0,38 / 0,14-0,24	0,9420 -0,9470	Film : usage général toutes sacherie.
6080	7,0-10,0 / 6,80-9,20	0,9590 -0,9650	Injection: Palette, caisse, bidon ,bouchon, casier, articles de ménage.
6030	2,0 -3,80 / 1,80 -3,20	0,9590 -0,9650	Injection: Palette, caisse, bidon ,bouchon, casier, articles de ménage.
6040	3,0 -5,80 / 2,80-5,20	0,9590 -0,9650	Injection: Palette, caisse, bidon ,bouchon, casier, articles de ménage..
6006L	0,80 -1,15 / 0,47-0,73	0,9570 min	Soufflage :Bouteilles de petite et grande taille.

I.6 Procédés de fabrication du PEHD

I.6.1 Fonctionnement du Procédé PHILIPS

L'usine CP2K comporte deux procédés de production dans une même installation :

- Procédé Phillips.
- Procédé Ziegler.

Mais depuis son premier démarrage, elle n'utilise que le procédé Phillips, car le catalyseur utilisé dans le procédé Ziegler est cher par rapport à celui utilisé dans le procédé Phillips.

Le procédé Phillips, connu sous le nom de « PF process » ou procédé de particules, qui a été conçu pour l'usine de POLYMED, exige une grande pureté de la matière première et ne tolère que des quantités infimes de poisons dont leur présence peut empêcher le bon déroulement du réacteur ou altérer la qualité du produit obtenu. [1]

Ce procédé permet d'obtenir des polymères se situant dans une gamme d'indice de fluidité de 0,10 à 36 et une densité comprise entre 0,935 et 0,965. [1]

I.6.2 Les charges utilisées

- ❖ **L'éthylène** : la charge principale en phase gazeuse.
- ❖ **L'isobutane** : le milieu réactionnel en phase liquide
- ❖ **L'hexène** : en phase liquide
- ❖ **L'hydrogène** : en phase gazeuse avec de faibles quantités
- ❖ **Le catalyseur** : Trioxyde de chrome (Cr_2O_3) sur un support de silice. [1]

I.6.3 Les conditions opératoires de la réaction de polymérisation

Les deux conditions essentielles dans le réacteur sont :

- ❖ **La température** : de 93 à 110°C, selon le grade à produire.
- ❖ **La pression** : de 42 à 44 bars, selon la fermeture ou l'ouverture des vannes de décharge. [1]

I.6.4 Les étapes du procédé PF

Le procédé de particules « PF » est divisé en une série d'étapes ou systèmes :

- ❖ Traitement des matières premières.
- ❖ Activation et addition du catalyseur.
- ❖ Polymérisation dans un réacteur sous forme de boucle.
- ❖ Système de flash et séchage du polymère.

- ❖ Purification et récupération du gaz de recyclage.
- ❖ Système de finition.
- ❖ Ensachage.

I.6.4.1 Traitement des Matières Premières

La matière première subit une série de traitement avant d'être injectée dans le réacteur. L'éthylène a de multiples traiteurs chacun selon son rôle d'élimination des poisons spécifiques qui sont sous l'ordre suivant :

L'acétylène, l'oxygène, le mono puis le dioxyde de carbone enfin l'humidité ; par contre les autres réactifs comme l'isobutane (frais et recyclé), l'hexane et l'hydrogène n'ont qu'un seul traiteur pour chacun. [1]

I.6.4.1.1 L'Ethylène

Est la matière première du procédé, il est reçu à l'Usine, moyennant une tuyauterie provenant de l'installation d'éthylène adjacente à celle-ci, à 16,9 kg/cm²g et à la température ambiante. Pour l'élimination des impuretés trouvées dans l'éthylène qui résultent de son craquage ou de son stockage et transport, il passe par les étapes présentées dans le schéma ci-dessous :

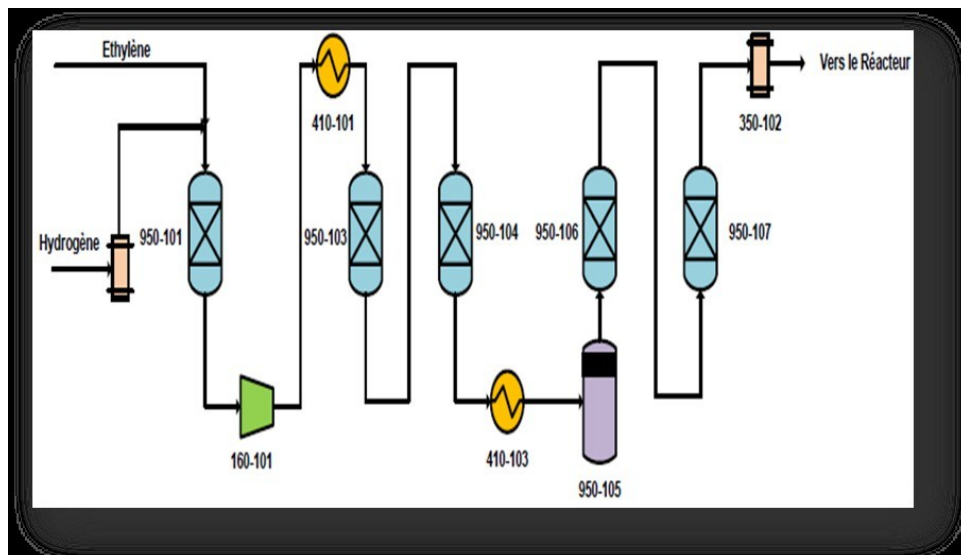


Figure I.4 : Système de traitement de l'éthylène

I.6.4.1.1.1 L'élimination de l'acétylène

L'hydrogène passe à travers le filtre 350-133, où sont éliminées les particules solides, puis il se mélange avec l'éthylène et ils passent au convertisseur d'acétylène 950-101. Il contient 2453 kg du catalyseur BASF RO-20/13, pour éthylène selon la réaction.



I.6.4.1.1.2 L'élimination de l'oxygène

Le réacteur d'élimination de l'oxygène contient 12350 kg du catalyseur BASF R3-15, comme présente la figure I.5.

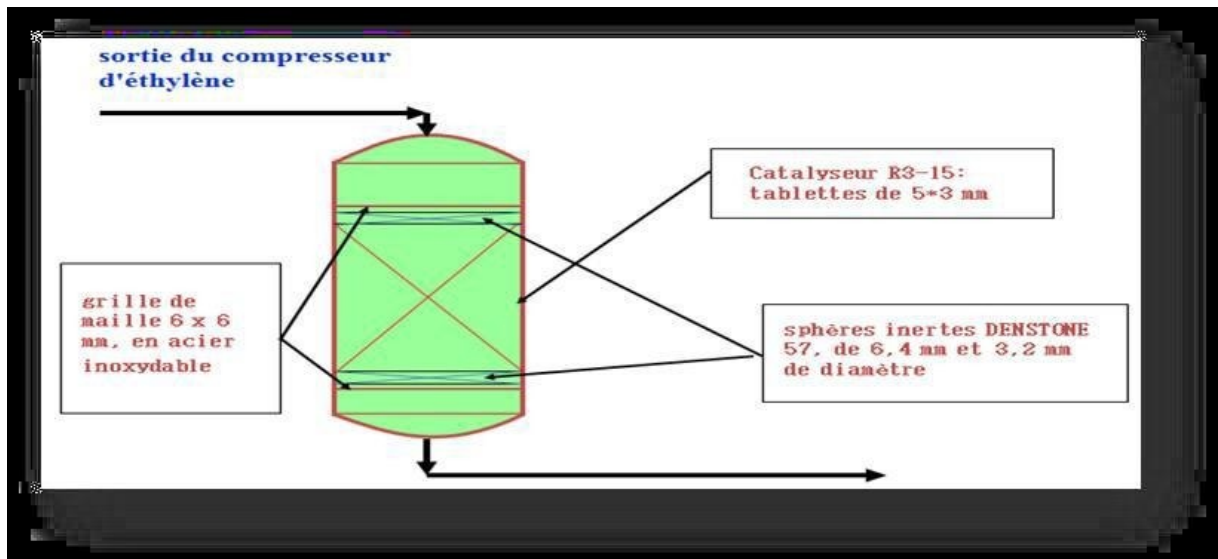
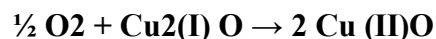
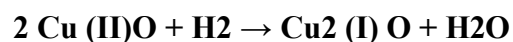


Figure I.5 : Réacteur d'élimination d'O₂

En opération normale, le flux d'éthylène à travers le réacteur est dans le sens descendant. La réaction entre l'O₂ et le support solide est mentionnée ci-dessous :

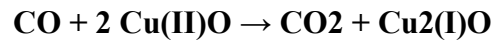


Un seul réacteur se trouvera en service par contre le second sera en régénération, cette dernière se passe selon la réaction chimique suivante :



I.6.4.1.1.3 L'élimination du monoxyde de carbone (CO)

Le courant d'éthylène continue son parcours en passant par les réacteurs d'élimination du monoxyde de carbone 950-104 A/B qui contiennent 12350 kg d'un catalyseur BASF R3-15 à base de CuO comme présente la figure (20), l'opération se passe suivant la réaction :



Catalyseur utilisé dans ce traitement subit une saturation donc il faut faire une régénération suivant cette réaction :

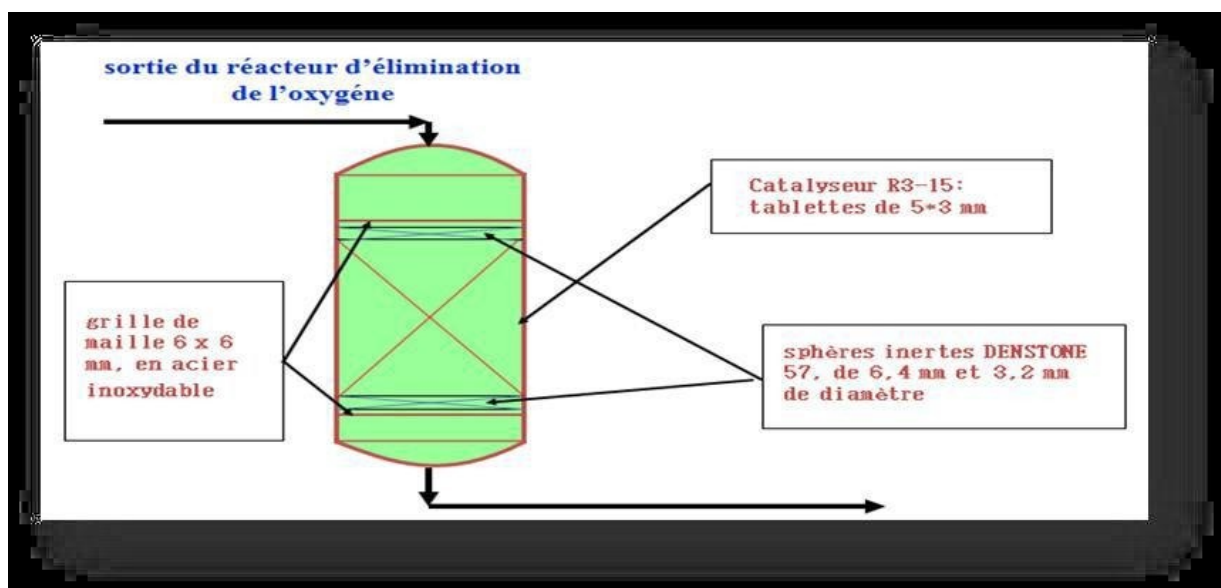
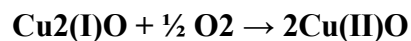


Figure I.6 : Réacteur d'élimination du CO

I.6.4.1.1.4 L'élimination du dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone présent dans le courant d'éthylène doit être éliminé, car c'est un poison fort pour le catalyseur XPF utilisé dans la réaction de polymérisation. Les réacteurs 950-106 A/B contiennent 2 types d'alumines Selexsorb CD et Selexsorb COS.

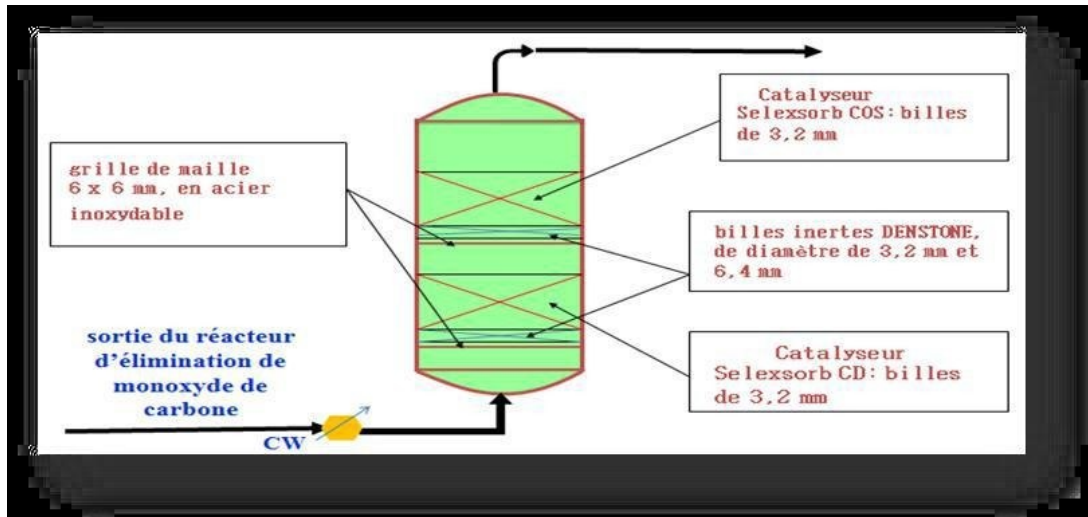
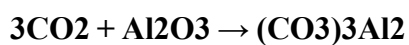


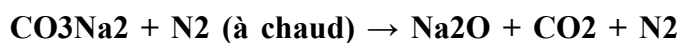
Figure I.7 : Réacteur d'élimination du CO₂

Le catalyseur utilisé dans cette opération est à base d'Al₂O₃, Na₂O₃ d'où le dioxyde de carbone forme un composé complexe avec l'oxyde de sodium à l'intérieur de la structure moléculaire de l'alumine selon les réactions chimiques suivantes :



Le CO₂ sera retenu par l'alumine jusqu'à ce que les gaz chauds de régénération rompent les liaisons et que le dioxyde de carbone soit entraîné hors du lit.

Comme explique la réaction suivante :



I.5.4.1.1.5 L'élimination de l'H₂O

L'éthylène est séché dans les sècheurs 950-107 A/B. Le flux d'éthylène traversant le lit est dans le sens ascendant. L'eau et le méthanol qui sont éliminés du courant d'éthylène sont retenus dans un lit à tamis moléculaire, ZEOCHEM 13X. Le sécheur fonctionne selon un principe d'adsorption physique qui est une fixation des molécules d'H₂O sur la surface poreuse de l'adsorbant jusqu'à la saturation de ce dernier qui sera régénéré tous les 14 jours avec un courant d'azote chaud

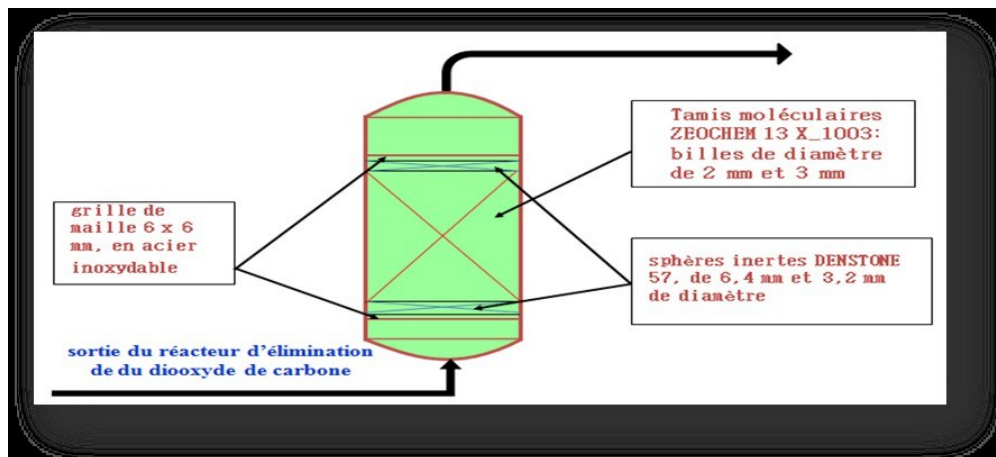


Figure I.8 : Réacteur d'élimination d'H₂O

I.6.4.1.2 L'hexène

L'hexène est le composé ajouté en petite quantité au réacteur pour produire des copolymères, il altère la structure moléculaire du polymère et change donc les propriétés physiques de ce dernier.

