



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Sécurité Industrielle et Environnement**

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Industries pétrochimiques**

**Spécialité : Pétrochimie**

**Thème**

# PROCÉDÉ DE LA SYNTHÈSE DE L'URÉE AU NIVEAU DU COMPLEXE PÉTROCHIMIQUE

**« SORFERT ALGÉRIE SPA »**

Présenté et soutenu publiquement par :

**ZOUDJI Oussama.**

**SLAIMI Abdelkarim.**

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom    | Grade | Etablissement | Qualité   |
|------------------|-------|---------------|-----------|
| Mme. LEBSIR. H   | MCA   | IMSI          | Président |
| Mme. BELOUFA. KH | MAA   | IMSI          | Encadreur |
| Mme. MECHKEN. A  | MAA   | IMSI          | Examineur |

Junin 2016

# Remerciements

*En premier lieu, nous remercions notre créateur « DIEU » qui nous a donné la santé, la volonté, le courage ainsi que la conscience pour que nous puissions réussir cette formation.*

*Nous tenons à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de l'institut de maintenance et de sécurité industrielle, les intervenants professionnels ainsi que les responsables de la formation Pétrochimie, pour avoir assuré le bon déroulement des études durant ces 5 années.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner toute notre reconnaissance à Mme l'encadreur **BELOUFA KHADIDJA** pour le temps qu'elle nous a consacré tout au long de cette période, sachant répondre à toutes nos interrogations ; sans oublier sa participation au cheminement de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également à tout l'ensemble du personnel du complexe **SORFERT ALGERIE SPA** pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'ils nous ont fait vivre durant la période du stage pratique ainsi que toute l'équipe du complexe **CP1/Z** pour leur soutien et leur encouragement.*

*En fin, toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et tous mes Ami(e)s que j'aime tant, **MEKADEM Yasser, DJELABET Farouk, LEKKAM Wassim, HAFRAD Miloud, BOUTALBI Amir, BENBAKHTI Rabie, KERROUMI Karim, KHALDI Amine, AMRI Adel, MASKRI Khadidja, METRANI Asmaa, BENSAFI Zahra, KHALIFA Zahira, DIB Hanaa, BELHADI Nesrine, BELMAHI Soumia, BELHADJ Zineb, BENDJELIDA Hanane, FELIDJ Asmaa, ALI BENNACER Zahra, BERRAJAL Faiza.***

*Pour leur sincère amitié, et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.*

*Zoudji Oussama.*

# *Dédicaces*

*Que ce travail témoigne de mes respects :*

*À mes parents :*

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*À mes sœurs :*

*Elles vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'elles n'ont cessé de me porter.*

*À toute la famille SLAIMI.*

*À tous mes professeurs :*

*Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.*

*À tous mes amis et mes collègues :*

*En particulier :*

*Bedj Ryma : Chirurgien-dentiste.*

*Charaidia Sanaa : Externe en 6<sup>ème</sup> année médecine.*

*Djelloul Meriem : Master 2 Génie chimique.*

*Ighilhariz Louiza : Licence 3 : Maintenance en instrumentation.*

*Rahou Imane : Docteur en pharmacie.*

*Seddiki Souhila : Docteur en pharmacie.*

*Zoudji Oussama*

# Tables des matières

## Chapitre I

|  |    |
|--|----|
| I-1-Introduction .....   | 1  |
| I-2-Généralités.....   | 1  |
| I-3-L'organigramme.....  | 2  |
| I-4-Matières premières et produits finis .....                     | 3  |
| I-4-1-Les matières premières .....                                 | 3  |
| I-4-2-Les produits finis.....                                      | 4  |
| I-5-Implantations.....   | 5  |
| I-6-Installations.....   | 5  |
| I-6-1-Unité de production d'ammoniac.....                          | 6  |
| I-6-2-Unité de production d'urée .....                             | 8  |
| I-6-3-Services utilités et installations hors site (Offsites)..... | 10 |
| I-6-4-Autres installations .....                                   | 11 |
| I-7-Description générale du procédé .....                          | 12 |
| I-7-1-Unité prétraitement .....                                    | 12 |
| I-7-2-Unité d'ammoniac (Procédé Uhde).....                         | 12 |
| I-7-2-1-Section reforming.....                                     | 12 |
| I-7-2-2-Section de la conversion du CO.....                        | 13 |
| I-7-2-3-Section de décarbonatation .....                           | 13 |
| I-7-2-4-Section de méthanisation.....                              | 14 |
| I-7-2-5-Section de compression de synthèse .....                   | 14 |
| I-7-2-6-Section réfrigération.....                                 | 14 |
| I-7-2-7-Transfert, stockage et chargement d'ammoniac .....         | 14 |
| I-7-3-Unité d'urée (Stamicarbon- Uhde) .....                       | 15 |
| I-7-4-Centrale utilités .....                                      | 16 |

## Table des matières

### Chapitre II

|  |    |
|--|----|
| II-1-Introduction .....  | 17 |
| II-2- Caractéristiques générales.....                            | 17 |
| II-1-1) Les procédés sans recyclage.....                         | 17 |
| II-1-2) Les procédés à recyclage partiel.....                    | 17 |
| II-1-3) Les procédés à recyclage total .....                     | 18 |
| II-1-4) Les procédés avec stripping .....                        | 18 |
| II-1-5) Les procédés intégrés .....                              | 18 |
| II-3- Les procédés et leurs caractéristiques.....                | 19 |
| II-3-1- Procédés Stamicarbon (D.S.M).....                        | 20 |
| II-3-2- Les procédés Snamprogetti (fig2).....                    | 22 |
| II-3-3- Les procédés Chemico (Chemical Construction Corp.).....  | 24 |
| II-3-4- Les procédés Mitsui Toatsu.....                          | 25 |
| II-3-5- Les autres procédés à recyclage total.....               | 26 |
| II-3-5-1- Le procédé Montecatini-Fausser .....                   | 26 |
| II-3-5-2- Le procédé Péchiney Grace .....                        | 26 |
| II-3-5-3- Le procédés Lonza-lummu.....                           | 26 |
| II-3-5-4- Le procédé CPI-allied Chemical (vulcan-cincinati)..... | 26 |
| II-4-Conclusion.....   | 26 |

# Table des matières

## Chapitre III

|   |    |
|---|----|
| III-1-Introduction .....  | 27 |
| III-2-L'urée .....  | 27 |
| III-2-1-Définition.....   | 27 |
| III-2-2-Propriétés de l'urée.....   | 28 |
| III-2-2-1-Propriétés chimiques.....   | 28 |
| III-2-2-2-Propriétés physiques .....  | 28 |
| III-2-2-3-Propriétés thermochimiques.....   | 28 |
| III-2-3-Utilisation .....   | 29 |
| III-2-3-2-Alimentation animale .....  | 29 |
| III-2-3-3-Matières plastiques .....   | 29 |
| III-2-3-4-Biochimie .....   | 29 |
| III-2-3-5-Additif alimentaire.....  | 29 |
| III-3-La réaction principale dans le procédé de l'urée.....                                   | 30 |
| III-4-Procédé de décomposition au CO <sub>2</sub> Stamicarbon .....                           | 31 |
| III-5-Comportement des phases de la réaction dans le système de la production de l'urée ..... | 31 |
| III-5-1-Ammoniac et dioxyde de carbone .....  | 32 |
| III-5-2-Ammoniac, dioxyde de carbone et eau.....  | 34 |
| III-5-3-Ammoniac, dioxyde de carbone, eau et urée .....                                       | 34 |
| III-6-La réalisation techno-chimique du procédé de synthèse.....                              | 34 |
| III-7-Le condenseur de synthèse .....   | 36 |
| III-8-L'équilibre physique et chimique du procédé global.....                                 | 36 |
| III-9-Le décomposeur (échangeur de chaleur HP).....   | 38 |
| III-10-Conditions de synthèse et contrôle .....   | 39 |
| III-11-Hydrolyse .....  | 39 |
| III-11-1-Réaction d'hydrolyse.....  | 40 |
| III-12-Biuret .....   | 41 |
| III-12-1-Propriétés du biuret .....   | 41 |
| III-12-2-Réaction de formation de biuret.....   | 41 |
| III-13-Conclusion.....  | 42 |

## Table des matières

### Chapitre IV

|  |    |
|--|----|
| IV-1-Introduction.....                                   | 43 |
| IV-2-Description du procédé de production d'Urée.....    | 43 |
| .....  | 44 |
| IV-3-Les Différents systèmes de l'unité d'Urée.....      | 45 |
| IV-3-1- Compression du CO2.....                          | 45 |
| IV-3-1-1-Extraction de l'hydrogène.....                  | 47 |
| IV-3-2- Pompage d'Ammoniac.....                          | 49 |
| IV-3-3-Synthèse.....                                     | 50 |
| IV-3-4-Recirculation.....                                | 58 |
| IV-3-5- Évaporation.....                                 | 63 |
| IV-3-6-Desorption et hydrolyse.....                      | 66 |
| IV-3-6-1-Stockage des condensats de procédé.....         | 67 |
| IV-3-6-2-Premier désorbeur 028C001.....                  | 69 |
| IV-3-6-3-Hydrolyseur 028C003.....                        | 70 |
| IV-3-6-4-Second désorbeur 027C004.....                   | 72 |
| IV-3-6-5-Reflux du désorbeur.....                        | 72 |
| IV-3-7-Granulation.....                                  | 73 |
| IV-3-7-1-Usage de la Solution de Formaldéhyde UF-80..... | 74 |
| IV-3-7-2-Circuit des solides.....                        | 76 |
| IV-3-8-Vapeur et condensation.....                       | 83 |
| IV-4-Stockage et chargement d'urée.....                  | 83 |
| IV-5-Conclusion.....                                     | 84 |

## Table des matières

### Chapitre V

|   |     |
|---|-----|
| V-1-Introduction .....  | 85  |
| V-2- Différents types des compresseurs .....  | 85  |
| V-2-1-Compresseurs volumétriques .....  | 85  |
| V-2-2-Compresseurs dynamiques .....   | 86  |
| V-2-3-Présentation générale d'un compresseur Centrifuge .....   | 86  |
| V-3-Discription du compresseur du CO <sub>2</sub> du complexe SORFERT .....                           | 87  |
| V-4-Types de compression .....  | 88  |
| V-5-Thremodynamique de la compression .....   | 89  |
| V-5-1-Compression isentropique adiabatique .....  | 89  |
| V-5-2-Le travail adiabatique .....  | 90  |
| V-5-3-Compression polytropique .....  | 90  |
| V-5-4-le travail de compression indiqué (ou travail réel, hors pertes mécaniques).....                | 91  |
| V-5-5-Rendement isentropique .....  | 91  |
| V-5-6-Rendement polytropique .....  | 91  |
| V-5-7-Comprression isothermique .....   | 91  |
| V-5-7-1-le travail isothermique .....   | 91  |
| V-6-Partie calcul .....   | 94  |
| V-6-1-Calcul du rendement du design pour le premier étage .....                                       | 94  |
| V-6-2-Calcul du rendement du design pour le deuxième, troisième et quatrième étage .....              | 95  |
| V-6-3-Calcul du rendement réel (actuel) pour le premier étage .....                                   | 96  |
| V-6-4-Calcul du rendement réel pour le deuxième, troisième et quatrième étage .....                   | 98  |
| V-7-Simulation.....   | 100 |
| V-7-1 Introduction.....   | 100 |
| V-7-2 Présentation du logiciel de simulation « Aspen Technology ».....                                | 100 |
| V-7-3-Simulation du compresseur 020K002 .....   | 101 |
| V-7-3-1-Les recommandations .....   | 101 |
| V-7-3-2-Calcul de rendement du compresseur en utilisant les paramètres donnés par le simulateur ..... | 105 |
| V-8-Conclusion .....  | 106 |

## Liste des annexes

Compresseur centrifuge à 2 étages à plan de joint horizontal.

PFD (Process Flow Diagram) de la section de compression (Système 020).

PFD (Process Flow Diagram) de la synthèse de l'urée (Système 022).

PFD (Process Flow Diagram) de la section d'évaporation (Système 024).

PFD (Process Flow Diagram) de L'unité de granulation (système 027-1).

PFD (Process Flow Diagram) de L'unité de granulation (système 027-2).

PFD (Process Flow Diagram) de L'unité de granulation (système 027-3).

PFD (Process Flow Diagram) de L'unité de granulation (système 027-4).

PFD (Process Flow Diagram) de desorption et hydrolyse (système 028).

Simulation du schéma d'installation de l'unité de compression (Système 020) après l'ajout de la vanne de détente.

Tableau 1 : Valeurs pour les différents gaz des chaleurs spécifique  $C_p$  (en J/Kg.K) en fonction de la température.

## *Liste des figures et tableaux*

Figure I-1: Organigramme de l'usine

Tableau I-1 : La composition du GN utilisé comme charge

Figure I-2: Représentation de la molécule de l'ammoniac en 3D.

Figure I-3: Représentation de la molécule de l'urée en 3D.

Figure I-4: Unité de production d'urée.

Figure I-5: Section de reformage.

Figure I-6: Unité de décarbonatation.

Figure I-7: Schéma résumant le procédé de la synthèse d'urée.

Tableau II-I : caractéristiques principales des procédés de l'urée.

Figure II-1: Procédé Stamicarbon D.S.M avec stripping au gaz carbonique.

Figure II-2: Procédé Snamprogetti avec stripping à l'ammoniac.

Figure II-3: Procédé Chemico à recyclage total.

Figure III-1: Représentation de la molécule de l'urée en 2D et 3D.

Tableau III-1 : Les transitions entre les phases.

Figure III-2: Équilibre liquide / gaz du système  $\text{CO}_2\text{-NH}_3$ .

Figure III-3: Représentation de la molécule de biuret en 3D.

Figure IV-1 : Localisation d'unité d'Urée dans SORFERT

Figure IV-2 : dessin 3D illustrant la maison de compresseurs à SORFERT

Figure IV-3 : Réacteur d'élimination du  $\text{H}_2$  dans la section de compression du  $\text{CO}_2$

Figure IV-4 : Les dimensions du réacteur d'élimination d'hydrogène.

Tableau 1 : La caractéristique du catalyseur du réacteur 020R001

Figure IV-5: la pompe d'ammoniac

Figure IV-6: Schema de pompage d'ammoniac provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-7: Schema de la synthèse d'urée provenant de La salle de contrôle (DCS).

Figure IV-8: les importants équipements assurant la synthèse de la production d'urée.