Avant qu'il entre dans le réacteur il passe par des étapes de traitements commençant par la colonne de dégazage 950-111 pour éliminer le gaz absorbé dans le courant puis il sera séché dans le traiteur d'élimination de l'eau 950-114, qui fonctionne par l'adsorption sur un tamis moléculaire ZEOCHEM 13X, type 1003

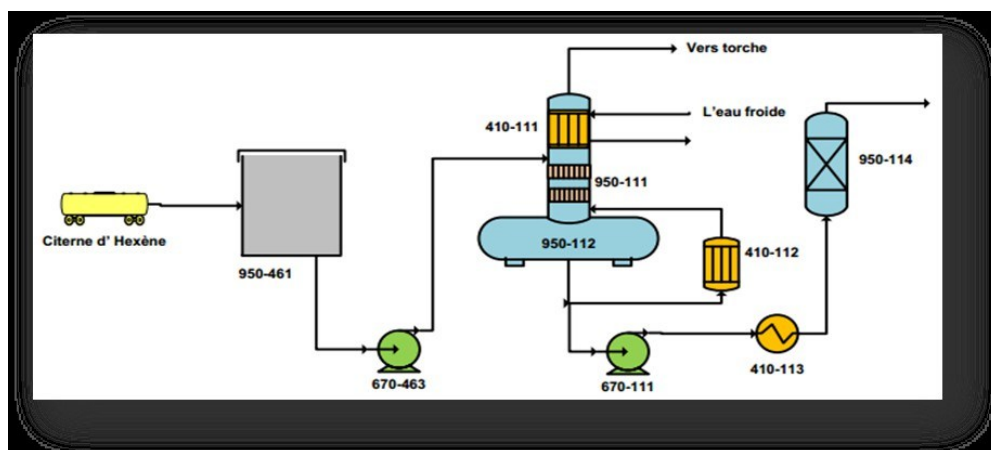


Figure I.9 : Traitement de l'hexène

I.6.4.1.3 L'Isobutane

Il existe deux types d'isobutane : l'isobutane frais et l'isobutane de recyclage

I.6.4.1.3.1 Traitement d'isobutane frais

L'isobutane frais avant d'être incorporé à la production passe par des étapes de traitement. Il passe par la colonne de dégazage 950-121 pour éliminer le gaz absorbé dans le courant puis il sera séché dans le traiteur d'élimination de l'eau 950-124 A/B, qui fonctionne par l'adsorption sur un tamis moléculaire ZEOCHEM 13X, type 1003, ces sécheurs exigent une régénération tous les 30 jours.

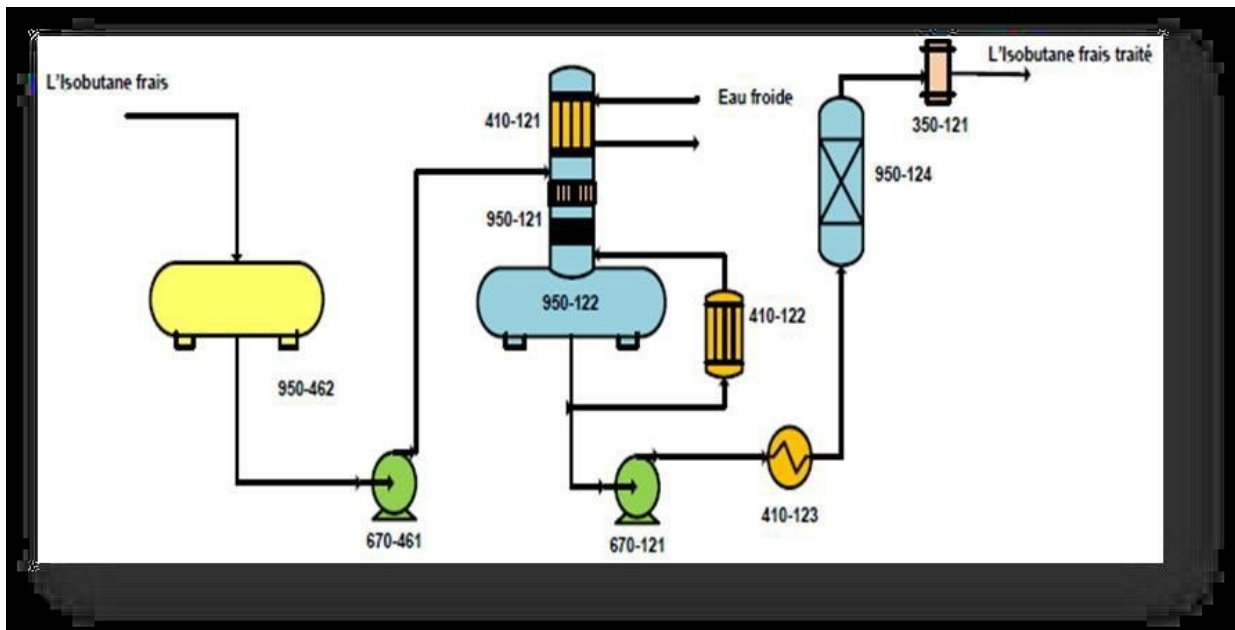


Figure I.10 : Système de dégazage de l'isobutane

I.6.4.1.3.2 Traitement d'isobutane recyclé

Est l'essentiel de l'isobutane utilisé dans l'unité car il est récupéré dans presque sa totalité. Il est pompé du réservoir de stockage 950-176 vers les sécheurs d'isobutane de recyclage 950-125 A/B, ces sécheurs exigent une régénération tous les 30 jours.

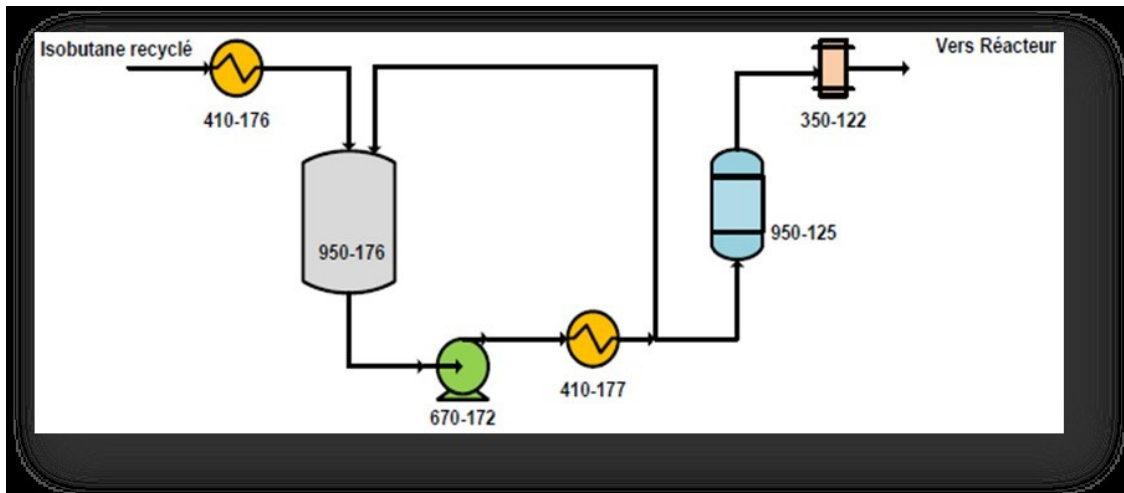


Figure I.11 : Système de traitement de l'isobutane Recyclé

I.6.4.1.4 Hydrogène

L'hydrogène est additionné au réacteur pour contrôler l'indice de fluidité tout en modifiant la longueur de la chaîne du polymère. Avant d'être incorporé il doit être soumis au processus de séchage dans les sécheurs 950-132 A/B ou l'eau présente dans le courant d'hydrogène est retenue sur deux lits superposés du tamis moléculaire ZEOCHEM 13X.

I.6.4.2 Activation et addition du catalyseur

Le catalyseur type PF (PHILLIPS) avant d'être incorporé dans le réacteur de la polymérisation doit être activé ; l'objectif de cette activation est le changement de l'état d'oxydation du chrome de Cr+3 à Cr+6 selon la réaction (1.10) pour éliminer l'eau et les volatils par le contact avec l'air sec et chaud dans un lit fluidisé. [1]

Le catalyseur est ajouté au réacteur sous forme d'une solution de catalyseur en isobutane Frais (boue de catalyseur). Dans le réacteur en contact avec l'éthylène il change de valence de Cr+6 à Cr+2.

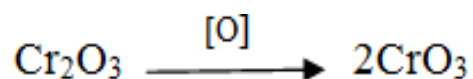




Figure I.12 : L'étape d'activation du catalyseur

I.6.4.3 Polymérisation d'éthylène

La réaction de polymérisation se passe dans le réacteur 950-155 en forme de boucle fermée qui est une tuyauterie en acier au carbone de diamètre interne de 560 mm, composée de quatre tronçons verticaux, unis par des tronçons horizontaux. Celle-ci, de 760 mm de diamètre extérieur, la réaction se passe dans des conditions opératoires pour la pression et la température de 42,2 kg/cm² et de 85 à 110 °C respectivement.

La réaction de polymérisation est exothermique, à raison de 800 kilocalories par kilogramme de polymère formé. Cette chaleur de réaction s'élimine au moyen du réfrigérant qui circule dans les chemises des quatre tronçons verticaux du réacteur. Ce dernier dispose de six pattes pour la décantation du polymère solide contenu dans le mélange polyéthylène-isobutane puis le produit sera déchargé et transféré vers la chambre de flash 950-161. [1]

I.6.4.3.1 Système de flash et séchage du polymère

Le mélange déchargé du réacteur par l'intermédiaire des vannes de décharge « PTO » avec une pression de 42,2 kg/cm² et transporté au moyen des lignes de flash du réacteur jusqu'à la chambre de flash 950-161 où la pression normale d'opération est de 0,37 kg/cm². Dans celle-ci, le mélange est réchauffé par l'eau chaude ce qui favorise la vaporisation de l'isobutane, l'éthylène, l'hexène et l'hexane. Ces derniers sous forme de vapeurs sortent par la tête de la chambre de flash et se dirigent au système de purification et de récupération du gaz

de recyclage et les traces qui sont présentes dans les pores de polymère, sont séparées et éliminées en présence d'azote dans la colonne de purge. Le polymère se décharge par gravité à partir du fond de la chambre de flash vers la colonne de purge ou, il sera séché et déchargé par le fond de celle-ci vers les silos de poudre au moyen de transport pneumatique. En cas de feu, de défaillance de la pompe du réacteur, d'obstruction dans les lignes entre les pattes de décantation du réacteur et la chambre de flash, le contenu du réacteur est envoyé à la chambre de flash alternative 950-164 qui est un dispositif de secours pour le réacteur.[1]

I.6.4.3.2 Purification et récupération du gaz de recyclage

Le gaz de flash provenant de la tête de la chambre de flash ou de la chambre de flash alternative va être soumis à un système d'élimination des solides et de purification et récupération du solvant. Pour cela, le gaz de flash, après avoir traversé le cyclone, est envoyé au filtre à manches puis au Filtre de garde, une fois les solides récupérés, le gaz est envoyé vers un système de purification du gaz à travers le compresseur de gaz de recyclage. [1]

Après la compression, le courant entre dans la colonne d'isobutane de recyclage pour séparer l'isobutane des composants tel que l'éthylène, l'hexène, l'hexane et autres matières lourdes qu'il comporte.

Le produit d'extraction latérale de la colonne de purification est l'isobutane de recyclage récupéré et envoyé au stockage. Le courant du fond de la colonne d'isobutane de recyclage est envoyé vers la colonne de deshexaniseuse d'où l'hexène / hexane récupéré par le fond de cette dernière, est envoyé à la torche.

I.6.4.4. Système de Finition

Le polyéthylène produit est transporté sous forme de poudre à partir de la décharge de la colonne de purge jusqu'aux silos de stockage ou au réservoir d'alimentation de l'extrudeuse.

Cela s'effectue au moyen d'un système de transport pneumatique en circuit fermé d'azote.

Le polyéthylène sous forme de poudre, après l'ajout d'additifs spécifiques pour chaque grade est soumis dans l'extrudeuse à un procédé de finition qui consiste essentiellement à lui donner la forme finale pour la vente du produit. [1]

Dans cette installation d'extrusion s'effectue la fusion et la granulation du polymère. La température de fusion du produit est de l'ordre de 250- 275°C.

La granulation se réalise en circuit fermé d'eau sous pression. Le polyéthylène produit est pneumatiquement transporté vers les silos mélangeurs pour leur homogénéisation. A partir de là, il peut être transféré vers les silos de chargement en vrac de camions ou vers les silos de stockage ou vers les silos d'alimentation aux lignes d'ensachage et palettisation

I.6.4.5 Ensachage

Est une ligne complète d'un système automatique d'emballage du PEHD granulé. Cette ligne est équipée d'une ensacheuse munie d'un doseur massique à poids net et une soudeuse de sacs, d'un transporteur avec une imprimante et un détecteur de métaux, un palettiseur avec un contrôleur de vitesse et d'une emballeuse avec housseuse et un four, afin d'obtenir une palette avec 11 couches, Chacune contient 5 sacs de 25 kg. [2]



Figure I.13 : Stockage du produit fini

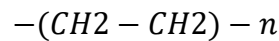
Chapitre II

Le polyéthylène à haute densité « PEHD »

II.1 Introduction

Le polyéthylène, ou polythène (PE), est un des polymères les simples et les moins chers. C'est un matériau semi-cristallin obtenu par la polymérisation de l'éthylène. C'est l'important polymère de synthèse, devant le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS). Sa production mondiale était d'une quarantaine de millions de tonnes en 2010. [3]

Le polyéthylène est l'un des polymères les simples et les moins chers. C'est un plastique. Son nom vient du fait qu'il est le polymère obtenu par la polymérisation des monomères d'éthylène ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) en une structure complexe de formule générique :



II.2 Définition du polyéthylène

Le polyéthylène est la polyoléfine la plus anciennement préparé industriellement, il est issu de la polymérisation du monomère éthylène gazeux seul pour former un homo polymère.

Ou en présence d'un comonomère de type 1-alcène pour former un copolymère.

Les PE (polyéthylènes) font partie des thermoplastiques parmi toutes les matières plastiques. C'est-à-dire qu'ils ont des propriétés qui leur confèrent une malléabilité à chaud et une thermo plasticité réversible. Mais ils sont de natures différentes selon les modes de polymérisation :

- À partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé le polyéthylène basse densité PEBD
- À l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène haut densité PEHD.
- Il existe par ailleurs un autre type de PE le PEMD (moyenne densité), mais c'est en réalité un intermédiaire entre les 2 formes et n'a pas de caractéristiques particulières ou intéressantes qui méritent d'être développée. [4]

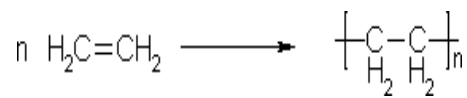
Pour ce qui concerne la caractérisation, le PE doit répondre à 2 exigences :

- Être apte à subir des conditions industrielles qui le font passer de granules à l'objet fini (film, bouteille).

- Conférer à l'objet fini les propriétés nécessaires à son usage : transparence pour un film, stabilité dimensionnelle pour une pièce injectée, absence de "neck-in" pour une enduction. [4]

II.3 Structure de polyéthylène

Le polyéthylène est translucide, facile à manier et résistant au froid. Le polyéthylène est thermoplastique. Cette matière plastique représente à elle seule environ un tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques.



Plusieurs millions de tonnes de polyéthylène sont produites chaque année car c'est un matériau extrêmement polyvalent et important sur le plan économique et écologique. Grâce à sa structure chimique simple, le polyéthylène prime sur la plupart des autres matériaux car il peut être réutilisé. Au cours de ces dernières années, le recyclage des produits usés en PE a pris de plus en plus d'importance : 50% du PE constituant les sacs poubelle sont recyclés. Il existe différents polyéthylènes classés en fonction de leur densité. Celle-ci dépend du nombre et de longueur des ramifications présentes dans le matériau. [4]

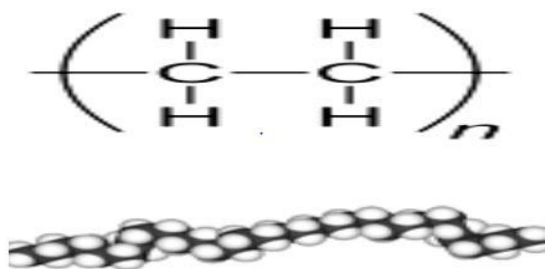


Figure II.1 : Schéma représentatif du polyéthylène

II.4 Les différents types de polyéthylène

Les polyéthylènes sont classés en fonction de leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires. Il existe différents types de polyéthylène :

- PE-BD, polyéthylène basse densité ;
- PE-BDL, polyéthylène à basse densité linéaire ;
- PE- HD, polyéthylène haute densité ;
- PE-UHPM, polyéthylène à masse molaire élevée ;
- PE-R, polyéthylène réticulé ;
- PE-RHD, polyéthylène réticulé à haute densité ;
- PE-MD, polyéthylène à moyenne densité ;
- PE-TBD, polyéthylène à très basse densité ;

II.5 Les propriétés du polyéthylène (PE)

En fonction du type de polymérisation du PE, le taux de cristallinité est variable. Plus le PE est ramifié, moins il est facile à cristalliser car les ramifications gênent le réarrangement moléculaire. Du fait de leur cristallinité, les polyoléfines sont blanc laiteux. Ils sont opaques en forte épaisseur et transparent sous forme de film. Ils sont très souvent utilisés comme emballage et films (réservoir d'essence, bouteilles de lait, films, agricoles, sacs, ... etc.). Les propriétés mécaniques des polyoléfines dépendent de leur masse molaire. A température ambiante (25°C), le PE est au-dessus de sa température de transition vitreuse et le PEBD étant souple à température ambiante, il peut être utilisé pour faire des gaines, des fils, des tuyaux souples, etc. Cependant il est plus sensible aux que le PEHD. Ce dernier a un module plus élevé que le PEBD mais allongement à la rupture plus faible. De plus, le polyéthylène est également très sensible à l'orientation, leurs propriétés mécaniques étant meilleures lorsque ces matériaux sont sollicités selon leur orientation.

- Les polyéthylènes sont en général assez sensibles aux chocs. Cependant, lorsqu'ils sont trempés, ils sont moins cristallins et gagnent en résistance
- Les polyéthylènes possèdent de plus une très bonne stabilité chimique, ils ne sont attaqués ni par des acides (sauf oxydants) bases ou sels. De plus, ils sont insolubles, voir hydrophobes Cependant, le PE trempé est moins imperméable aux solvants. De plus, les polyéthylènes sont très sensibles aux rayons UV sous l'atmosphère (en présence d'oxygène) Mais ils peuvent être traités à photos

stabilisantes, comme le noir de carbone, qui permet de corriger ce problème, le seul inconvénient étant la coloration noire engendrée.

- En l'absence de contrainte, le PE peut supporter une température de 110 à 120°C
- Cependant, il brûle même en l'absence de flamme initiatrice et au cours d'un incendie, il y a combustion incomplète libérant de l'oxyde de carbone et de faibles quantités.
- D'hydrocarbures. Les polyéthylènes sont cependant d'excellents isolants électriques et sont donc utilisés comme isolant de câbles ou comme fils.
- Les polyéthylènes étant cristallins, elles présentent un important retrait au moulage
- Le polyéthylène étant issu du pétrole, on cherche à l'associer à des polymères biodégradables afin de consommer moins de ressources fossiles et d'obtenir un matériau de substitution des propriétés équivalentes.

II.6 Le polyéthylène à haute densité (PEHD)

II.6.1 Généralités sur le polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène de haute densité, PEHD, est devenu un ingrédient habituel et nécessaire pour la vie courante, il occupe une bonne part de la production globale des polymères car il constitue une matière de base pour l'industrie de transformation des polymères et des plastiques. Il a pu remplacer un grand nombre de matériaux à divers usages durant le siècle passé et ne cesse de le faire encore aujourd'hui. La demande en polyéthylène ne fait que croître à travers le monde.

II.6.2 Propriétés des polyéthylènes à haute densité

Les propriétés des polyéthylènes dépendent essentiellement de trois paramètres structuraux à savoir : la cristallinité, la masse moléculaire et la distribution des masses moléculaires. [5]

II.6.2.1 Le taux de cristallinité

Le taux de cristallinité est étroitement dépendant de la structure moléculaire. Il est faible dans le cas du polyéthylène basse densité radicalaire (PEBDR), dû à sa

Structure branchée qui empêche pratiquement les molécules de se serrer les unes contre les autres, et est élevée dans le cas du PEHD homopolymère, dû à la structure linéaire de ses chaînes qui se replient facilement pour former des cristallites.

L'incorporation des branches courtes dans les chaînes linéaires, favorisant l'encombrement stérique, abaisse la cristallinité. La diminution du taux de cristallinité amène à la diminution de la densité, et par conséquent à l'augmentation de certaines propriétés mécaniques comme la résistance au choc. [5]

II.6.2.2 La masse moléculaire

D'une manière générale, plus les chaînes polymériques sont longues (masse moléculaire grande) plus la viscosité à l'état fondu est élevée, la mise en œuvre est plus difficile et les propriétés mécaniques sont meilleures. Dans la pratique, la détermination de l'indice de fluidité à chaud (IF) du PE, qui est inversement proportionnel à la viscosité, donne une estimation sur sa masse moléculaire. [5]

II.6.2.3 La distribution de la masse moléculaire

En plus de la densité et de la masse moléculaire, la répartition des masses moléculaires est un facteur qui peut aussi affecter les propriétés du PE. Un polymère avec une distribution étroite se cristallise plus rapidement avec un grand uniforme permettant d'avoir une grande rigidité et un minimum de torsion. Une large distribution assure la facilité de mise en œuvre ainsi qu'une bonne résistance au choc et à la fissuration sous contrainte. [6]

II.6.2.4 Propriétés rhéologiques

Le PEHD à l'état fondu présente un comportement viscoélastique non linéaire, cela signifie que sa viscosité diminue avec l'augmentation du cisaillement. Lors de l'extrusion, le polyéthylène est soumis à un gradient de vitesse de cisaillement, du cylindre de l'extrudeuse à la filière. Il est donc important de connaître la courbe de viscosité-vitesse de cisaillement sur l'étendue de la plage de cisaillement. La mesure de l'indice de fluidité à chaud (IF) permet d'estimer la viscosité à une vitesse de cisaillement donnée. [6]

II.6.2.5 Propriétés mécaniques

La rigidité et la dureté du PEHD augmentent avec la densité, et donc avec la cristallinité. La rigidité est mesurée au moyen de module d'élasticité qui varie d'environ 1600 MPa (dans le cas du PEHD) alors que la dureté (Shore D) varie d'environ 60.

Le PE est un thermoplastique résistant au choc et à l'impact, même à des basses températures ($T < 0^{\circ}\text{C}$), due à sa faible température de transition vitreuse T_g (jusqu'à -110°C). Cette résistance est d'autant meilleure que :

- La masse molaire est plus élevée ;

- La cristallinité est plus faible ;
- La distribution des masses moléculaires est plus large ;

La louche paraffinique du PE lui assure un faible coefficient de friction. Sa résistance à l'abrasion augmente avec la masse moléculaire et la cristallinité. Elle est remarquable pour les PEHD de masse moléculaire très élevée. [6]

II.6.2.6 Propriétés thermiques

Le point de fusion du PEHD se situe entre 120 et 136°C. La conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique linéaire sont fonction du taux de cristallinité, ils sont plus élevés pour les homopolymères que les copolymères. [6]

II.6.2.7 Propriétés chimiques

Propriétés chimiques du PE vis-à-vis des agents chimiques sont déterminées par leur structure paraffinique apolaire, par son caractère cristallin et sa très haute masse moléculaire. Il résiste bien aux acides forts (les acides inorganiques) et les bases fortes (les solutions salines), mais il est attaqué par les acides oxydants (les acides nitriques concentrés).

Il se gonfle dans les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques et dans leurs dérivés halogénés, dans lesquels il se dissout à température élevée, ce qui explique sa grande perméabilité aux vapeurs de ces produits. Il est également peu perméable à la vapeur d'eau, à cause de son caractère hydrophobe (l'absorption d'eau est d'environ 0.01% et 0.5 % pour le PE contenant du noir de carbone). [6]

II.6.2.8 Propriétés électriques

Le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électrique.

II.6.3 Avantages et Inconvénients du PEHD

II.6.3.1 Avantages

- Mise en œuvre aisée.
- Excellentes propriétés d'isolation électrique.
- Résistance aux chocs.
- Grande inertie chimique.

- Qualité alimentaire.
- Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures. [7]

II.6.3.2 Inconvénients

- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène.
- Sensibilité à la fissure sous contrainte.
- Mauvaise tenue à la chaleur.
- Collage important. [7]

II.6.4 Procédés de fabrication du PEHD

Les catalyseurs « Phillips » basés sur l'oxyde de chrome supporté restent encore largement utilisés pour produire le PEHD. Néanmoins, la découverte des catalyseurs de coordination par *Ziegler* en 1953 a révolutionné la production du polyéthylène. En effet, les systèmes catalytiques basés sur les halogénures de titane et les alkyles d'aluminium offrent plusieurs avantages relatifs aux procédés (polymérisation sous pression modérée) tout comme aux propriétés des polymères résultants. Les systèmes catalytiques les plus utilisés sont le TiCl et l'Al (CH) le produit de la réaction étant supporté sur MgCl. Ils donnent des *outputs* extrêmement élevés (jusqu'à 500kg de polyéthylène par gramme de Ti), qui permettent la suppression du « *SCAVENGER* » (laveur), une phase nécessaire pour éliminer les résidus catalytiques. Une grande variété de techniques est utilisée pour la polymérisation de coordination : haute pression, solution dans un hydrocarbure aliphatique, procédé « phase gazeuse » et suspension dans un diluant. Chacune de ces techniques devrait être adaptée à la production du polymère en grandes quantités. Les masses molaires sont contrôlées par le transfert à l'hydrogène moléculaire. Les métallocènes sont capables d'initier la polymérisation de l'éthylène et aussi ses copolymérisations avec d'autres α -oléfines pour produire des copolymères. L'efficacité de ces catalyseurs est proche de l'unité. Ils permettent d'avoir des *outputs* très importants qui procurent à ces systèmes catalytiques un avenir prometteur. [8]

II.6.5 Domaines d'application

Les utilisations du PEHD ne sont pas très différentes de celle du PEBD, bien que les caractéristiques mécaniques des deux matériaux soient nettement différentes. Le film d'emballage est l'un des domaines d'application privilégiés du polyéthylène. Le PEBD est largement utilisé, mais le PEHD a aussi certaines applications dans ce domaine. [3]

Le polyéthylène est utilisé pour les films agricoles. Quel que soit son type, il est aussi utilisé pour obtenir des produits semi-finis par le procédé d'extrusion (pipes, étuis pour câbles, etc) tout comme des objets variés par l'extrusion-soufflage de corps creux ou par moulage par injection. Selon les caractéristiques mécaniques désirées, les polyéthylènes ayant une densité variable sont utilisés, avec le PEBD qui est caractérisé par une force d'impact remarquable. Pour les applications d'élaboration de câbles, le polyéthylène est généralement réticulé après l'extrusion. [3]

Les copolymères du polyéthylène et le polyéthylène moyen densité sont utilisés comme des élastomères synthétiques dans tous les secteurs de l'industrie du caoutchouc en raison de leur grande inertie chimique et une faible tendance à réagir. Le PEHD peut être étiré pour donner des mono-filaments qui sont utilisés dans la fabrication de cordes. Sa nature paraffinique limite son utilisation dans l'industrie du textile. L'étiage du polyéthylène linéaire qui a une importante masse molaire peut conduire à des fibres ayant un haut module d'élasticité. [3]

II.6.6 Le cycle de vie

La production de tubes et canalisations polyéthylène PEHD n'émet aucun rejet dans l'environnement. 100% des rebuts de production sont recyclés sur site et l'eau servant au refroidissement des canalisations produites circule en circuit fermé. En conséquence, aucun rejet n'est à craindre pour l'environnement [1].

II.6.7 Le recyclage

Le polyéthylène PEHD est un matériau 100% recyclable et sans retraitement spécifique en fin de vie. Il peut être broyé et utilisé dans d'autres applications. Il peut également être valorisé par incinération avec récupération d'énergie [1].

II.7 Les paramètres de contrôle de PEHD

Les renseignements fournis à la production concernant la matière première et les produits de la réaction.

II.7.1 Indice de fluidité

C'est la mesure de la fluidité d'une résine à l'état fondu qui donne des indications sûres : la viscosité du polymère donc de sa masse molaire moyenne et la vitesse d'écoulement

- L'indice de fluidité varie proportionnellement avec la température. [9]

Une résine de faible viscosité s'écoulera facilement et aura un fort MI. Cet indice permet de classer les résines en fonction de leurs applications :

- Les résines de MI élevé seront utilisées pour l'extrusion et correspond à de bonnes valeurs de traitabilité de la résine
- Les résines de MI faible seront utilisées pour l'injection et indique au contraire des polymères à haute résistance mécanique.

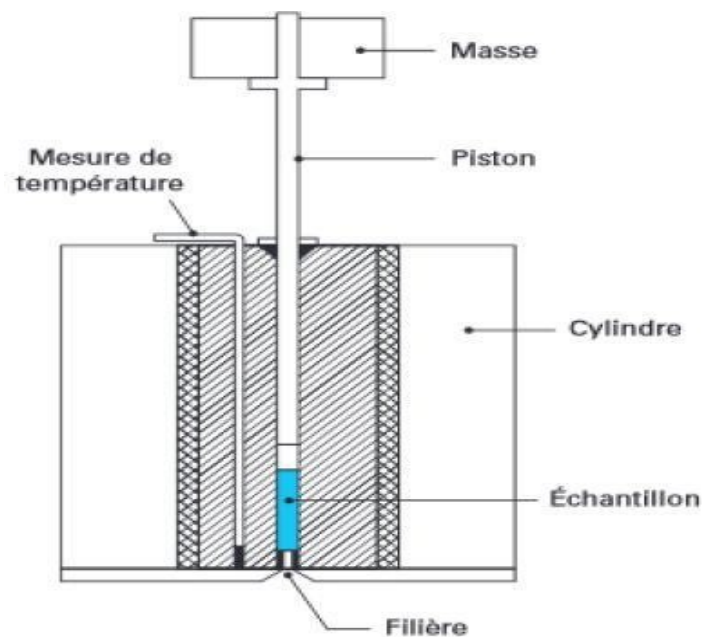


Figure II.2 : Principe de détermination du MFI [6]

II.7.2 Point de ramollissement VICAT

C'est la température effective à laquelle commence le ramollissement. C'est-à-dire au-delà de laquelle la pénétration d'une aiguille plate augmente rapidement. [9]



Figures II.3: Appareil du point de ramollissement Vicat

II.7.3 Densité à 23°C

La densité du polymère produit selon le procédé PHILLIPS est contrôlée par la quantité d'hexène-1 alimenté au réacteur. La densité varie inversement proportionnel au rapport hexène-1/éthylène. [9]



Figure II.4 : Dispositif pour la mesure de la densité à 23°C

II.7.4 Analyses mécaniques

II.7.4.1 Dureté SHORE

La dureté shore mesure la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon (matières plastiques et élastomères) à la pénétration de la bille ou la pointe d'un duromètre Shore.

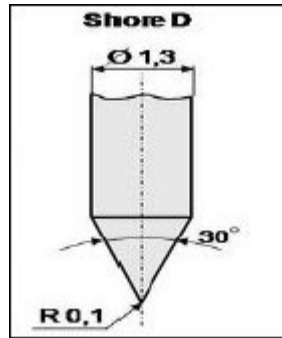


Figure II.5 : La géométrie du pénétrateur de la dureté SHORE D [9]



Figure II.6 : Appareillage de mesure de la dureté SHORE D

II.7.4.2 Comportement au choc

Le choc résulte de l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde. Il permet de juger, dans des conditions expérimentales données la fragilité d'un ensemble matériau-éprouvette. [9]

II.7.4.3 Méthodes pendulaires pour sollicitation uniaxiale

La résistance (résilience) au choc caractérise l'énergie absorbée au cours de la rupture d'une éprouvette préalablement entaillée. L'essai se réalise sur une machine appelée mouton-pendule rotatif. La résilience s'exprime par unité de largeur (J/m), ou résilience transversale en (J/m²) ou la résilience volumique en (J/m³).[9]

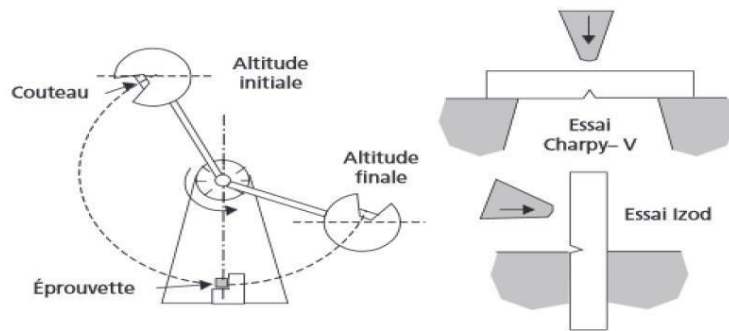


Figure II.7 : Schéma d'un Mouton-pendule pour les essais Charpy et Izod [6]

II.7.4.4 Méthode Charpy

On opère par flexion d'une éprouvette qui repose sur deux appuis simples, avec une charge centrale (marteau) (ASTM D-256). Deux types d'éprouvettes et d'entailles sont utilisées : l'éprouvette (type 1) de dimensions (80 x 10 x 4 mm) avec une entaille en V et l'éprouvette (type 2) de dimensions (120 x 15 x 10 mm) avec une entaille en U.

II.7.4.5 Méthode Izod

La méthode la plus courante est connue sous la référence Izod (ASTM D-256). La géométrie des éprouvettes et de l'entaille (en V) est analogue à celle des éprouvettes Charpy.

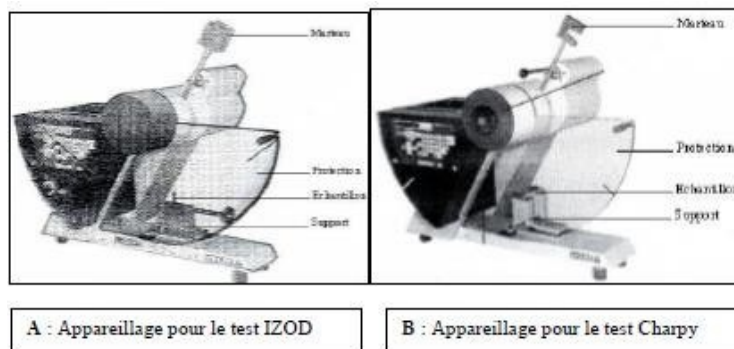


Figure II.8 : comparative pour le test de la résilience

II.7.5 Traction

Ce test consiste à appliquer un effort F sur une éprouvette et à mesurer l'allongement correspondant ΔL ou inversement imposé l'allongement ΔL et mesurer l'effort F [6]. Il est utilisé pour déterminer la capacité du matériau à se déformer.