Figure IV-9: Schema de la section de recirculation 1 provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-10: Schema de la section de recirculation 2 provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-11: Schema de la section de recirculation (Absorbeur Atmosphérique) provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-12: Schema de la section Evaporation provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-13: Schema de la section de désorption 1 provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-14: Schema de la section de désorption 2 provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-15: Représentation de la molécule de Formaldéhyde.

Figure IV-16: Unité de granulation en 3D.

Figure IV-17: Unité de granulation.

Figure IV-18: Schema de la section de granulation provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-19: Schema de la section de granulation (1er refroidisseur) provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-20: Schema de la section de granulation (2eme refroidisseur) provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-21: Schema de la section de granulation final provenant de la salle de contrôle (DCS).

Figure IV-22: Unité de stockage d'urée.

Tableau V-1 : Récapitulatif des paramètres isentropiques selon la nature de compression.

Tableau V-2 : Récapitulatif des paramètres polytropique selon la nature de compression.

Tableau V-3: les conditions du fonctionnement de design.

Tableau V-4 : les conditions du fonctionnement réel (actuel).

Tableau V-5 : Récapitulatif des résultats.

Tableau V-6 : Comparaison entre les paramètres du design et actuelles (actuel) du corps HP.

Tableau V-7 : Comparaison entre les paramètres du design et actuelles (actuel) du corps BP.

Figure V-1: le schéma d'installation de l'unité de compression faite par le simulateur Hysys.

Figure V-2: Résultat du premier étage par le simulateur Hysys.

Figure V-3: Résultat du deuxième étage par le simulateur Hysys.

Figure V-4: Résultat du troisième étage par le simulateur Hysys.

Figure V-5: Résultat du quatrième étage par le simulateur Hysys.

Figure V-6: Schéma de l'installation après l'ajout d'une vanne de détente.

Figure V-7: Les paramètres de la vanne de détente.

Figure V-8: Les paramètres du premier étage après l'ajout de la vanne de détente.

Figure V-9: Le rendement du premier étage après l'ajout de la vanne de détente.

## *Introduction générale.*

Il existe une préoccupation croissante concernant les pertes d'éléments nutritifs des plantes dans l'environnement, de telles pertes sont dues à la lixiviation vers les eaux souterraines et aux émissions vers l'atmosphère. Les engrais minéraux sont une des sources d'éléments nutritifs des plantes utilisées dans les systèmes de production agricole. Les éléments nutritifs apportés au sol et que les cultures n'arrivent pas à intercepter constituent une perte financière pour l'exploitant agricole et une perte économique considérable au niveau national. Avec une demande de nourriture et de fibres prévue en augmentation, quoiqu'à un rythme ralenti, les exploitants agricoles appliqueront plus d'engrais tentant ainsi d'augmenter la production agricole. La mise en place des mesures d'atténuation se concentrera probablement sur les sources d'élément nutritif qui sont plus facile à régler, l'utilisation d'engrais minéraux étant une des principales cibles.

Vouloir réconcilier les buts suivants :

- Assurer un approvisionnement alimentaire suffisant.
- Obtenir une revenue agricole adéquate.
- Réduire l'incidence défavorable sur l'environnement de l'utilisation accrue d'engrais exige l'adoption de pratiques agricoles adaptées. L'adoption d'une fertilisation équilibrée serait une des mesures permettant d'obtenir des rendements plus importants sans entraîner une accélération des pertes d'azote dans l'environnement.

Compte de l'azote que l'on pouvait utiliser facilement comme engrais. Grâce à la synthèse de l'urée, le rendement des cultures a connu une croissance exponentielle qui se poursuivra encore pendant de nombreuses années.

Le présent travail consiste à démontrer le processus de fabrication de l'urée suivant le procédé Stamicarbon; démontrer les objectifs et les conditions opératoires pour la réalisation de chaque opération. Pour cela, nous avons réparti notre travail en V chapitres.

En premier lieu, on présente le complexe pétrochimique «SORFERT ALGERIE SPA» avec toutes ses unités de production et les utilités pour les besoins de l'usine. Dans le deuxième chapitre on donne un aperçu général sur les différents procédés de l'urée utilisés dans le monde. Dans le troisième chapitre on aborde toutes les réactions présentes dans la synthèse de l'urée.

Dans le quatrième chapitre on détaille les opérations dans chacune des sections de la chaîne de fabrication de l'urée (synthèse d'urée) depuis les matières premières jusqu'au stockage.

## *Introduction générale.*

Enfin et dans le cinquième chapitre on fait une étude de rendement du compresseur du CO<sub>2</sub> avec des calculs, de simulation et en donnant les recommandations requises pour augmenter ce rendement.

# *Chapitre I*

# Chapitre I : Présentation du complexe.

## **I-1-Introduction**

Par son tonnage produit dans le monde, l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est l'un des plus importants produit de synthèse et se situe au deuxième rang derrière l'acide sulfurique.

Quelque 87% de la production d'ammoniac est utilisée pour la fertilisation des sols, et de ce fait, la consommation d'ammoniac devrait suivre la croissance de la population de la planète.

Vu la richesse en gaz naturel l'Algérie a entrepris de développer davantage ses activités industrielles énergétiques en aval, dans le cadre de ce programme d'appui à la mise en valeur des ressources énergétiques et à la création d'emplois, un certain nombre de projets ont été lancés visant à réaliser de nouveaux sites pétrochimiques, l'un des principaux projets qui sont déjà en production est le mégaprojet d'ammoniac et d'urée SORFERT.

## **I-2-Généralités**

Le complexe de production d'engrais SORFERT créé le 10 juin 2007, est implanté à la zone industrielle d'Arzew sur une superficie 33,73 ha, c'est le fruit du partenariat entre ORASCOM Construction et Industries : 51% et SONATRACH : 49%, L'usine est alimentée par 2 milliards de mètres cubes/an de gaz naturel. Elle comporte des installations modernes, fiables et intégrées pour la production d'ammoniac (capacité nominale 2 x 2200 t/j) et d'urée granulée (capacité nominale de 3450 t/j) accompagnées des services et installations hors site nécessaires aux fins de l'installation. L'installation doit être conçue avec un taux de fonctionnement de 350 jours par an.

# Chapitre I : Présentation du complexe.

## I-3-L'organigramme :

Le complexe pétrochimique SORFERT est l'un des plus grand complexe dans le pays, et comme n'importe quelle société, il a une structure et une organisation du personnel, tel qu'il est montré dans l'organigramme suivant (Fig1):