Cet essai permet la détermination de nombreuses grandeurs normalisées tel que :

- **Module d'élasticité** : c'est le rapport de la contrainte de traction maximale qu'une matière peut supporter à la déformation correspondante. Il représente un critère de rigidité [6], il s'exprime comme suit :

$$E = \sigma / \varepsilon \dots\dots\dots [1.1]$$

Où :

E : module d'élasticité.

σ : contrainte (N/m²).

ε : allongement ou déformation (%).

- **Contrainte à la rupture** : la charge de traction supportée par l'éprouvette à l'instant de sa rupture par unité de surface, elle est donnée par l'expression suivante [6] :

$$\sigma = F / S \dots\dots\dots [1.2]$$

Où :

F : charge de traction supportée par l'éprouvette (N).

S : section initial (m²).

- **Allongement à la rupture** : ou déformation à la rupture, est le changement de longueur par rapport à la longueur initiale [6], il est indiqué en pourcentage

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \dots\dots\dots$$

$\Delta L = L - L_0$: déformation à la rupture.

L_0 : longueur initiale de l'éprouvette.

L : longueur finale de l'éprouvette.

- **La limite d'élasticité** : c'est la première valeur de charge sur la courbe Contrainte/Déformation, à laquelle l'inclinaison de la courbe devient horizontale.
- **Résistance élastique** : c'est le rapport entre la limite d'élasticité et la section initiale de l'échantillon.

La figure ci-dessous montre l'allure typique de la courbe contrainte-déformation nominale en uniaxiale et l'évolution du profil de l'éprouvette tandis que celle-ci est étirée à vitesse d'allongement constante.

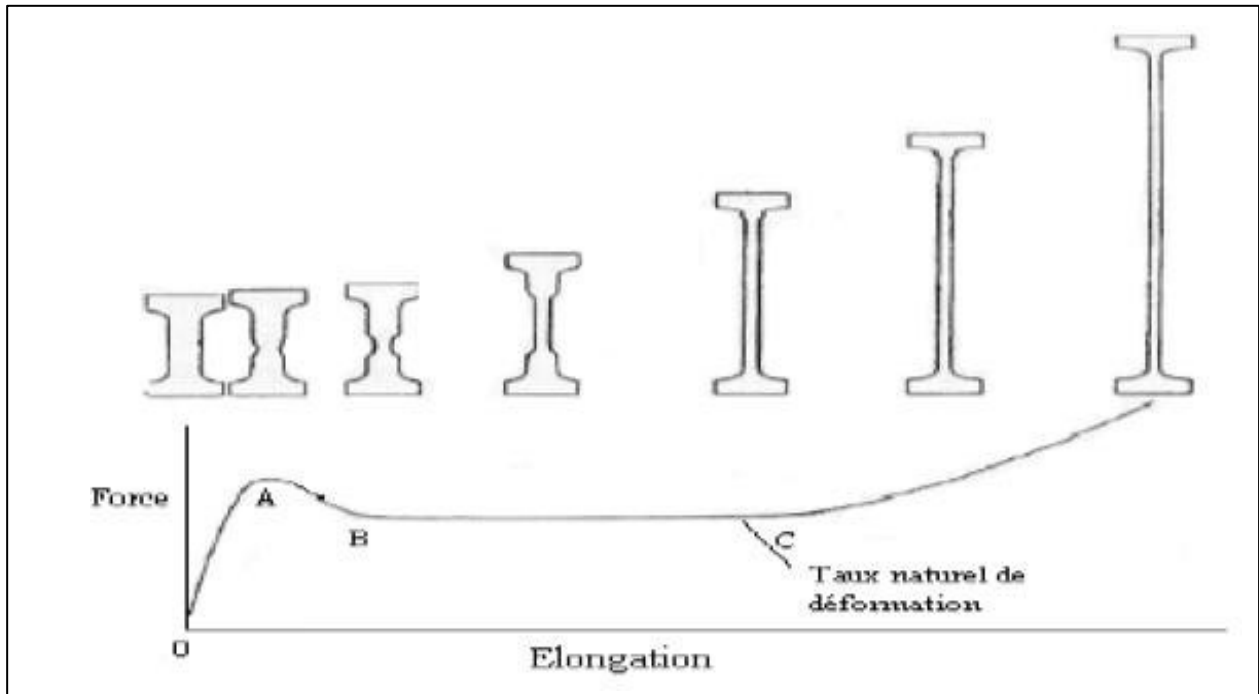


Figure II.9 : Courbe contrainte-déformation d'un polymère semi cristallin en traction uniaxiale [7]

A partir de cette courbe, on peut décrire les différents types de déformation :

❖ **Domaine élastique et viscoélastique (Zone 0-A)**

Il s'agit d'une déformation élastique réversible du matériau due à la phase amorphe ou le matériau reprend instantanément sa forme initiale après la suppression de la charge, la courbe initialement linéaire caractérise un domaine parfaitement élastique,

❖ **Domaine plastique (Zone A-C)**

Le point A est appelé seuil de plasticité (la limite d'élasticité) où débute la striction qui correspond à une déformation hétérogène du matériau qui s'amorce sur un défaut au niveau de l'éprouvette (des défauts structuraux tels que des dislocations des structures en bloc, des frontières inters cristallins dans le cristal etc.)

ce qui conduit à une distribution non uniforme de la contrainte :

- ✓ De A à B la striction se forme jusqu'à stabilisation.
- ✓ De B à C la striction se propage le long de l'échantillon jusqu'au taux naturel de déformation.

Au-delà de C, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structurel lié à l'orientation des chaînes macromoléculaires dans le sens de l'étirage.

II.8 Conclusion

Le PEHD est un matériau thermoplastique largement utilisé grâce à ses nombreuses qualités : résistance mécanique élevée, bonne résistance chimique, légèreté et durabilité. Il se prête à de nombreuses applications, notamment dans les secteurs de l'emballage, de la plomberie, des canalisations, et des objets du quotidien.

Chapitre III

Méthodes Numériques et Réseaux Neuronaux

III.1 Introduction

Les méthodes numériques, telle que les réseaux neuronaux, sont utilisées pour résoudre des problèmes complexes.

Elles permettent d'apprendre à partir de données, de modéliser des systèmes difficiles et d'optimiser divers processus.

Leur usage est répandu dans l'ingénierie, l'économie et les sciences appliquées.

III.2 Les méthodes numériques

Les méthodes numériques (l'analyse numérique) est une branche des mathématiques appliquées s'intéresse au développement d'outils et des méthodes numériques pour le calcul d'approximations des solutions des problèmes mathématique qu'il serait difficile, voire impossible, d'obtenir par des moyens analytiques, Son objectif est notamment d'introduire des procédures calculatoires détaillées susceptibles d'être mises en œuvre par des calculateurs (électroniques, mécaniques ou humains) et d'analyser leurs caractéristiques et leurs performances.

Les méthodes de l'analyse numérique s'intéressent à trouver des solutions approximatives aux :

Problèmes dont on ignore les exprimer par des expressions analytiques par les éléments de l'analyse mathématique.

Les problèmes dont les solutions analytiques sont inconnus ou difficiles à obtenir de telle manière qu'on ne peut les utiliser ou les exploiter.

Les intégrales, les solutions des systèmes d'équations linéaires ou non linéaires (les grands systèmes).

Les équations différentielles ordinaires et aux dérivées partielles. [10]

III.3 Classification des méthodes numériques

Souvent utilisées en mathématiques appliquées, informatique scientifique et ingénierie pour résoudre des problèmes complexes de façon approximative :

III.3.1 Méthodes numériques directes

Ces méthodes visent à trouver la solution exacte (ou très proche) en un nombre fini d'étapes, souvent utilisées pour résoudre des systèmes linéaires ou non linéaires.

- **Méthodes de résolution de systèmes linéaires :**
 - Méthode de Gauss (élimination de Gauss)
 - Méthode de LU (factorisation LU)
 - Méthode de Cholesky
 - Méthode de Jacobi
 - Méthode de Gauss-Seidel
- **Méthodes pour systèmes non linéaires :**
 - Méthode de Newton-Raphson
 - Méthode de la bisection
 - Méthode de la sécante

III.3.2 Méthodes numériques itératives

Ces méthodes produisent une suite d'approximations convergeant vers la solution. Elles sont souvent utilisées lorsque les méthodes directes sont trop coûteuses ou impossibles.

- Méthode de Jacobi itérative
- Méthode de Gauss-Seidel itérative
- Méthode du gradient conjugué
- Méthode de relaxation successive (SOR)
- Méthodes de point fixe

III.3.3 Méthodes d'approximation et interpolation

Utilisées pour approximer une fonction ou une donnée discrète.

- Interpolation polynomiale (Lagrange, Newton)
- Interpolation spline
- Méthode des moindres carrés (ajustement de courbe)

III.3.4 Méthodes pour la résolution d'équations différentielles

Utilisées pour résoudre numériquement des équations différentielles ordinaires (EDO) et partielles (EDP).

- **EDO :**
 - Méthode d'Euler (avant, arrière, améliorée)
 - Méthodes de Runge-Kutta (RK4, etc.)
 - Méthodes multi-pas (Adams-Bashforth, Adams-Moulton)
- **EDP :**
 - Méthode des différences finies
 - Méthode des éléments finis
 - Méthode des volumes finis
 - Méthode spectrale

III.3.5 Méthodes statistiques et probabilistes

Utilisées pour résoudre des problèmes complexes ou stochastiques.

- Méthode de Monte-Carlo
- Méthode de simulation stochastique
- Méthodes bayésiennes numériques

III.3.6 Méthodes d'optimisation numérique

Pour trouver le minimum ou maximum d'une fonction.

- Méthode du gradient (descente de gradient)
- Méthode de Newton pour optimisation
- Méthode de Nelder-Mead
- Algorithmes évolutionnaires (génétique, colonies de fourmis, etc.)

III.4 Les réseaux neuronaux

L'industrie moderne a besoin d'obtenir les meilleurs résultats pour la commande des systèmes travaillant toujours aux limites des contraintes. Les scientifiques proposent plusieurs méthodes de commande comme éventuelle solution, l'une de ces méthodes est l'utilisation de la technique de réseaux de neurones dans le processus de contrôle, soit dans la conception du modèle soit dans la conception du contrôleur. [11]

III.4.1 Définition de réseaux de neurones

Un réseau de neurones (RN) est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, ces réseaux de neurones sont une métaphore des structures cérébrales, de traitement parallèle, de distribution d'information et comportent plusieurs éléments de traitement appelé neurone. Chaque neurone fonctionne indépendamment des autres de telle sorte que l'ensemble est un système parallèle fortement interconnecté. L'information détenue par le réseau de neurone est distribuée à travers l'ensemble des constituants et non localisée dans une partie de mémoire sous la forme d'un symbole. Le réseau de neurone ne se programme jamais pour réaliser une ou telle tâche, il est entraîné sur des données acquises, grâce au mécanisme d'apprentissage qui agit sur les constituants du réseau afin de réaliser au mieux la tâche souhaitée. [11]

III.4.2 Structure des réseaux de neurones artificiels (RNA)

En général on peut dire que les réseaux de neurones peuvent être caractérisés comme des modèles de calculs apprenant, généralisant et organisant des données.

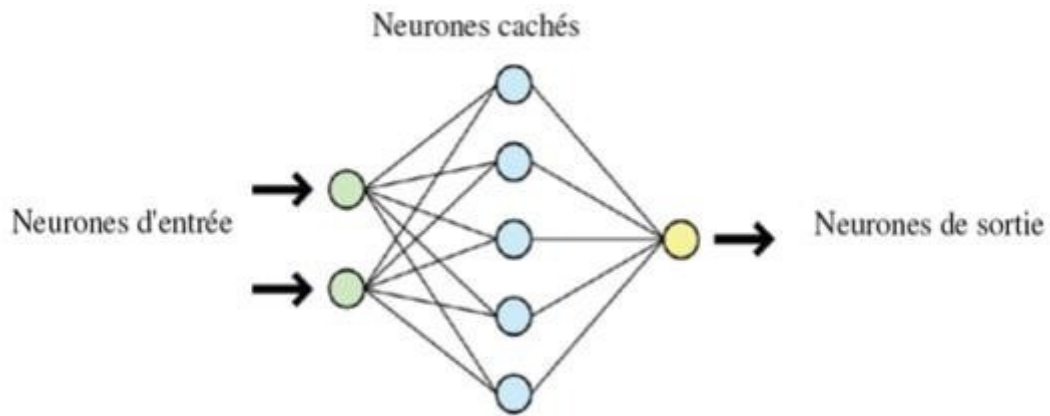


Figure III.1 : Schéma simple d'un réseau de neurone

Un réseau de neurone artificiel contient un grand nombre d'unités, les neurones, qui communiquent entre eux en s'envoyant des signaux à travers de liens, appelées connexions synaptiques. En général le système de neurone possède trois types des neurones :

- les neurones d'entrée qui reçoivent les données.
- les neurones de sortie qui envoient les données par la sortie du système.
- les neurones cachés, dont les signaux d'entrée et de sortie demeurent dans le système.

U_i représente la somme pondérée des entrées du neurone, elle est donnée par :

$$U_i = \sum_j w_{ij} x_j + b_i$$

où: x_j représente l'entrée j connectée au neurone i . b_i le seuil interne du neurone. w_{ij} désigne le poids de la connexion reliant l'entrée j au neurone. $O_i = g(U_i)$ est la sortie du neurone et g sa fonction d'activation. [11]

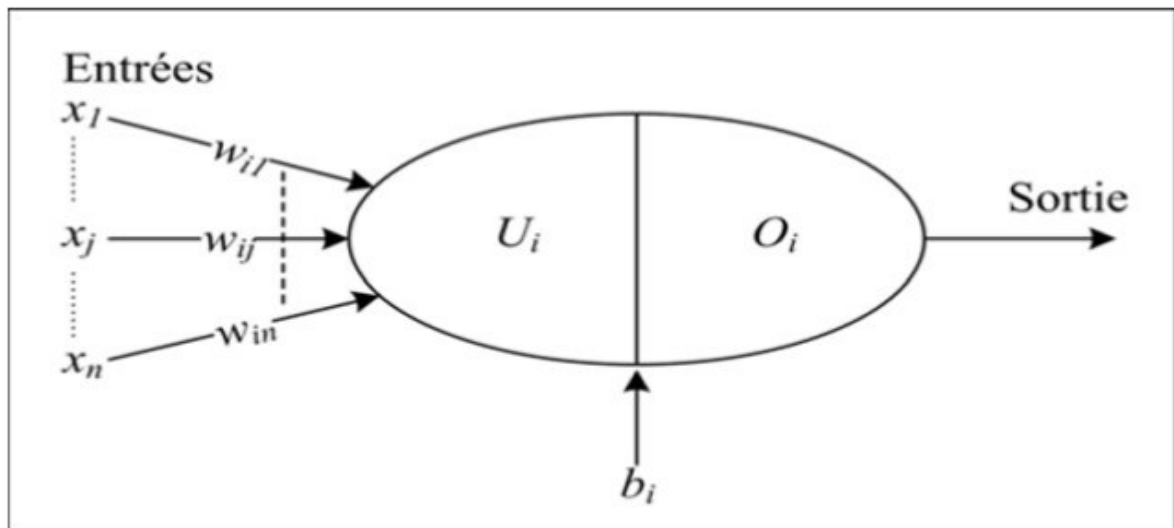


Figure III.2 : Modèle de base d'un neurone formel

III.4.3 Architecture des réseaux neuronaux

L'organisation des réseaux de neurones peut se faire à partir de deux grandes catégories d'architecture : les réseaux statiques et les réseaux dynamiques. [11]

III.4.3.1 Réseaux statique (non bouclés)

Un réseau est non bouclé, ou statique, si son graphe ne possède pas de cycle. Il réalise donc, de manière générale, une relation algébrique non linéaire entre ses entrées et ses sorties.

C'est à dire qu'il est obligatoire de représenter un réseau graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux et que l'information circule des entrées vers les sorties sans retour (un seul sens), c'est à dire que la sortie courante n'a aucune influence sur les entrées futures. On peut dire que l'utilisation dominante des réseaux non bouclés est l'organisation des réseaux en plusieurs couches de neurones appelés réseaux multicouches ou perceptron multicouches. Un réseau multicouche comporte une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie. Dans un tel réseau, la sortie de chaque neurone de la couche (L) est reliée à l'entrée de chaque neurone de la couche (L+1). L'architecture des réseaux multicouches est représentée dans la Figure III.3. [11]

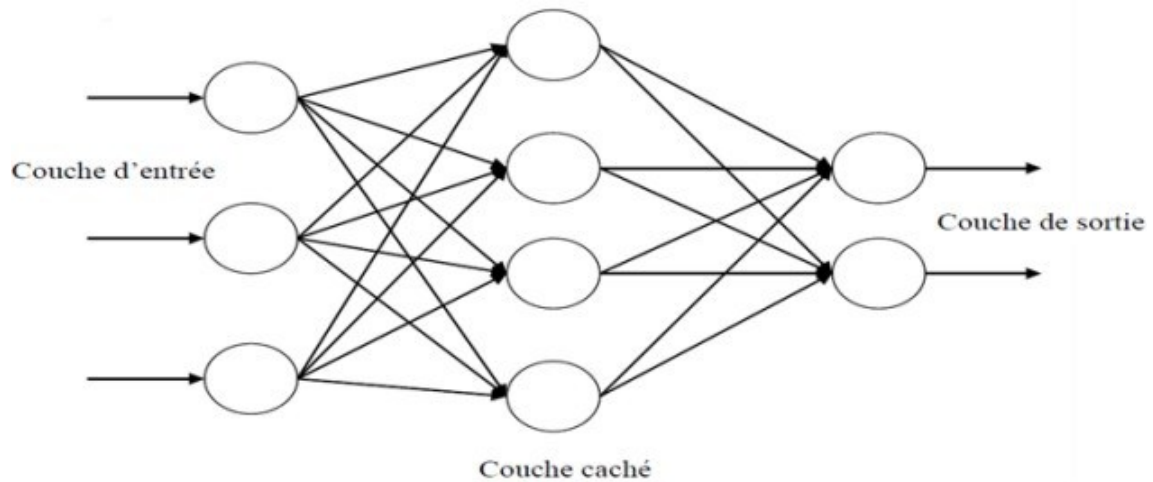


Figure III.3 : Réseau multicouche

III.4.3.2 Réseaux dynamique (bouclés)

Les réseaux de neurone bouclés sont utilisés pour la modélisation dynamique de processus non linéaires et pour leur commande. Ces réseaux récurrents sont aux contraires des réseaux statiques, ils peuvent avoir une topologie de connexion quelconque (autrement dit un réseau totalement connecté) comprenant des boucles qui aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. L'état général (global) dépend aussi de ses états précédents comme il est indiqué sur la Figure III.4. [11]

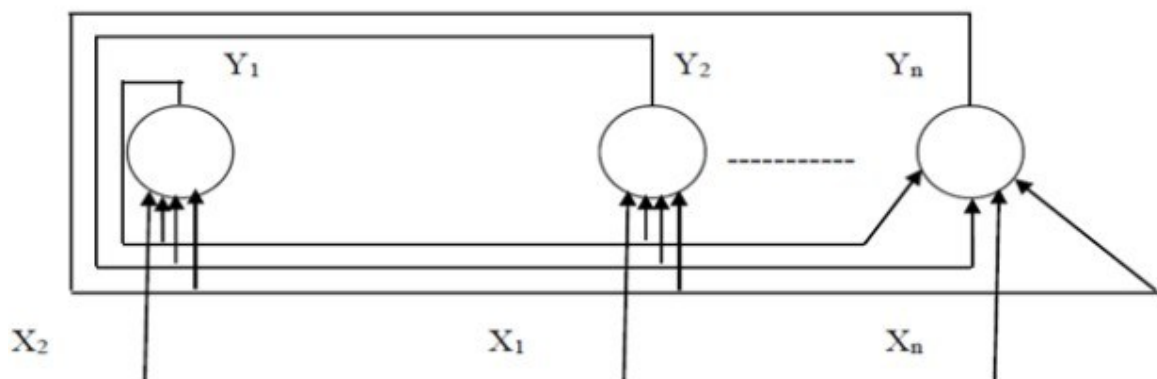


Figure III.4 : Réseau de neurone dynamique (Modèle de Hopfield)

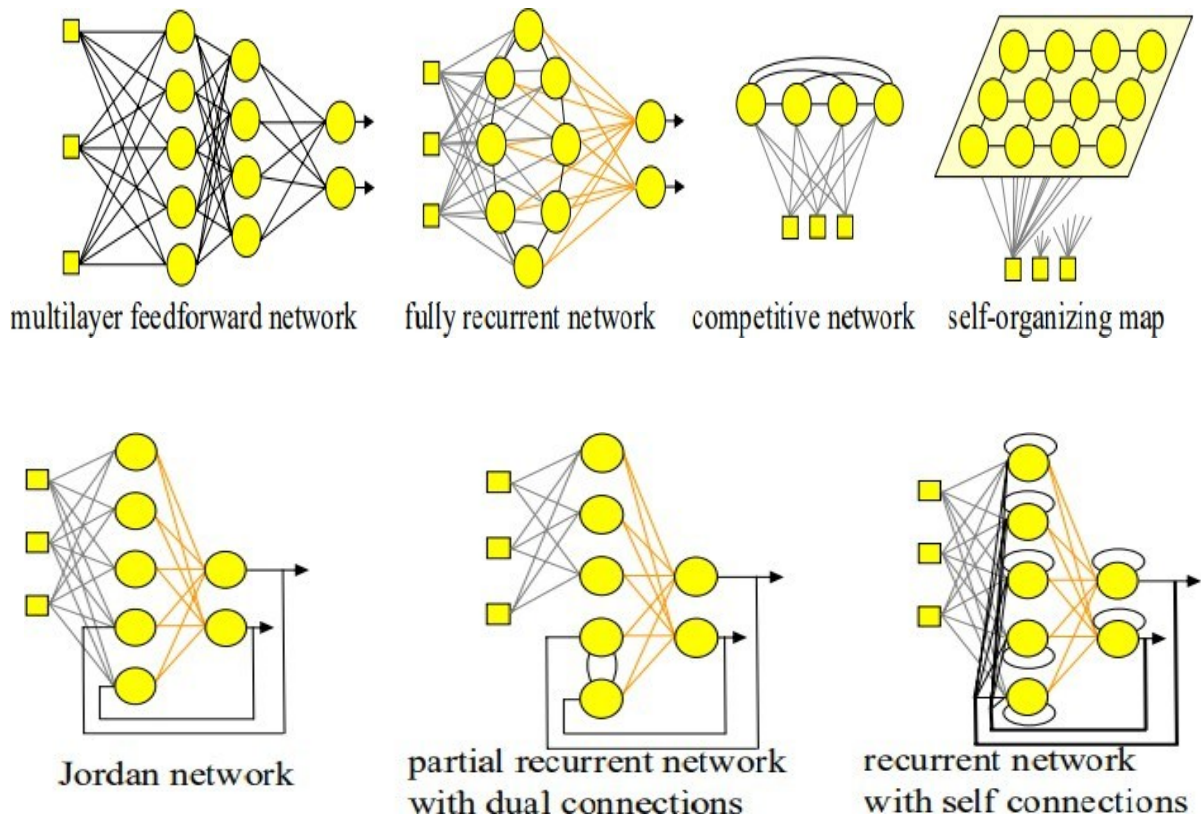


Figure III.5 : Quelques architectures des réseaux neuronaux [12]

III.4.4 Principes fondamentaux des réseaux neuronaux

Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont ou des capteurs composant la machine dont il fait partie. A chacune de ses entrées est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids. [13]

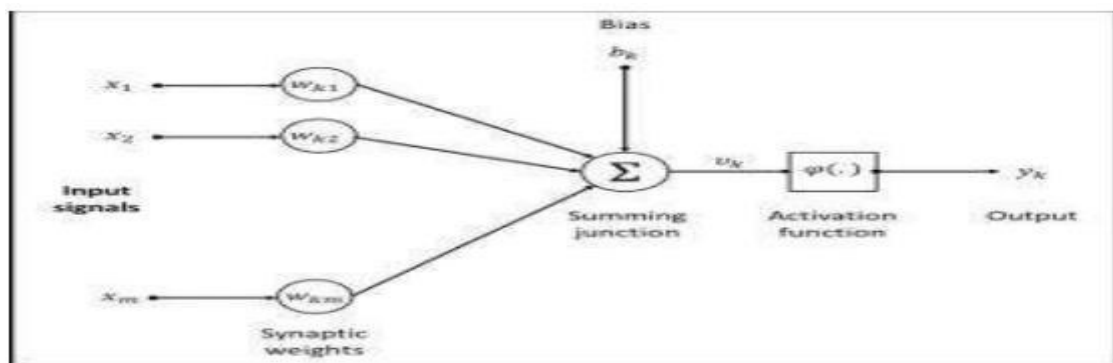


Figure III.6 : Modèle non linéaire d'un neurone (Haykin, 1999)

III.4.5 Algorithmes d'apprentissage des réseaux neuronaux

L'apprentissage dans le contexte des réseaux de neurones est le processus de modification des poids de connexions (y compris les biais) ou plus rarement du nombre de couches et de neurones, afin d'adapter le traitement effectué par le réseau à une tâche particulière. [11]

On distingue trois familles d'apprentissage :

III.4.5.1 Apprentissage supervisé

Dans ce cas, un superviseur (ou expert humain) fournit une valeur ou un vecteur de sortie (appelé cible ou sortie désirée), que le réseau de neurones doit associer à un vecteur d'entrée. L'apprentissage consiste dans ce cas à ajuster les paramètres du réseau afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du réseau. [11]

III.4.5.2 Apprentissages semi-supervisé ou apprentissage par renforcement

Ce mode d'apprentissage, suppose qu'un comportement de référence n'est pas possible, mais en revanche, il est possible d'obtenir des indications qualitatives (vrai, faux, ...) sur les performances du réseau. [11]

III.4.5.3 Apprentissage non supervisé

Dans cet apprentissage, les données ne contiennent pas d'informations sur la sortie désirée. Il n'y a pas de superviseur. La tâche du réseau consiste, par exemple dans ce cas, à créer des regroupements de données selon des propriétés communes (classification). [11]

III.4.6 Domaine d'application des réseaux de neurones artificiel (RNA)

Les RNA aujourd'hui ont des applications dans des domaines variés :

III.4.6.1 L'application au traitement du signal

Dans ce domaine les applications réalisées traitent essentiellement de la reconnaissance de signatures radar ou sonar cette application a été construite à partir de signaux sonars et des traits caractéristiques de ces signaux déterminés par les experts comme utiles pour identifier une cible en environnement bruité. Le réseau agit comme un filtre pour éliminer le bruit. [11]

II.4.6.2 L'application à la planification

L'optimisation est souvent sollicitée pour la planification des actions ou des tâches. A cet effet, l'utilisation du modèle de HopField paraît très utile pour la résolution des problèmes d'optimisation. [11]

II.4.6.3 L'application au contrôle

Grâce à leur propriétés (parallélisme de traitement, capacité d'adaptation, et de généralisation, etc...). Les réseaux de neurones sont appliqués au contrôle intelligent. Par exemple plusieurs tentatives ont été faites pour appliquer les réseaux de neurones ; Ces applications peuvent être classifiés en plusieurs méthode, Telles que : le contrôle supervisé. Le contrôle inverse et le contrôle neuronal adaptatif. [11]

II.4.6.4 L'application au diagnostic

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes. Dans ce contexte on distingue plusieurs applications des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances et en particulier, pour le diagnostic des pannes des machines électriques. [11]

III.4.7 Avantages et limites des réseaux neuronaux artificiels

Les Réseaux de Neurones Artificiels ont plusieurs avantages dont on peut citer :

1. L'apprentissage.
2. Le parallélisme massif l'architecture d'un réseau de neurone permet le traitement parallèle et rapide des informations.
3. Tolérance d'incertitude très élevée.
4. Etant une multiple copie d'unités simples (les neurones), ils sont donc facilement extensibles.
5. Facilité d'utilisation car il ne nécessite pas une compréhension approfondie.
6. Choix de types d'architecture et de fonction d'activation de réseaux diverses. Bien que les réseaux de neurones soient capables d'effectuer beaucoup de tâches.
7. Difficulté de choix de L'architecture et le paramétrage du réseau.
8. L'importance de L'état initial du réseau car il a une très grande influence sur la fiabilité et le temps de calcul et de réponse du réseau, donc un mauvais choix des poids initiaux peut conduire à un blocage d'apprentissage. [11]

III.5 Conclusion

Les méthodes numériques, notamment les réseaux neuronaux, sont des outils efficaces pour modéliser et optimiser des systèmes complexes comme la production de PEHD. Ils permettent d'améliorer la précision des prévisions et la performance des processus industriels. Leur utilisation représente une avancée importante dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche appliquée.

Chapitre IV

Modélisation et optimisation des paramètres de production PEHD grade 5502

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, je présente une étude détaillée sur la modélisation et l'optimisation des paramètres de production du PEHD. Mon objectif est d'analyser les différentes variables influençant le processus de fabrication afin d'améliorer la qualité du produit final tout en optimisant les performances. À travers cette étude, j'utilise des méthodes numériques, notamment les réseaux neuronaux, pour développer un modèle prédictif fiable et efficace, je commencerai par présenter les paramètres clés de la production du PEHD et leur influence sur le processus. Ensuite, j'exposerai la méthodologie utilisée pour la modélisation, en insistant sur l'utilisation des réseaux neuronaux. Enfin, je discuterai des résultats obtenus et proposerai une optimisation des paramètres pour améliorer la production.

IV.2 Présentation des paramètres clés de la production du PEHD

Dans le cadre de la modélisation et de l'optimisation du procédé de fabrication du PEHD, plusieurs paramètres essentiels sont suivis via des capteurs spécifiques. Ces paramètres se répartissent en différentes catégories selon leur rôle dans le processus : les données d'entrée, les conditions opératoires et les caractéristiques de réaction.

IV.2.1 Données d'entrée (Input)

Ces paramètres correspondent aux matières premières introduites dans le réacteur et aux données temporelles liées au suivi du procédé :

- **Éthylène (FC_Eth)** : Débit d'éthylène alimenté, essentiel comme matière première principale.
- **Isobutane recyclé (FC_isob)** : Débit d'isobutane recyclé dans le système.
- **Hexène (FC_HEX)** : Débit d'hexène, un co-monomère modifiant les propriétés du PEHD.
- **Débit total du système de dosage du catalyseur (FEEDER_CAT)** : Mesure la vitesse de distribution des composants dans le réacteur.
- **Date et heure** : Permettent d'indexer les données dans le temps pour un suivi précis.

IV.2.2 Conditions opératoires (Environnement)

Ces paramètres contrôlent l'environnement dans lequel la réaction chimique se déroule :

- **Température du réacteur (TC_reac)** : Contrôle crucial influençant la cinétique de polymérisation.
- **Pression d'alimentation (PI_reac)** : Affecte la densité et la structure moléculaire du polymère.
- **Température du réfrigérant (TDI_REFR)** : Maintient le réacteur à une température optimale pour éviter la dégradation.

IV.2.3 Caractéristiques de la réaction (Output)

Ces mesures permettent d'évaluer l'évolution et la qualité du polymère produit :

- **Densité (Density)** : Indicateur direct des propriétés mécaniques et de la qualité du PEHD.
- **Taux de solides (% poids solides - Taux solid)** : Reflète la concentration de polymère dans la phase réactionnelle.

IV.3 Influence des paramètres sur le processus

- Le débit des matières premières (éthylène, isobutane, hexène) conditionne la composition chimique et la masse moléculaire du PEHD.
- Les conditions opératoires, notamment la température et la pression, modulent la vitesse de polymérisation et la cristallinité du produit.
- Les caractéristiques de la réaction, telles que la densité et le taux de solides, servent à contrôler la qualité finale et à ajuster les paramètres en temps réel.

Tableau IV.1 : Liste des paramètres clés et types de données dans le processus de production du PEHD

Data	Sensors	Description	Item abbreviation	Type of data
Time	Date		Date	input
	Time		Time	input
Reactor Feed	FC14072.PV	ETHYLENE AU 950-155	FC_Eth	input
	FC14070.PV	ISOB RECYCL AU 950-155	FC_isob	input
	FC14071A.PV	HEXENE AU 950-155	FC_HEX	input
	XI13886.PV	FEEDER TOTAL DUMP/MIN	FEEDER_CAT	input
Operation Conditions	TC17169.PV	CONTROL REACTEUR	TC_reac	environment
	PI16147.PV	ALIMENTATION 950-155	PI_reac	environment
	TDI17184.PV	REFRIGERANT REACTEUR	TDI_REFR	environment
Reaction characteristics	DI13193.PV	Density 950-155	Density	output
	NC13584.PV	% POID SOLIDES REACTEUR	Taux solid	output

IV.4 Méthodologie utilisée pour la modélisation avec réseaux neuronaux

Pour modéliser le processus de production du PEHD et optimiser ses paramètres, une approche basée sur les **réseaux neuronaux artificiels (RNA)** a été adoptée. Cette méthode permet de capturer les relations complexes non linéaires entre les différentes variables d'entrée (paramètres du procédé) et les variables de sortie (qualité du produit, caractéristiques de la réaction).

IV.4.1 Collecte et préparation des données

Les données issues des capteurs du procédé, regroupant les paramètres d'entrée, les conditions opératoires et les caractéristiques de réaction, ont été collectées sur une période représentative. Ces données ont été nettoyées et normalisées pour faciliter l'apprentissage du modèle.

IV.4.2 Choix de l'architecture du réseau neuronal

Un réseau de type **perceptron multicouche (MLP)** a été choisi, composé de plusieurs couches (une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie). Cette architecture est adaptée à la modélisation de phénomènes complexes grâce à sa capacité d'apprentissage non linéaire.

IV.4.3 Entraînement du modèle

Le réseau neuronal a été entraîné à l'aide d'algorithmes d'optimisation, notamment la rétropropagation avec descente de gradient, pour minimiser l'erreur entre les prédictions du modèle et les données observées. Une partie des données a été réservée pour valider et tester la performance du modèle afin d'éviter le surapprentissage (overfitting).