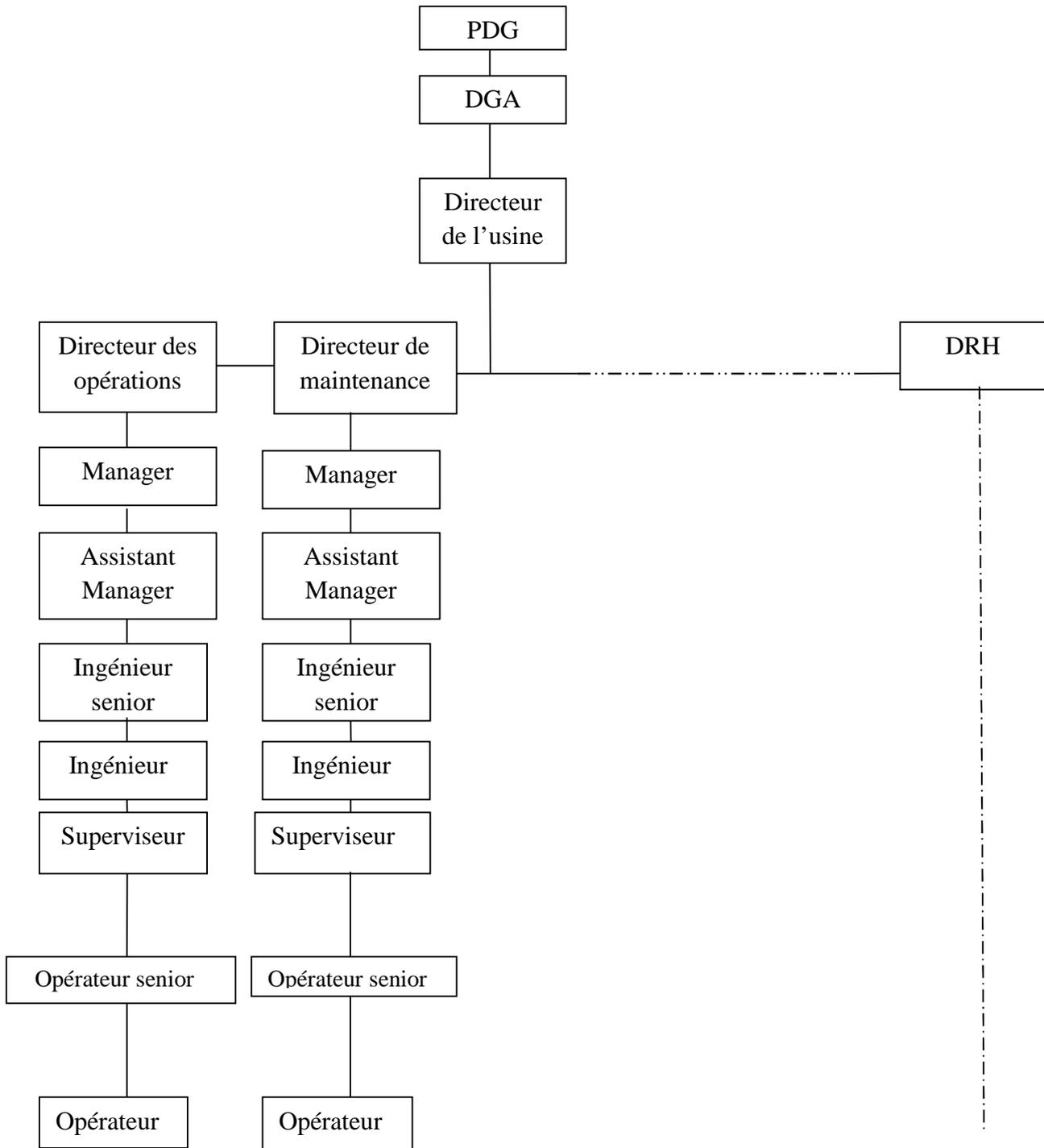


Figure I-1: Organigramme de l'usine.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### I-4-Matières premières et produits finis

#### I-4-1-Les matières premières

Les matières premières nécessaires aux complexes des Fertilisants de SORFERT sont:

##### ➤ Le gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile composé d'un mélange d'hydrocarbures présent naturellement dans des roches poreuses sous forme gazeuse.

Le gaz naturel utilisé provient de la zone R.T.O et son composition est montrée dans le tableau suivant :

Tableau I-1 : La composition du GN utilisé comme charge

| Composants du GN   |                    | Quantité |
|--------------------|--------------------|----------|
| Eau                | % mol              | 0        |
| Hélium             | % mol              | 0,18     |
| Azote              | % mol              | 5,57     |
| Dioxyde de carbone | % mol              | 0,22     |
| Méthane            | % mol              | 83,38    |
| Ethane             | % mol              | 7,68     |
| Propane            | % mol              | 1,99     |
| i-butane           | % mol              | 0,30     |
| n-butane           | % mol              | 0,45     |
| i-pentane          | % mol              | 0,09     |
| n-pentane          | % mol              | 0,10     |
| n-hexane           | % mol              | 0,04     |
| Mercure            | µg/Nm <sup>3</sup> | 50       |
| Soufre             | ppm                | <10      |

##### ➤ L'oxygène

L'oxygène est un élément nécessaire dans l'usine, il provient de l'air atmosphérique.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### ➤ L'azote (Nitrogène)

L'azote est un élément clé dans le procédé, et on l'obtient à partir de l'air atmosphérique.

### ➤ Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Le dioxyde de carbone, est à la fois un produit et aussi une matière première, on l'obtient du procédé d'ammoniac, et on l'utilise pour produire de l'urée.

### ➤ La vapeur d'eau

La vapeur d'eau est primordiale afin que le procédé se déroule, on l'utilise un peu partout dans le procédé et même dans les utilités, tel que la production d'électricité.

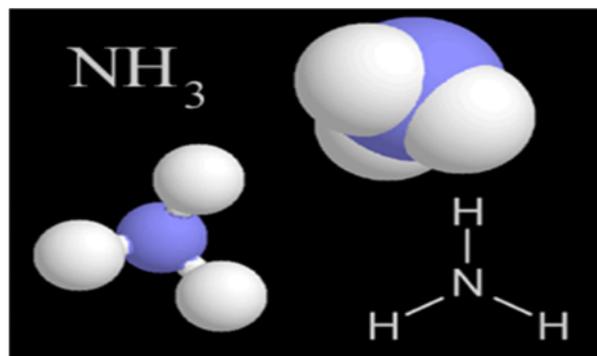
### I-4-2-Les produits finis

Les produits finis du Complexe des Fertilisants de SORFERT sont :

### ➤ L'ammoniac (NH<sub>3</sub>)

L'ammoniac est un composé chimique (Fig2), de formule NH<sub>3</sub> (groupe générique des nitrures d'hydrogène). Dans les conditions de température et de pression ordinaire, c'est un gaz. Celui-ci est produit industriellement en quantité gigantesque par le procédé Haber-Bosch à partir de diazote et de dihydrogène (c'est un des composés les plus synthétisés au monde). Il sert à la synthèse de nombreux autres composés dont ceux de fort tonnage utilisés comme engrais.

Ce gaz incolore est irritant, il possède une odeur piquante, il brûle les yeux et les poumons. Sur le plan chimique, c'est à la fois une base, un nucléophile, un ligand et un réducteur.



**Figure I-2: Représentation de la molécule de l'ammoniac en 3D.**

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### ➤ L'urée (CO (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)

L'urée ou carbamide est un composé organique de formule chimique CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (Fig3). C'est aussi le nom de la famille des dérivés de l'urée de formule générale (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>) N-CO-N (R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>).

La plus importante utilisation actuelle se fait sous la forme d'engrais azotés. L'urée est hydrolysée en ammoniac et en dioxyde de carbone dans le sol.

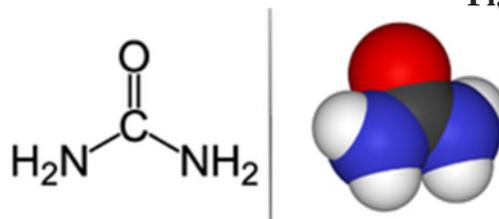


Figure 3 : Molécule d'urée

Figure I-3: Représentation de la molécule de l'urée en 3D.

### I-5-Implantations

Les installations suivantes se trouvent sur le site de l'unité :

- Unités ammoniac et urée.
- Services nécessaires pour exploiter les procédés.
- Stockage d'ammoniac.
- Stockage d'urée et chargement de l'urée sur les camions.

Les installations suivantes se trouvent au site portuaire :

- Stockage d'ammoniac (site portuaire),
- Chargement de l'ammoniac sur les navires (sur une jetée).

### I-6-Installations

Les installations de procédé comportent les unités de procédé ci-dessous ainsi que des services et installations hors site.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### **I-6-1-Unité de production d'ammoniac**

L'unité de production d'ammoniac comprend 02 trains complètement identiques, un train est composé de plusieurs sous-unités, chacune d'elles a un rôle bien précis dans le procédé.

Sachant que tout ce qui est compris dans le train 1 est désigné par le chiffre de centaines 1 et le chiffre 2 pour tout ce qui est compris dans le train 2 tel que : la sous-unité de conversion de CO est désignée par 104 pour le train 1 et par 204 pour le train 2, les sous-unités de l'unité de production d'ammoniac sont les suivantes :

#### ➤ **Unité 000**

C'est l'unité qui se trouve au début du procédé, elle est partagée par les deux trains et elle est chargée de l'élimination de l'hélium et du mercure.

#### ➤ **Unité 101, 201**

Comme toute autre unité c'est une unité très importante, elle est chargée de désulfurer et de compresser le gaz naturel

#### ➤ **Unité 102, 202**

Presque toutes les usines ont besoin de l'air comprimé, même si ce n'est pas pour le procédé on l'utilise dans le système de régulation comme air instruments.

Dans notre cas l'air est surtout utilisé comme matière première, pour cela cette unité est conçue, Pour compresser l'air industriel

#### ➤ **Unité 103, 203**

Cette unité parmi les unités clés du procédé, elle est chargée du reformage à la vapeur et la récupération de chaleur.

#### ➤ **Unité 104, 204**

C'est aussi une unité préparatrice du gaz de la synthèse, elle est chargée de convertir le monoxyde de carbone (CO) en CO<sub>2</sub>.

#### ➤ **Unité 105, 205**

Les quantités du dioxyde de carbone eu dans l'unité (104 et 204) et aussi le dioxyde de carbone qui existe bien avant dans le procédé, sont éliminées dans cette unité.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### ➤ **Unité 106, 206**

Dans cette unité on assure l'élimination totale de tout le monoxyde et le dioxyde de carbone par méthanisation.

### ➤ **Unité 107, 207**

Cette unité assure la compression du gaz de synthèse déjà préparé par les unités précédentes.

### ➤ **Unité 108, 208**

Toutes les unités précédentes ont pour but de préparer et de compresser le gaz de synthèse qui entre dans cette unité afin que l'ammoniac soit synthétisé, donc c'est l'unité de synthèse d'ammoniac.

### ➤ **Unité 109, 209**

C'est l'unité de réfrigération et elle est conçue afin d'assurer les trois objectifs :

- Refroidir l'ammoniac liquide aux conditions de stockage – 33°C.
- Séparation du gaz inerte dissous dans l'ammoniac.
- Provision de réfrigération requise dans les unités d'ammoniac et d'urée.

### ➤ **Unité 110, 210**

Des quantités assez importantes d'ammoniac se trouvent dans le gaz inerte obtenue dans le système de synthèse, C'est pour cela tout un système de récupération de l'ammoniac est conçu, et nommé l'unité (110,210).

### ➤ **Unité 111, 211**

La production de l'hydrogène est assez couteuse, ce qui fait que les pertes de ce dernier sont intolérables, pour cela l'unité (111,211) est conçue.

### ➤ **Unité 180, 280**

Cette unité est conçue pour faire un strippage à la vapeur MP aux condensats afin de les décomposées des produits indésirables.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### ➤ **Unité 182, 282**

Cette unité comprend le dégazeur qui prépare la vapeur, et aussi les pompes d'alimentation des chaudières.

### **I-6-2-Unité de production d'urée**

L'unité de production d'urée (Fig4) est conçue pour faire la combinaison entre l'ammoniac liquide et le dioxyde de carbone afin de produire de l'urée elle comprend les sous-unités suivantes :

### ➤ **Unité 020**

Sachant que le procédé d'urée est basé sur le dioxyde de carbone, cette unité est conçue afin de compresser le CO<sub>2</sub> nécessaire.

### ➤ **Unité 021**

Cette unité assure le pompage de l'ammoniac nécessaire dans la production d'urée.

### ➤ **Unité 022**

Cette unité représente presque tout le procédé de synthèse d'urée, c'est dans cette unité que la réaction de synthèse se déroule, ce qui fait elle est nommée l'unité de synthèse d'urée.

### ➤ **Unité 023**

Dans cette unité la majeure partie de l'ammoniac et du dioxyde de carbone non transformé sont récupérées. Elle est nommée l'unité de recirculation.

### ➤ **Unité 024**

Afin d'augmenter la concentration de l'urée synthétisée on procède à une évaporation, donc c'est l'unité d'évaporation.

### ➤ **Unité 027**

L'urée déjà synthétisé précédemment est sous forme liquide, dans cette unité on procède à une granulation, c'est pour cela qu'elle est nommée, l'unité de granulation.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### ➤ Unité 028

C'est une unité qui traite les condensats de procédé, afin d'avoir de faibles quantités de réactifs dans la phase liquide, c'est pour ça qu'elle est appelée unité de désorption et hydrolyse.

### ➤ Unité 029

Cette unité comprend tout le système de vapeur de l'unité et aussi celui de condensats et d'eau de refroidissement.



Figure I-4: Unité de production d'urée.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### **I-6-3-Services utilités et installations hors site (Offsites)**

#### ➤ **Unité 051**

C'est l'unité de stockage d'ammoniac de l'unité, sous forme liquide et à une température de - 32,6°C.

#### ➤ **Unité 052**

C'est l'unité de stockage du NH<sub>3</sub> au port, et c'est aussi utile s'il a un excédent de production d'ammoniac de l'unité, et même l'unité comprend la conduite de transfert d'ammoniac.

#### ➤ **Unité 056**

Vue l'ampleur du risque de l'industrie, cette unité est conçue afin d'assurer une intervention en cas ou un évènement fâcheux, c'est l'unité des douches de sécurité en eau potable.

#### ➤ **Unités 070,072 et 073**

Ces unités assurent le stockage d'urée d'export et de chargement par camions.

#### ➤ **Unité 083**

Pour couvrir les besoins en vapeur des unités de production, cette unité comprend 03 chaudières autonomes.

#### ➤ **Unité 084**

C'est une unité qui assure l'air service et l'air instrument.

#### ➤ **Unité 085**

L'usine est alimentée par l'électricité par elle-même et pour cela cette unité de production d'énergie électrique est conçue.

#### ➤ **Unité 086**

L'usine a besoin d'azote pour plusieurs utilisations pour cela cette unité est conçue et nommée unité d'azote.

#### ➤ **Unité 087**

L'eau de mer est utilisée pour refroidir, et cette unité est chargée de cette tâche.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### ➤ **Unité 088**

Deux circuits indépendants de refroidissement en boucle fermée alimentent en eau de refroidissement la totalité du complexe SORFERT.

### ➤ **Unité 089**

C'est tout un système de dessalement de l'eau de mer par Osmose Inverse.