IV.4.4 Validation et évaluation

La précision du modèle a été évaluée à l'aide de métriques telles que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2). Ces indicateurs permettent de mesurer la capacité du réseau à généraliser les connaissances apprises.

IV.4.5 Utilisation pour l'optimisation

Une fois validé, le modèle de réseau neuronal a servi d'outil prédictif pour simuler l'impact des variations des paramètres de production sur la qualité du PEHD. Ceci a permis de proposer une optimisation des conditions opératoires visant à maximiser la performance.

IV.4 Résultats de la modélisation, optimisation des paramètres et discussion

Modèle NTanH(10)		
Apprentissage		Validation
Density		Density
Mesures	Valeur	Mesures
R carré	0,8816632	R carré
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	2,2476544	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)
Écart absolu moyen	1,6741502	Écart absolu moyen
-Log-vraisemblance	5774,8874	-Log-vraisemblance
Somme des carrés des écarts (SSE)	13089,603	Somme des carrés des écarts (SSE)
Somme fréquences	2591	Somme fréquences
Taux solid		Taux solid
Mesures	Valeur	Mesures
R carré	0,8826149	R carré
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,5802348	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)
Écart absolu moyen	0,4219623	Écart absolu moyen
-Log-vraisemblance	2266,1304	-Log-vraisemblance
Somme des carrés des écarts (SSE)	872,31831	Somme des carrés des écarts (SSE)
Somme fréquences	2591	Somme fréquences
	R carré	-Log-
	généralisé	vraisemblance
Apprentissage	0,9861	8041,0178
Validation	0,9862	892,07943

Figure IV.1 : Évaluation des performances du modèle pour la prédiction de la densité et du taux de solides

La **Figure IV.1** présente les indicateurs de performance statistique pour deux variables cibles : la densité et le taux de solides du PEHD, obtenus via un modèle prédictif (réseau de neurones).

Les résultats sont donnés deux fois pour chaque variable une fois pour l'ensemble d'apprentissage (training) et une fois pour l'ensemble de validation (test).

Les indicateurs présentés pour chaque variable, on observe :

- **R carré (R^2)** : mesure de la qualité de la prédiction et le pouvoir explicatif du modèle (plus proche de 1 = meilleur ajustement).
- **RMSE (racine de l'erreur quadratique moyenne)**: indique l'écart type des résidus (plus petit = meilleur).
- **Écart absolu moyen** : quantifie l'erreur entre les valeurs réelles et prédites (erreur moyenne absolue) (plus petit = meilleur).
- **-Log-vraisemblance** : utilisé dans l'évaluation de la probabilité des erreurs. plus faible est la valeur, plus le modèle est fiable.
- **SSE (Somme des carrés des écarts)** : somme des carrés des erreurs (plus petit = meilleur).
- **Somme fréquences** : probablement le nombre de points de données (ici 2591).

En bas de la figure, les valeurs globales du modèle sont données :

- R^2 généralisé :
 - Apprentissage = **0,9859**
 - Validation = **0,9876**
- -Log-vraisemblance généralisé :
 - Apprentissage = **8063,1194**
 - Validation = **877,36988**

R^2 de validation (0.9876) confirme que le modèle est bien généralisé et surappris.

Le modèle est performant pour prédire la densité et le taux de solides avec une bonne précision (R^2 élevé, erreurs faible), ce qui le rend exploitable pour l'optimisation du procédé de production du PEHD.

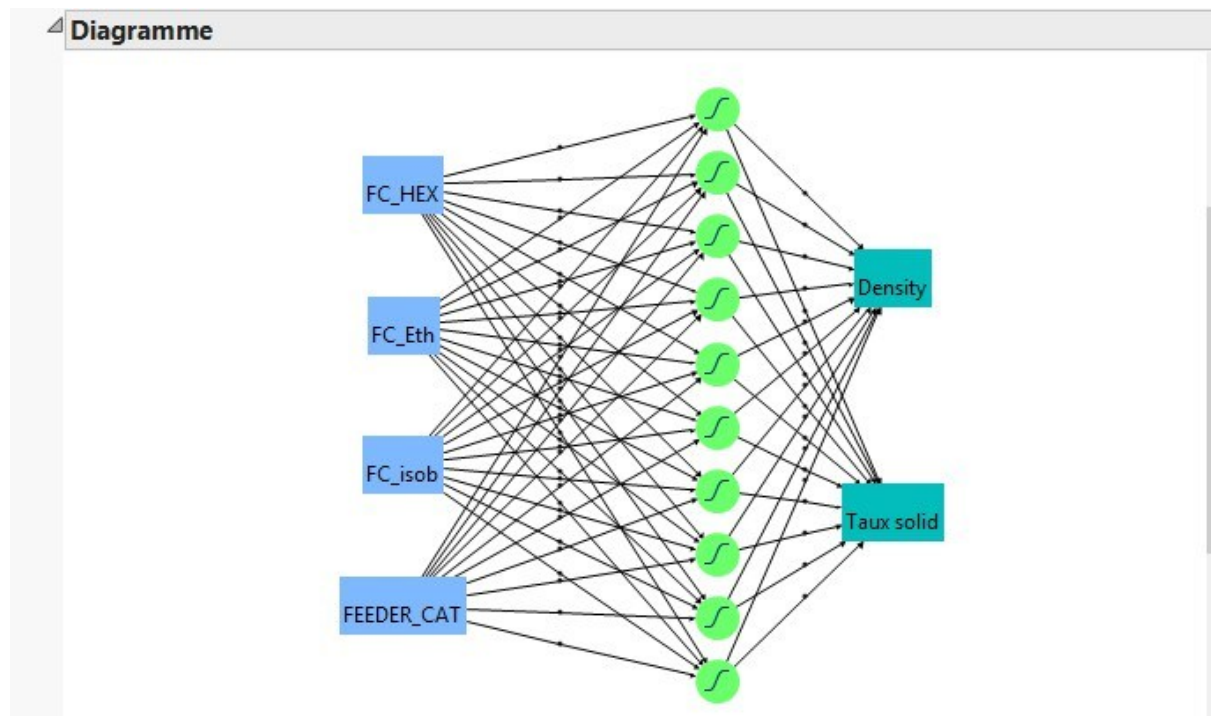


Figure IV.2 : Architecture du réseau de neurones artificiels pour la prédiction de la densité et taux de solides du PEHD

La **Figure IV.2** illustre un réseau de neurones multicouche (MLP-Multi-Layer Perceptron) utilisé pour modéliser le processus de production du PEHD. Il est constitué de :

- Le réseau prend en entrée quatre variables de procédé (**Input Layer**) : (en bleu à gauche) représentant les débits de matières premières.
 - FC_HEX : Débit de l'hexane.
 - FC_Eth : Débit de l'éthylène.
 - FC_isob : Débit de l'isobutane recyclé.
 - FEEDER_CAT : Charge totale d'alimentation en catalyseur.
- **Couche cachée (Hidden Layer) :**

Une seule couche cachée est visible avec plusieurs neurones (en vert clair), chacun recevant les signaux de toutes les entrées. Les fonctions d'activation utilisées semblent être de type sigmoïde (symbolisées par la lettre S), ce qui est courant pour modéliser des relations non linéaires. Cette couche permet de capturer les relations complexes entre les variables.

➤ **Sorties (Output Layer) :**

Deux sorties sont générées (en vert foncé à droite) :

- Density : Densité du produit final,
- Taux solid : Pourcentage de solides dans le réacteur.

Ce modèle permet de prédire avec précision les propriétés du PEHD à partir des débits d'alimentation. L'utilisation des réseaux neuronaux est ici justifiée par la complexité non linéaire du procédé, et les bons résultats obtenus (R^2 élevé) montrent la fiabilité du modèle pour l'optimisation du processus.

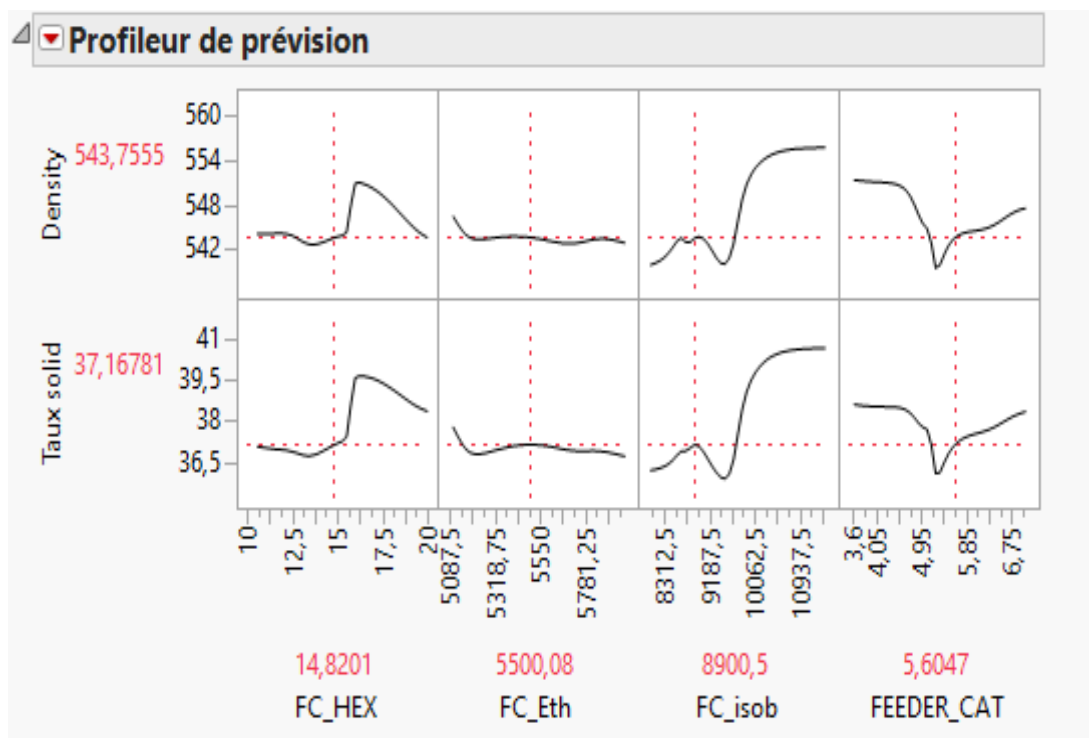


Figure IV.3 : Analyse du profil de prévision des paramètres influents sur la densité et le taux de solides en fonction des débits d'alimentation

La **Figure IV.3** représente un profil de prévision utilisé pour visualiser l'effet des variables d'entrée (FC_Eth, FC_Isob, FC_HEX, FEEDER_CAT) sur les variables de sortie (la densité et le taux de solides) via un modèle prédictif, probablement issu d'un réseau de neurones, ce profil est un outil puissant pour l'analyse de sensibilité et l'optimisation des paramètres dans le processus de production du PEHD.

Les quatre variables d'entrée (axes horizontaux) :

- **FC_HEX** (14,8201)
- **FC_Eth** (5500,08)
- **FC_Isob** (8900,5)
- **FEEDER_CAT** (5,6047)

Réponses (axes verticaux) : les sorties du modèle à savoir :

- **Densité** (543,7555)
- **Taux de solides** (37,16781)

Les courbes noires : indiquent comment la valeur de sortie varie lorsque chaque variable d'entrée change, en gardant les autres constantes.

Les lignes rouge pointillées : indiquent les valeurs d'entrée optimales (ou testées) utilisées pour obtenir les prévisions de la densité et le taux de solides.

Les valeurs numériques rouges : représentent les niveaux actuels de chaque facteur (en bas) et la valeur actuelle des réponses (à gauche).

La densité est fortement influencée par **FC_Isob** et **FC_Eth**, avec des effets non linéaires marqués.

Le taux de solides est surtout impacté par **FC_Isob** et **FEEDER_CAT**.

Ces courbes permettent d'identifier les réglages optimaux pour atteindre les propriétés souhaitées.

Ce type d'analyse est essentiel pour guider l'**optimisation des paramètres du procédé** afin d'améliorer la qualité du produit final.

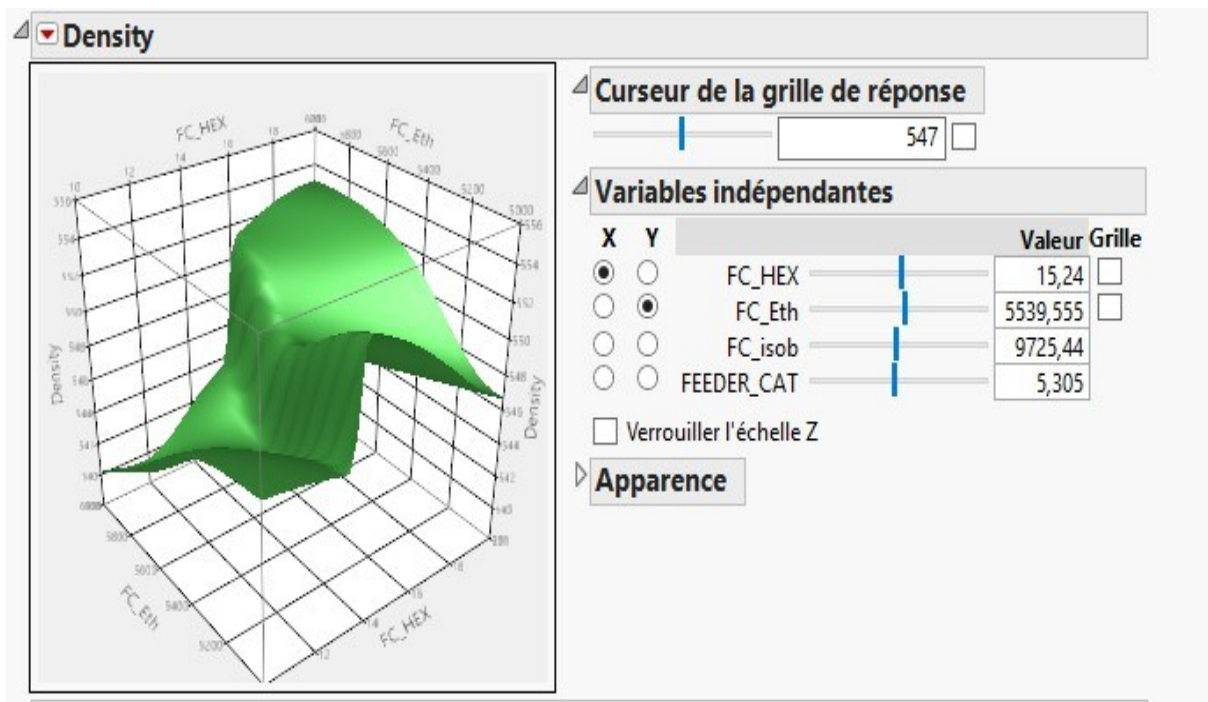


Figure IV.4 : Surface de réponse 3D de la densité en fonction des débits FC_HEX et FC_Eth

La **Figure IV.4** représente une visualisation tridimensionnelle de la densité du PEHD en fonction de deux variables indépendantes clés FC_Eth et FC_HEX .

La forme de la surface montre une interaction complexe non linéaire entre les deux facteurs.

La densité varie significativement selon les valeurs de FC_HEX et FC_Eth, avec une zone de maximum local visible au centre du graphique.

Les valeurs optimales utilisées dans ce cas (à droite) sont :

- FC_HEX \approx 15,24
- FC_Eth \approx 5539,55
- FC_isob et FEEDER_CAT sont maintenus constants.

Cette surface permet d'optimiser visuellement les conditions opératoires pour atteindre une densité souhaitée.

Les crêtes ou creux de la surface indiquent les combinaisons favorables ou défavorables des paramètres.

Ce type de graphique est utile pour l'analyse multi-paramètres et la prise de décision en ingénierie des procédés, en identifiant les zones optimales de fonctionnement.