### ➤ **Unité 090**

Les unités de production ont besoin de l'eau polishée (deminéralisée), pour cette raison cette unité est conçu, et nommée l'unité de déminéralisation.

### ➤ **Unité 091**

C'est tout un réseau d'eau anti-incendie, il alimente toutes les conduites d'incendie, les bouches d'incendie ... etc.

### ➤ **Unité 097**

L'eau de mer utilisée dans les unités précédentes a une unité de prise d'eau de mer.

### **I-6-4-Autres installations**

Autres installations existent dans l'usine tel que :

- L'unité 040      Système d'analyse
- L'unité 060      Système d'automatisation et de contrôle
- L'unité 061      Système de communication
- L'unité 063      Système d'alarme incendie et détection des gaz
- L'unité 095      Climatisation
- L'unité 096      Tuyauterie d'interconnexion
- L'unité 098      Réseau de routes de l'unité

# Chapitre I : Présentation du complexe.

## I-7-Description générale du procédé

### I-7-1-Unité prétraitement

Le gaz naturel est prétraité avant son introduction aux unités de production, il est débarrassé du mercure, du soufre et de l'Hélium.

### I-7-2-Unité d'ammoniac (Procédé Uhde)

Le complexe d'ammoniac et d'urée de SORFERT dispose de deux unités identiques de production d'ammoniac selon le procédé Uhde d'une capacité de 2200 t/j chacune.

Chaque unité comprend les sections suivantes :

#### I-7-2-1-Section reforming

Le GN est alors désulfuré avant de procéder à son reformage à la vapeur (Fig 5) en deux phases (primaire et secondaire) :

1ere : Reformage à la vapeur

2eme : Reformage en présence d'air atmosphérique.

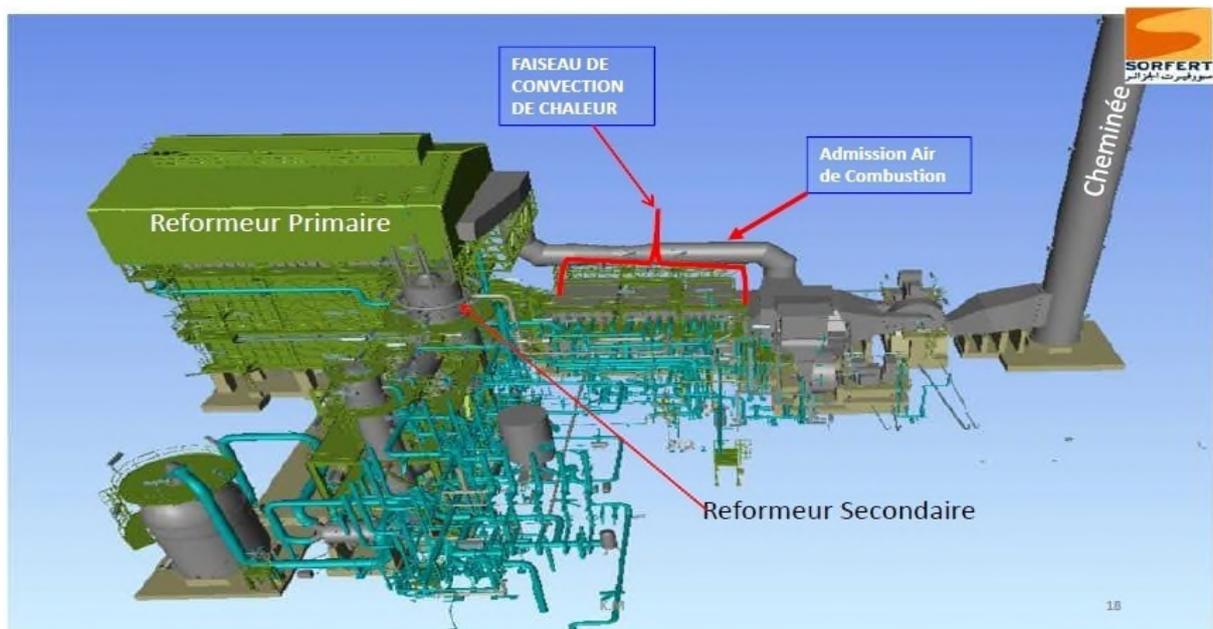


Figure I-5: Section de reformage.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

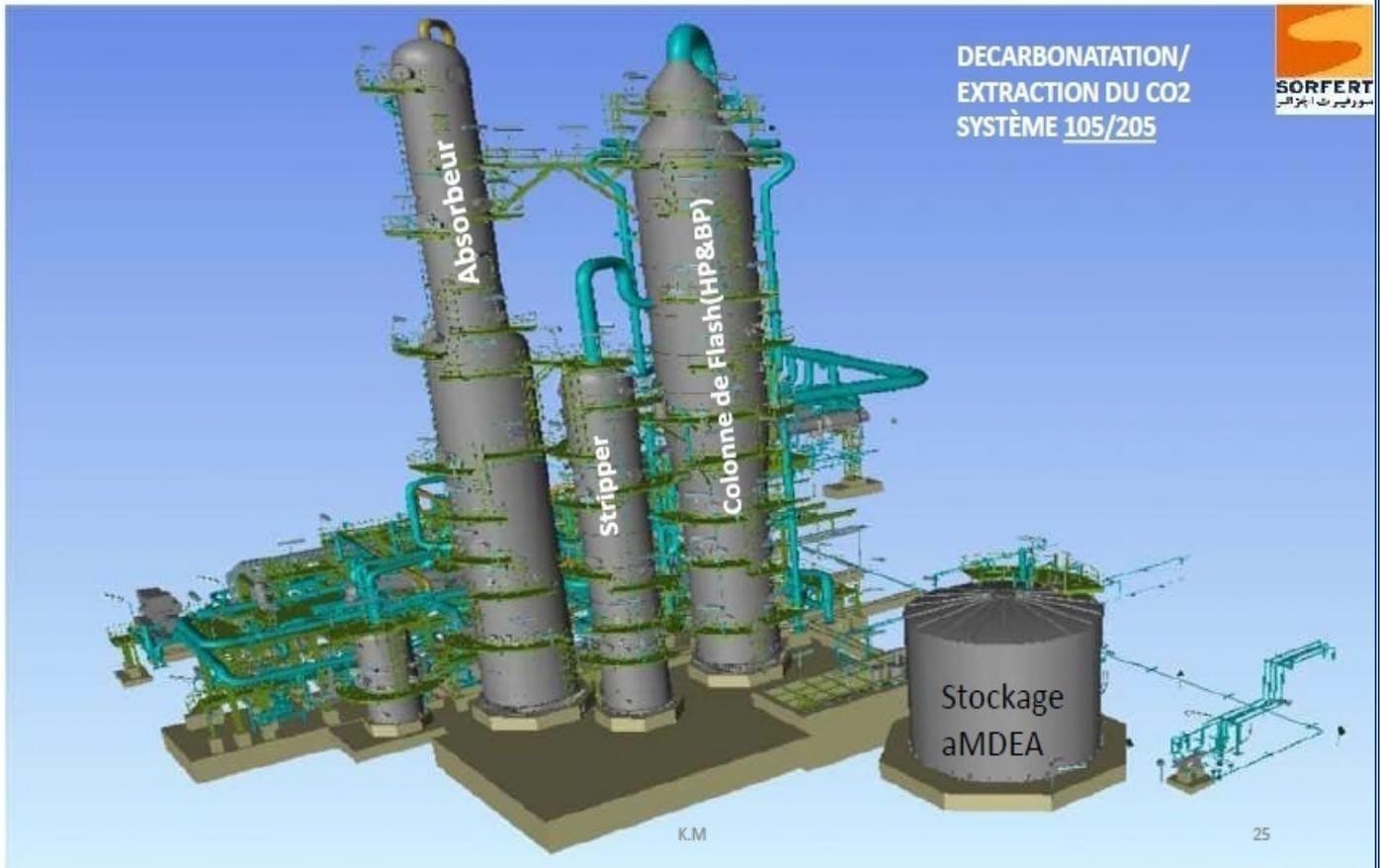
### **I-7-2-2-Section de la conversion du CO**

Le but de cette section est de convertir le CO qui existe dans le gaz de synthèse en CO<sub>2</sub> afin de l'extraire dans la section suivante.