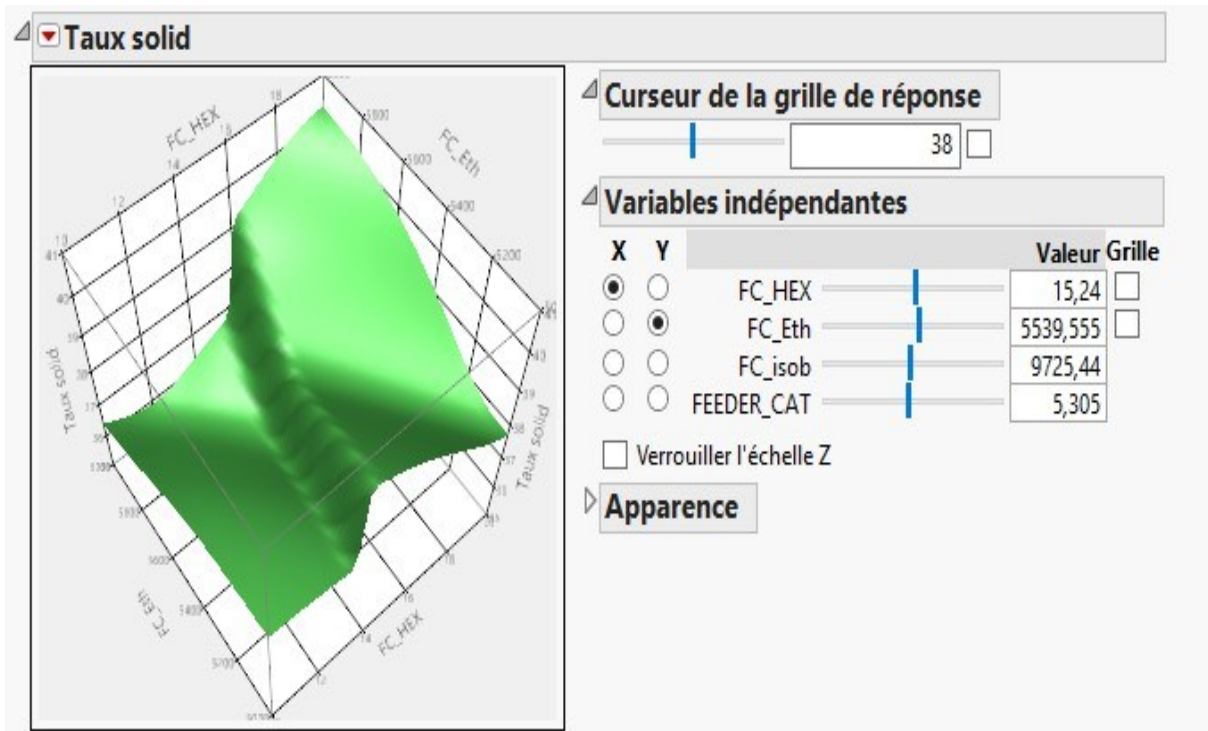


Figure IV.5 : Surface de réponse 3D du taux de solides en fonction des débits d'éthylène (FC_Eth) et d'hexène (FC_HEX)

La **Figure IV.5** montre l'influence conjointe de FC_Eth et FC_HEX sur le taux de solides dans le réacteur. Elle permet de :

- visualiser les zones de valeurs optimales pour maximiser ou contrôler le taux de solides.
- analyser les interactions entre les deux variables.
- appuyer les décisions de réglage en production pour obtenir une qualité cible du PEHD.

Elle est utile pour l'optimisation du procédé en tenant compte des limites opérationnelles.

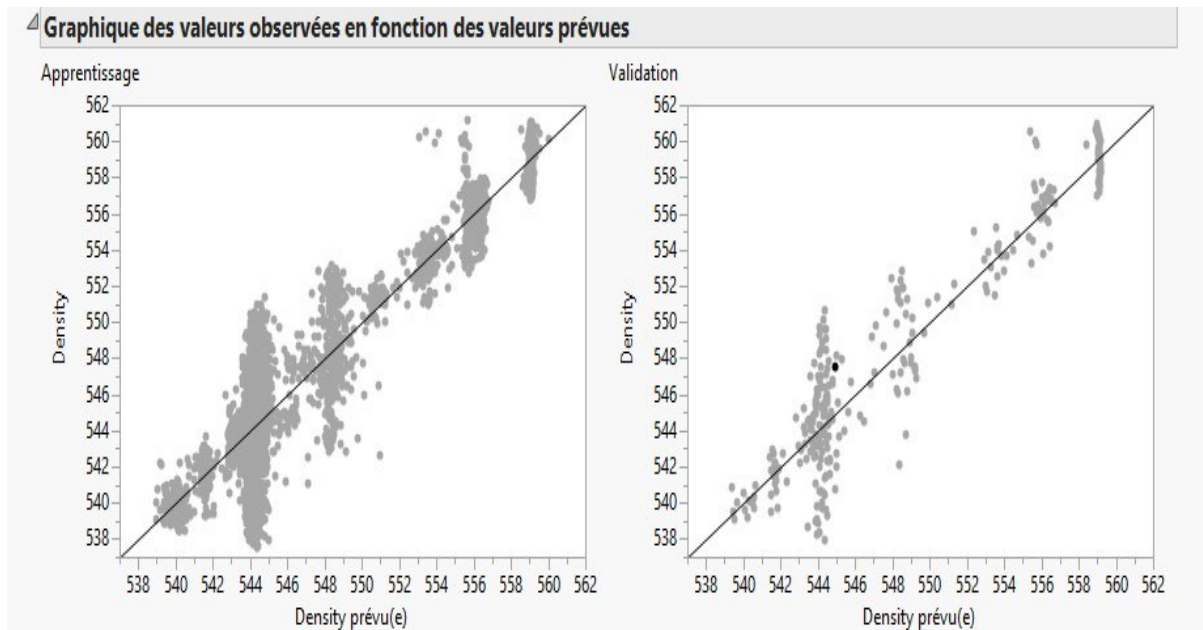


Figure IV.6 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la densité (phase d'apprentissage à gauche, validation à droite)

La **Figure IV.6** représente les résidus (écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites) en fonction des valeurs de densité prédites, pour deux phases :

À gauche : apprentissage

À droite : validation

Les résidus sont globalement centrés autour de zéro, ce qui indique une bonne précision du modèle.

On observe une répartition relativement aléatoire, sans tendance systématique ni structure apparente, ce qui est un bon signe : cela signifie que les erreurs sont indépendantes des prédictions.

Les valeurs extrêmes restent modérées, même si quelques points sont éloignés (valeurs aberrantes ou erreurs plus importantes).

Le modèle neuronal présente une bonne performance prédictive, avec des erreurs de prédiction bien réparties, ce qui confirme sa capacité à modéliser correctement la densité.

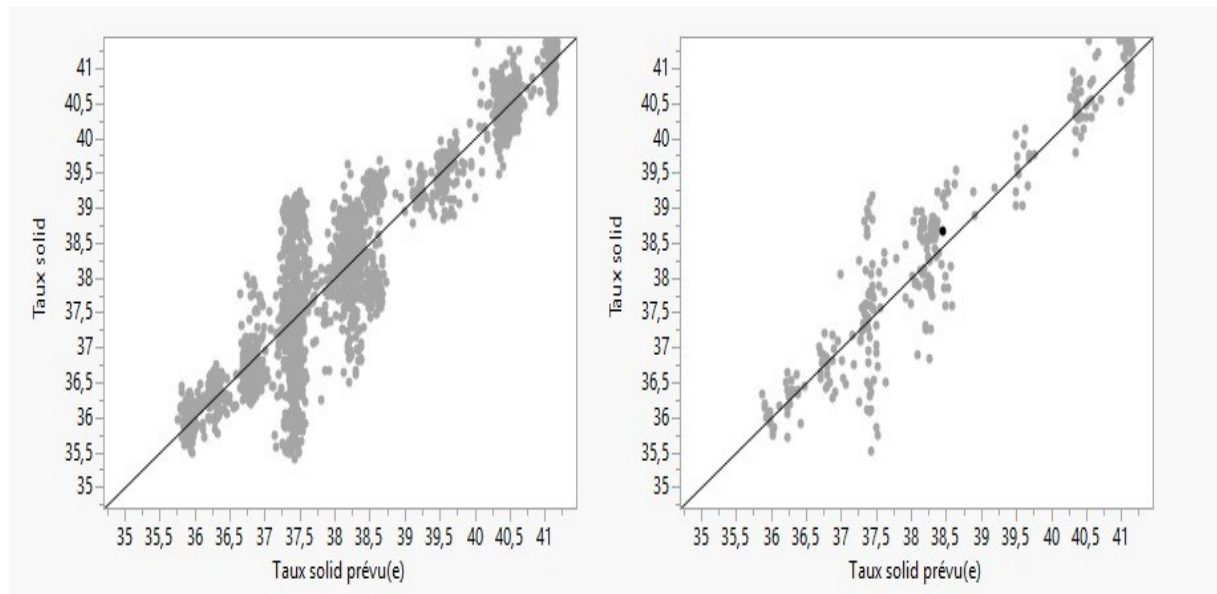


Figure IV.7 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues du taux de solide (Apprentissage à gauche, Validation à droite)

La **Figure IV.7** permet d'évaluer la qualité de la prédiction du modèle neuronal pour la variable taux de solide.

Les résidus (écarts entre valeurs expérimentales et prédites) sont principalement compris entre -2 et +2, ce qui indique des erreurs faibles.

La dispersion des points reste aléatoire et bien centrée autour de zéro, ce qui est un bon indicateur d'un modèle sans biais systématique.

Dans les deux phases (apprentissage et validation), aucune tendance claire ou structure n'apparaît, ce qui confirme que le modèle est bien généralisé.

Le modèle neuronal montre une bonne précision pour la prédiction du taux de solide, avec des résidus faibles, bien répartis et centrés, traduisant une bonne qualité d'ajustement.

4 Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues

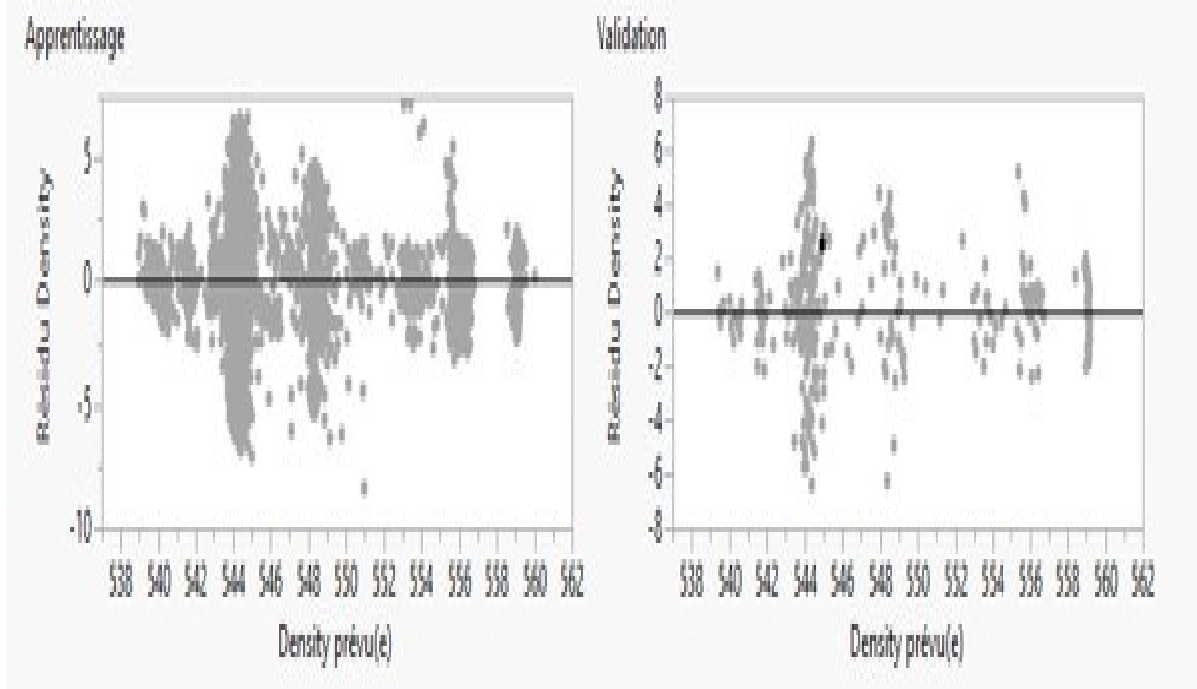


Figure IV.8: Graphique des résidus en fonction des valeurs prédites de la densité (phase d'apprentissage et de validation)

La **Figure IV.8** permet d'évaluer la performance du modèle en comparant les valeurs prédites à celles réellement mesurées.

Les points proches de la diagonale indiquent une bonne précision du modèle. Ici, la majorité des points sont bien alignés sur cette ligne, ce qui confirme une forte corrélation entre les densités prédites et observées.

En phase d'apprentissage, la répartition dense et alignée montre que le modèle a bien appris les relations.

En phase de validation, malgré une dispersion légèrement plus marquée, la tendance reste bien linéaire, ce qui confirme une bonne capacité de généralisation du modèle.

Le modèle neuronal prédit efficacement la densité, avec une bonne concordance entre valeurs observées et prévues en apprentissage et en validation. Cela témoigne d'un modèle fiable et robuste.

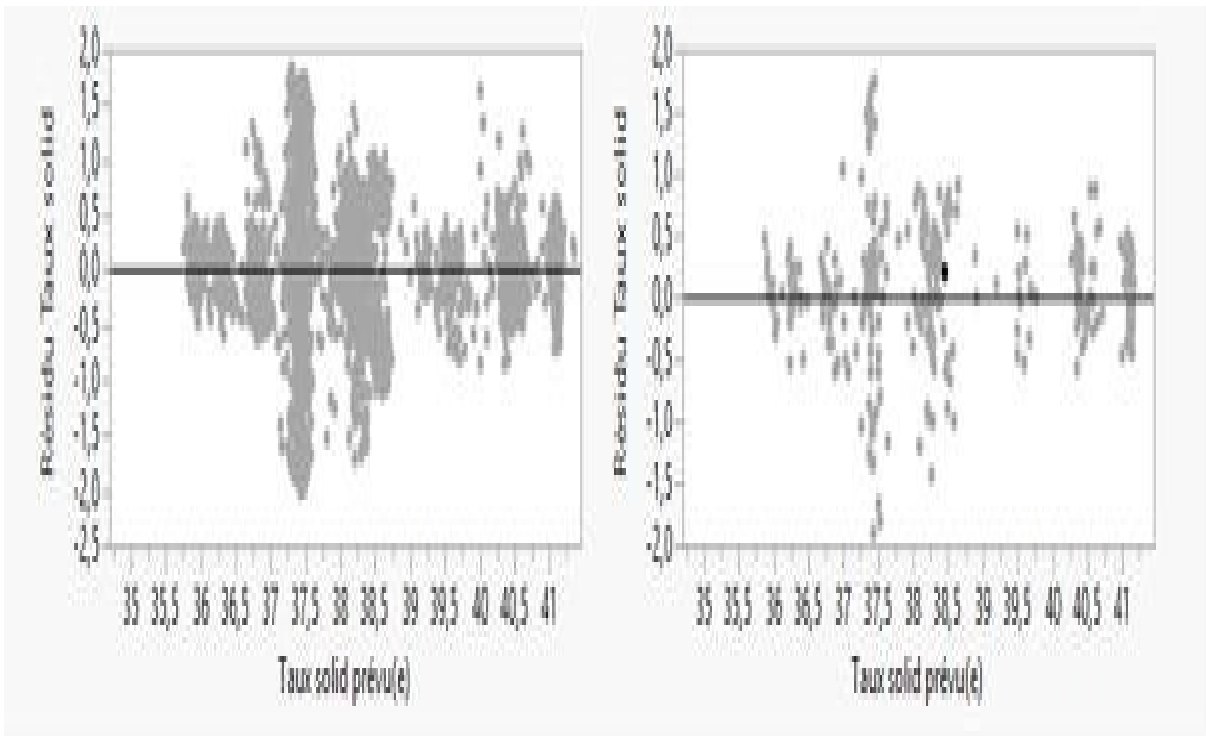


Figure IV.9 : Graphique des résidus en fonction des valeurs prédites du taux de solide (phase d'apprentissage à gauche, validation à droite)

La **Figure IV.9** montre la performance du modèle de prédiction du taux de solide.

Partie gauche (Apprentissage) :

Les points sont bien alignés autour de la diagonale, ce qui montre une forte corrélation entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Cela signifie que le modèle a bien appris les relations entre les variables d'entrée et le taux de solide.

Partie droite (Validation) :

Même si la densité de points est légèrement plus dispersée, la tendance reste proche de la diagonale. Cela confirme que le modèle généralise bien ses prédictions sur des données non utilisées dans l'apprentissage.

Le modèle de réseau neuronal donne des résultats fiables pour prédire le taux de solide, aussi bien en phase d'apprentissage qu'en phase de validation. La forte cohérence entre les valeurs prévues et observées confirme sa capacité prédictive.

L'équation des résidus

L'équation des résidus permet d'évaluer l'erreur entre la valeur réelle (observée) et la valeur prédite par un modèle.

$$\text{Résidu} = Y_{\text{observé}} - Y_{\text{prédit}}$$

Y_{observe} : la valeur mesurée expérimentalement (ex. densité ou taux de solides réel)

Y_{prédit} : la valeur calculée par le modèle (comme le Y_{calculé} indiqué dans votre image)

Le **résidu** mesure l'erreur pour chaque point de donnée.