### **I-7-2-3-Section de décarbonatation**

Cette section (Fig6) a pour but d'enlever le dioxyde de carbone existant dans le gaz de synthèse, elle est divisée en deux sections :

- a. Section de lavage des gaz convertis par une solution d'MDEA, l'objectif étant de débarrasser les gaz du CO<sub>2</sub> contenu.
- b. Régénération de la solution MDEA.



**Figure I-6: Unité de décarbonatation.**

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### **I-7-2-4-Section de méthanisation**

La conversion du CO en CO<sub>2</sub> et la décarbonatation, les deux opérations ne sont pas efficaces à 100%, des quantités de CO et de CO<sub>2</sub> demeurent dans le gaz de synthèse, Le but de la section méthanisation est de transformer les quantités restantes de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en méthane (CH<sub>4</sub>).

### **I-7-2-5-Section de compression de synthèse**

Les gaz de synthèse ainsi obtenus sont portés à une pression de 210 bars pour être convertis dans deux réacteurs en présence d'un catalyseur à base de fer.

### **I-7-2-6-Section réfrigération**

L'ammoniac produit chaud est réfrigéré dans cette section pour être liquéfié à une température de -33°C à pression atmosphérique.

L'ammoniac produit est dirigé vers un des bacs de stockage et puis exporté par des bateaux au port de Bethioua.

### **I-7-2-7-Transfert, stockage et chargement d'ammoniac**

Sur le site de production, l'ammoniac est stocké sous forme liquide à -33°C dans un réservoir tampon double enveloppe de 15 000 tonnes de capacité.

L'ammoniac liquide, non consommé par l'unité de production d'urée, est transféré du stockage tampon de l'usine de production vers les stockages portuaires via un pipe de 8 km de long installé dans le corridor technique et entièrement soudé.

L'ammoniac est stocké sur la zone portuaire sous forme liquide à -33°C dans deux réservoirs double enveloppe de 30 000 tonnes de capacité.

Une unité de réfrigération assure la condensation de la phase vapeur issue des réservoirs. Pour chaque réservoir, une 1ère soupape de sécurité reliée à la torche assure le maintien en pression du réservoir. Une deuxième soupape de sécurité est reliée à l'atmosphère.

Le chargement dans les bateaux se fait au niveau de la jetée Bethioua par les pompes de chargement. Le boil off gaz des bateaux est recyclé dans le réservoir de stockage.

# Chapitre I : Présentation du complexe.

## I-7-3-Unité d'urée (Stamicarbon- Uhde)

Les réactifs ( $\text{NH}_3$  et  $\text{CO}_2$ ), purifiés pour en éliminer l'oxyde de carbone( $\text{CO}$ ) et l'humidité, sont comprimés séparément, puis introduits dans le réacteur. La formation du carbamate y est très rapide. Le réacteur fonctionne adiabatiquement et on doit exercer un contrôle sévère de la température au-dessus de  $200^\circ\text{C}$ .

L'effluent du réacteur, consistant en urée, carbamate d'ammoniac et des réactifs non convertis, est soumis par modification des conditions opératoires à une décomposition qui transforme une partie du carbamate d'ammoniac en gaz carbonique et ammoniac. L'ensemble de cette opération est répété afin de décomposer la totalité du carbamate. On obtient alors une solution d'urée qui par un traitement de finition est amenée à la pureté finale que l'on désire.

L'urée ainsi obtenu est granulé au sein d'une section de granulation puis dirigé vers un hangar d'urée en vrac et depuis transporté par camions vers le port d'Arzew.

La conception de base de l'Unité de l'urée (Fig7) a été réalisée par Stamicarbon filiale de DSM (Netherlands), pour les systèmes 021, 022, 023, 024, 028, 029 et par Uhde Fertilizer Technology B.V (UFT) (Allemagne), pour le système 027 (Granulation).

L'unité opère avec du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{NH}_3$  provenant du procédé de production et de tous les systèmes de compression et de pompage dans un seul flux avec une capacité de 3450 tonnes/jour résultant en un seul produit fini qu'est l'Urée Granulée.

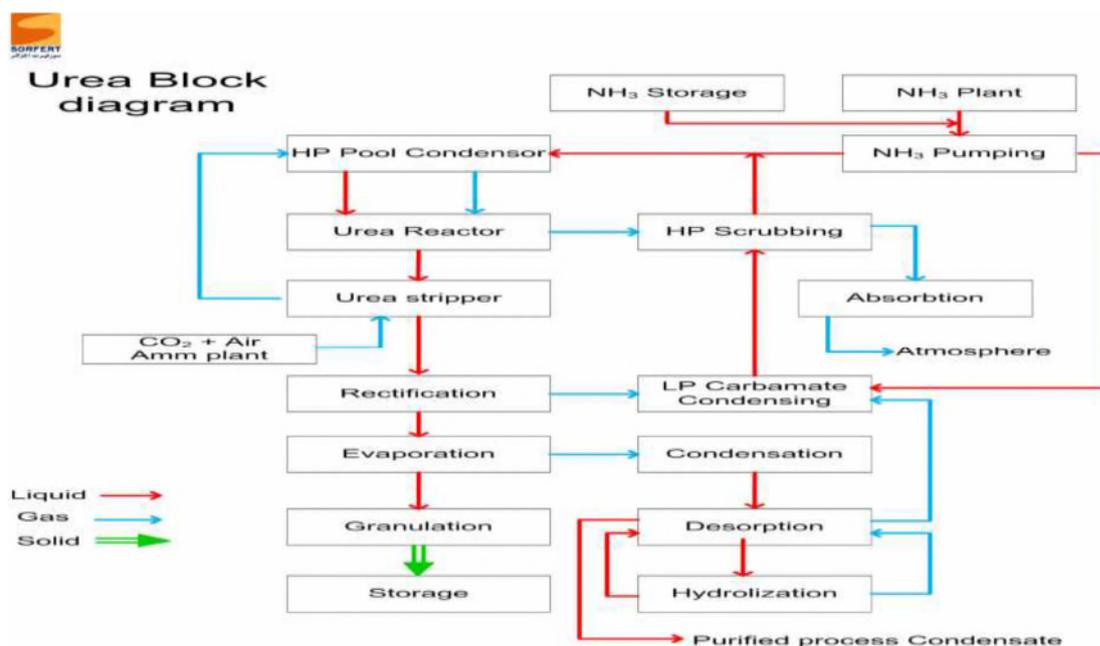


Figure I-7: Schéma résumant le procédé de la synthèse d'urée.