Tableau IV.2 : Paramètres de travail et niveaux pour l'étude expérimentale de la production de PEHD

Date	Ti	me	Colonne	FC_Eth	FC_Isob	FC_HEX	FEEDER_CAT	Density	Taux solid	Predict Density	Predict Taux solid
07-mars-25	23	59:00		5419,82	8907,42	17,18	3,6	557,62	40,72	558,9639492	41,16843072
08-mars-25	6	59:00		5551,96	9105,01	17,72	3,6	558,2	40,86	558,84812116	41,10425245
08-mars-25	7	59:00		5613,2	9033,87	18,04	3,6	558,22	40,92	558,9224491	41,1621414
08-mars-25	8	59:00		5339,88	8852,05	16,42	3,6	558,89	41,05	558,7466466	41,14876302
08-mars-25	9	59:00		5539,16	8983,82	17,66	3,6	559,75	41,25	558,9624324	41,16857517
08-mars-25	10	59:00		5569,22	9052,32	18,42	3,6	559,75	41,42	558,811275	41,12276094
08-mars-25	11	59:00		5709,35	9089,2	18,62	3,6	560,72	41,52	558,8519019	41,15525845
08-mars-25	12	59:00		5539,45	10967,63	17,82	6,0	554,4	40,32	556,6764672	40,45034288
08-mars-25	13	59:00		5682,45	9184,04	18,12	7,0	552,92	40,2	554,1957005	40,54326284
08-mars-25	14	59:00		5583,68	9573,96	18,12	7,0	557,16	40,75	556,1817912	40,43299781
08-mars-25	15	59:00		5534,52	9510,73	17,18	7,0	557,32	40,52	556,4746042	40,50869626
08-mars-25	16	59:00		5472,34	9508,05	17,66	7,0	555,62	40,2	556,4068665	40,45856225
08-mars-25	17	59:00		5581,88	9481,75	17,42	7,0	555,28	40,04	556,125523	40,50405245
08-mars-25	18	59:00		5586,4	10293,15	17,56	7,0	553,74	39,6	554,5848586	39,81347359
08-mars-25	19	59:00		5454,56	9874,25	17,56	7,0	551,48	39,04	553,4742909	39,4116715
08-mars-25	20	59:00		5437,42	9924,35	13,62	7,0	549,26	38,34	548,5934996	38,17988732
08-mars-25	21	59:00		5671,46	10085,06	15	7,0	547,62	37,82	548,0033504	37,9661188
08-mars-25	22	59:00		5547,52	9434,32	13,22	7,0	548,52	38,05	546,5907661	37,68285056
08-mars-25	23	59:00		5524,45	9494,92	13,62	6,0	543,06	36,45	545,3133867	37,14868217
08-mars-25	24	59:00		5385,17	8899,52	13,2	6,0	544,42	37,22	545,5073166	37,40946595
08-mars-25	25	59:00		5409,04	8902,14	13,86	5,6	544,68	37,02	543,3163591	36,74447168
08-mars-25	26	59:00		5521,2	8970,64	13,2	5,6	543,06	36,66	542,9736974	36,79363671
08-mars-25	27	59:00		5623,22	9176,14	13,32	5,6	541,25	36,25	543,3007172	36,7406136
08-mars-25	28	59:00		5459,84	8873,17	13,48	5,4	541,82	36,3	541,4910041	36,39345684
08-mars-25	29	59:00		5409,02	8949,57	13,2	5,4	540,65	36,18	541,1065965	36,29099634
09-mars-25	1	59:00		5669,72	9299,96	13,86	5,2	539,72	36,1	540,4168845	35,9281531
09-mars-25	2	59:00		5526,02	8894,24	13,2	5,2	539,68	36,12	539,9586665	36,09538146
09-mars-25	3	59:00		5561,64	8177,64	12,92	5,2	538,06	35,6	544,7691212	37,51243035
09-mars-25	4	59:00		5629,72	8372,6	13,86	5,2	540,05	36,32	543,8992207	37,32404403
09-mars-25	5	59:00		5520,98	8267,22	13,86	5,2	541,86	36,66	543,870042	37,31727301
09-mars-25	6	59:00		5533,15	8109,15	13,48	5,2	543,36	37,16	544,0655751	37,40877101
09-mars-25	7	59:00		5507,62	8240,87	12,52	5,2	543,52	37,12	545,2781254	37,62514913
09-mars-25	8	59:00		5491,8	8164,47	13,22	5,2	545,35	37,75	543,9389966	37,33350908
09-mars-25	9	59:00		5652,8	8443,72	13,52	5,2	545,88	37,78	543,9374156	37,34939257
09-mars-25	10	59:00		5494,52	8127,58	14,32	5,2	546,62	38,08	545,6676565	37,71486338
09-mars-25	11	59:00		5415,75	8230,32	13,2	5,2	547,42	38,48	544,0207612	37,34981689
09-mars-25	12	59:00		5537,8	8238,24	13,62	5,2	549,52	38,8	543,7687371	37,30331401
09-mars-25	13	59:00		5173,32	8074,5	14,02	5,0	551,07	39,22	551,0924356	38,94871801
09-mars-25	14	59:00		5328,62	8391,04	13,22	4	552,16	39,2	548,3227704	38,48634338
09-mars-25	15	59:00		5448,07	8388,42	13,22	4	551,74	39,2	547,8982406	38,35508387
09-mars-25	16	59:00		5551,98	8412,12	13,2	4	545,72	37,84	548,3959424	38,47670258
09-mars-25	17	59:00		5359,2	8417,35	13,2	4,5	541,92	37,62	544,8447117	37,42186547
09-mars-25	18	59:00		5383,8	8385,72	14,12	7,0	539,15	37,42	544,0524378	38,23969413
09-mars-25	19	59:00		5447,22	8443,72	14,52	7,0	542,92	38,22	544,0725591	38,23735905
09-mars-25	20	59:00		5625,12	8528,04	13,62	7,0	543,22	38,32	543,9738655	38,24397975
09-mars-25	21	59:00		5611,2	8564,92	13,58	7,0	544,86	38,52	544,3019762	38,25566224
09-mars-25	22	59:00		5445,22	8417,35	12,32	7,0	546,82	38,82	543,0979857	38,12299034
09-mars-25	23	59:00		5443,15	8420,02	12,62	7,0	547,68	38,94	543,4588002	38,16476512
09-mars-25	24	45:00		5567,55	8551,75	14,72	7,0	548,06	38,88	544,1879256	38,23939448

Le **tableau IV.2** présente les paramètres de travail et leurs niveaux utilisés pour une étude expérimentale, débit éthylène, débit isobutane, débit hexene, catalyseur, le taux de solides et la densité. Chaque facteur est testé à différents niveaux, ce qui permet d'évaluer l'influence de ces paramètres sur les propriétés du PEHD. Cette variation systématique aide à modéliser et optimiser la production. La sélection précise des niveaux assure la pertinence et la fiabilité des résultats obtenus.

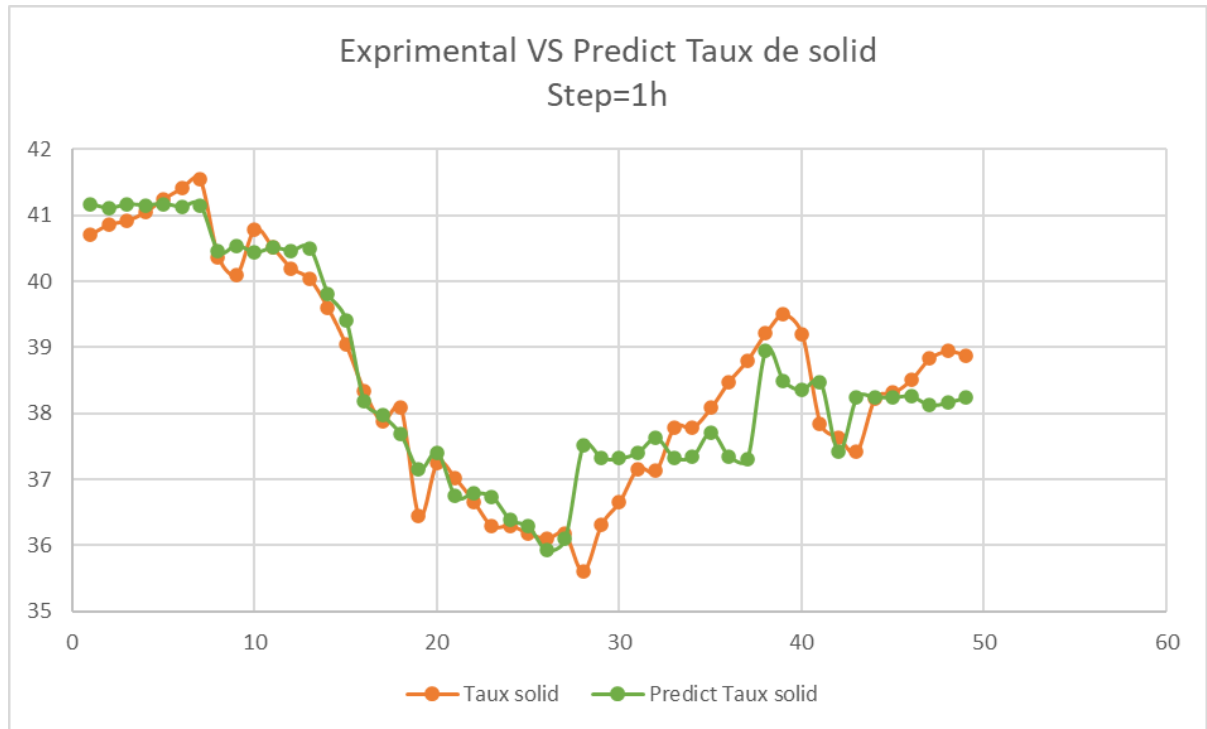


Figure IV.10 : Taux de solide expérimentale vs taux de solide prédit

La **Figure IV.10** montre la comparaison entre le taux de solide mesuré expérimentalement et celui prédit par le modèle utilisé.

La bonne concordance entre les deux courbes ou points indique que le modèle est fiable pour estimer le taux de solide dans les conditions étudiées. Cela permet d'optimiser les paramètres de production en se basant sur les prédictions sans toujours recourir à des mesures expérimentales coûteuses ou longues.

En résumé, cette comparaison valide l'efficacité de la modélisation dans le contrôle et l'optimisation du taux de solide dans le processus étudié.

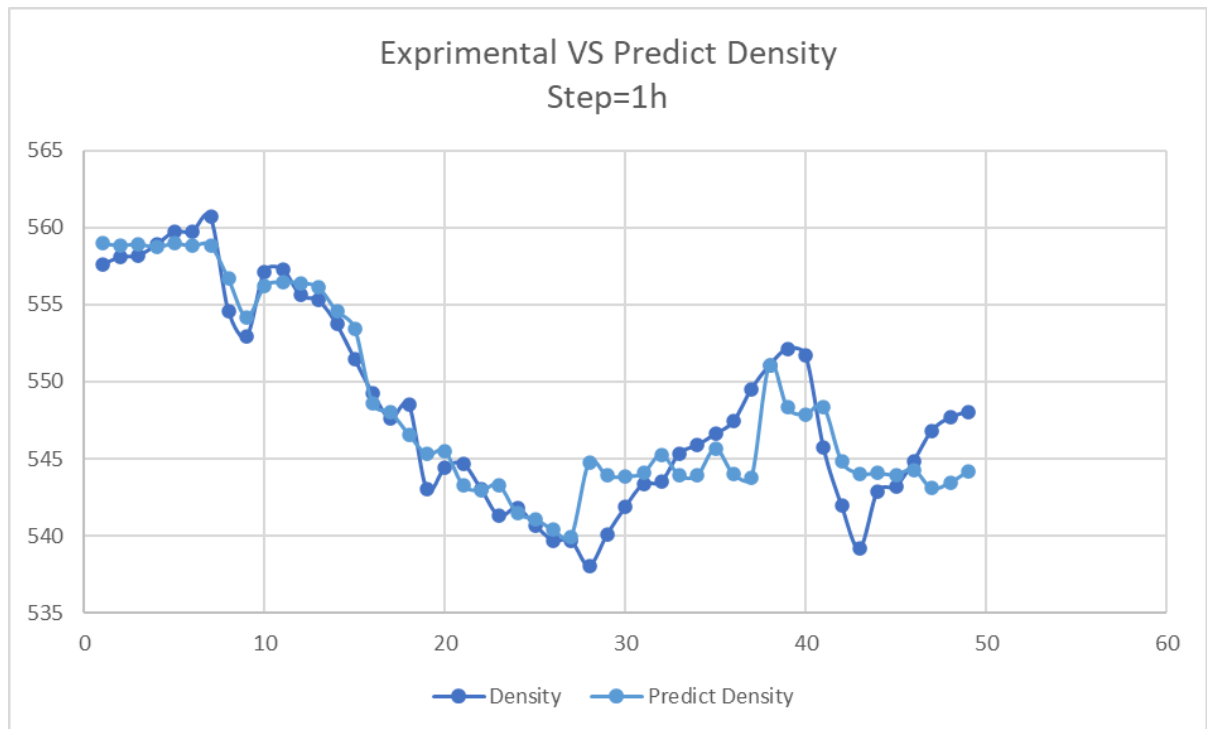


Figure IV.11 : Densité expérimentale vs densité prédite

La **Figure IV.11** compare la densité expérimentale mesurée avec la densité prédite par le modèle.

Une bonne correspondance entre les valeurs expérimentales et prédites indique que le modèle est précis et fiable pour estimer la densité du matériau dans les conditions de l'étude.

Cela permet d'utiliser le modèle pour optimiser le processus de production sans avoir à réaliser systématiquement des mesures expérimentales, ce qui économise du temps et des ressources.

En conclusion, cette comparaison valide l'efficacité de la modélisation dans la prévision de la densité.

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'importance de la modélisation et de l'optimisation dans l'amélioration des paramètres de production du PEHD.

Grace à l'application des reseuax neuronaux, un modèle prédictif fiable a été établi, permettant de mieux comprendre l'influence des différentes variables du procédé.

Les résultats obtenus montrent que l'optimisation de ces paramètres contribue significativement à l'amélioration de la densité et du taux de solides, tout en assurant une meilleure maitrise du processus de production.

Ce travail constitue une base solide pour le développement futur de systèmes de production plus performants et mieux contrôlés.

CONCLUSION GENERALE

L'industrie des plastiques a connu ces dernières années un développement considérable.

Le PEHD est l'un des polymères les plus utilisés dans plusieurs applications. Le grade 5502 est destiné pour la fabrication des objets en plastique (bidons, casiers, ...) par voie d'injection.

À travers ce travail, j'ai étudié et analysé le processus de production du polyéthylène haute densité (PEHD) en m'appuyant sur des méthodes de modélisation numérique, en particulier les réseaux de neurones artificiels. Mon objectif principal était de développer un modèle prédictif capable de relier les paramètres opératoires aux caractéristiques du produit, notamment la densité et le taux de solide.

Les résultats obtenus montrent que le modèle construit présente une bonne capacité de prédiction. Les graphiques et les analyses statistiques mettent en évidence une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites, aussi bien en phase d'apprentissage qu'en phase de validation. De plus, la répartition des résidus indique un comportement stable du modèle.

Cette étude met en évidence l'efficacité des réseaux neuronaux comme outil performant pour la modélisation de procédés industriels complexes, et souligne leur potentiel dans l'amélioration de la qualité, l'optimisation des paramètres et le pilotage des procédés.

RÉFÉRENCES

- [1] Manuel – opératoire de procédé Philips, INTEDRA document au niveau du complexe CP2K.
- [2] ABED Zineb , “Rapport fin de stage de mise en situation professionnelle,” 2015.
- [3] Michel F. et Yves. G. « Chimie et Physico-chimie des Polymères ». 2^e et 3^e cycles. Dunod. Paris, 4-8, 2005.
- [4] Michel. F. Yves.G. “Organic and physical chemistry of polymers”, John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2008.
- [5] WEISS.P. « La Chimie des polymère », société Francophone de Biomatériaux dentaires, 2010.
- [6] BOUTERFA. M, « Etude de la détermination du paramètre d’interaction entre deux polymères », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif, génie des polymères, 2011.
- [7] « Guide d’étude des réseaux en polyéthylène » Edition 2011 – 2012.
- [8] Peacock A.J. “Handbook of polyethylene: structure, properties, and applications”, New York: Marcel Dekker, 534. 2001.
- [9] ALIDRA Hanene & BOUROUIS Douniazed, « Le qualité de polyéthylène à haute densité » Mémoire d’ingénieur, Ecole IAP – Boumerdes, 2015-2017.
- [10] https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/TDH/chap1_%20M%C3%A9thodes%20Num%C3%A9riques%20L2%20acad,TDH,%20HSI.pdf ; Module: méthodes Numériques (Analyse numérique). Consulté le 30/05/2025.
- [11] <http://dSPACE.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11631/1/11-11-chap2%20fin.pdf> ; Réseaux de neurones artificiels. Consulté le 01/06/05/2025.

[12] <https://gisnt.org/pdf/R%C3%A9seau%20neuronaux%20artificiels.pdf> ; réseaux de neurones artificiels, architectures et applications. Université de Haute Alsace, Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes). Consulté le 02/06/05/2025.

[13] OUGUISSI Mabrouk et ALMAOUI Ayoub « Prédiction de rayonnement solaire journalière par réseau de neurone » MASTER ACADEMIQUE Domaine Sciences et technologies Filière Génie électrique Spécialité Electrotechnique Industrielle universite kasdi merbah ouargla.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif de modéliser et d'optimiser les paramètres de production du polyéthylène haute densité (PEHD) en utilisant les réseaux de neurones artificiels. Les variables clés considérées sont les débits d'éthylène, d'isobutane, d'hexène et de catalyseur. Cette approche a permis de prédire avec précision la densité et le taux de solide, et d'améliorer la performance du procédé.

Abstract

This thesis aims to model and optimize the production parameters of high-density polyethylene (HDPE) using artificial neural networks. The main variables considered include the flow rates of ethylene, isobutane, hexene, and catalyst. This method allowed accurate prediction of density and solid content, leading to enhanced process efficiency and improved product quality.

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتحسين شروط إنتاج البولي إيثيلين عالي الكثافة من خلال النمذجة باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية. تم الاعتماد على متغيرات تشغيلية رئيسية مثل تدفق الإيثيلين، والإيزوبيوتان، والهكسين، والمحفز. سمحت هذه المنهجية بالتنبؤ بدقة بالكثافة ونسبة المادة الصلبة، كما ساهمت في تحسين الإنتاجية وجودة المنتج النهائي.