## Chapitre I : Présentation du complexe.

### **I-7-4-Centrale utilités**

Cette centrale est dimensionnée pour assurer les utilités nécessaires aux unités d'ammoniac et d'urée, elle se compose de :

- a- Une prise d'eau de mer située à 550 m du rivage : 02 filtres Tapproge
- b- Une pomperie eau de mer : 04 pompes de 2700 m<sup>3</sup>/h chacune.
- c- Dessalement d'eau de mer :
  - Une unité d'eau de dessalement Osmose inverse d'une capacité de 3 x 17 t/h.
  - Trois unités de distillation d'eau de mer de type thermo – compression assurant ce service leur capacité est de 3 x 100 t /j.
- d- Deux tours de refroidissement d'eau de mer semi-ouvertes de capacité globale de 53000m<sup>3</sup>/h.
- e- Boucles d'eau polyshée : refroidissement à l'eau de mer par échangeurs à plaques.
- f- Chaudières auxiliaires : 03 chaudières d'une capacité de 3 x 143 t/h.
- g- Production d'air instrument : 04 compresseurs d'une capacité de : 4 x 1200 m<sup>3</sup>/h.
- h- Production d'eau traités / polyshée / dégazée : production d'eau déminéralisée.  
Capacité=1200m<sup>3</sup>/h.
- i- Production d'azote : installation autonome de production d'azote.
- j- Production d'électricité : Deux turbogénérateurs générant une puissance de 2 x 49 MW.

# *Chapitre II*

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

### **II-1-Introduction**

L'urée naturelle est découverte en 1773 par Hilaire Rouelle. Formée dans le foie lors du cycle de l'urée, à partir de l'ammoniac qui provient de la dégradation terminale de trois acides aminés : l'arginine, la citrulline et l'ornithine, l'urée naturelle est éliminée par l'urine. La dégradation de tous les autres acides aminés de l'organisme aboutissent, directement ou indirectement, aux trois précédemment cités.

En 1828, le jeune chimiste allemand Friedrich Wöhler (1800-1882) réussit à obtenir de l'urée, une molécule « organique », terme qui, à l'époque, définissait une molécule produite par le monde vivant (ici, le monde animal). Pour cela, il utilise un composé minéral, le cyanate de plomb, de l'ammoniac et de l'eau.

Les procédés de fabrication n'ont pas subi de grands changements depuis 1990, les objectifs principaux des améliorations apportées restant toujours la réduction de la consommation énergétique, la réduction de la pollution et l'optimisation des coûts d'investissement.

### **II-2- Caractéristiques générales**

Les diverses réalisations industrielles peuvent être réparties en cinq groupes :

#### **II-1-1) Les procédés sans recyclage**

Ce sont les versions les plus anciennes, dans lesquelles la décomposition du carbamate d'ammonium se fait par simple détente ; l'ammoniac et le gaz carbonique gazeux qui en résultent sont envoyés à d'autres unités (acide urique, sulfate d'ammonium, nitrate d'ammonium, etc.).

Ce type d'installation a été abandonné avec l'augmentation des capacités et par suite des débouchés nécessaires pour les sous-produits.

#### **II-1-2) Les procédés à recyclage partiel**

Les gaz de décomposition sont partiellement recyclés au réacteur, sous forme d'ammoniac liquide et de carbamate d'ammonium. Parfois on ne recycle que l'ammoniac.

Ces gaz sont condensés dans une tour de lavage et se recombinent pour donner du carbamate. La chaleur de réaction entraîne l'évaporation de l'ammoniac en excès que l'on recondense.

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

Ces recyclages liquides entraînent des phénomènes de corrosion intense.

### **II-1-3) Les procédés à recyclage total**

La décomposition du carbamate s'effectue en deux étapes ainsi qu'il a déjà été mentionné. Le recyclage de l'excès d'ammoniac (ou du gaz carbonique) est réalisé sous forme gazeuse. Ces procédés ont l'inconvénient d'entraîner des frais élevés de recompression. Une amélioration a été apportée par l'introduction des compresseurs centrifuges (allied, stamicarbon I, Montecatini, snam I, chemico, Mitsui toatsu, etc.).

### **II-1-4) Les procédés avec stripping**

La décomposition du carbamate a lieu à la pression de synthèse, par diminution de sa pression partielle à l'aide d'un stripping au gaz carbonique (Stamicarbon II) ou à l'ammoniac (Snam II).

La recombinaison a lieu à haute température. la consommation globale d'énergie s'en trouve réduite.

### **II-1-5) Les procédés intégrés**

Cette version, développée par Mitsui Toatsu, intègre les unités de fabrication d'ammoniac et d'urée. Elle permet d'éliminer en particulier les frais de compression du gaz carbonique qui est alors absorbé directement sur l'unité d'ammoniac par une solution de carbamate et d'ammoniac.

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

### II-3- Les procédés et leurs caractéristiques

Les caractéristiques des principaux procédés sont rassemblées dans le tableau

Tableau II-I : caractéristiques principales des procédés de l'urée.

| Procédés            | Réacteur de synthèse |                  |                               |  | Réacteur de décomposition |                  |
|---------------------|----------------------|------------------|-------------------------------|--|---------------------------|------------------|
|                     | Pression (bar)       | Température (°C) | Conversion du CO <sub>2</sub> | Rapport NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub> | Pression (bar)            | Température (°C) |
| Stamicarbon I       | 180-200              | 175-180          | -                             | 4,5                                      | 20 et 1 à 2               | 90-100           |
| Stamicarbon II      | 130                  | 180-190          | 50-60                         | 2,8                                      | 135* et 2                 | 160              |
| Snam I              | 200-250              | -                | -                             | -  | 180                       | 160              |
| Snam II             | 120-140              | 180-185          | 60                            | 3,5                                      | 120                       | 160              |
| Chemico I           | 230                  | 185              | 70                            | 4  | 21 et 2                   | -                |
| Chemico II          | 210                  | 185              | -                             | -  | 70,14 et 1                | -                |
| Mitsui Taotsu I     | 230-250              | 190-200          | 50-60                         | 3,5                                      | 20 et 2                   | -                |
| Montecatini-Fausser | 175-190              | 175-180          | -                             | -  | 20 et 2                   | -                |
| Péchiney-Grace      | 270                  | -                | -                             | -  | 4 à 5                     | -                |
| Lonza-Lumms         | 225-230              | 180-210          | 74                            | 4-4,5                                    | 20 et 1                   | -                |
| CPI-Allied Chemical | 280                  | 190-230          | 80-85                         | 4-5                                      | -                         | -                |

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

Les autres particularités des versions récentes sont les suivantes :

### **II-3-1- Procédés Stamicarbon (D.S.M)**

Le procédé Stamicarbon **I** est une technique à recyclage total classique. Son originalité consiste en l'introduction de petites quantités d'oxygène dans le réacteur afin de diminuer la corrosion.

Le procédé Stamicarbon **II**, qui lui a succédé, utilise le stripping au gaz carbonique. Il est employé dans une quinzaine d'unités, représentant plus de  $2,8 \times 10^6$  t/an de capacité (fig.1).

La section de réaction comprend trois appareillages essentiels :

Le réacteur, le stripper et le condenseur haut pression. Dans le réacteur, on ajuste le rapport  $\text{NH}_3/\text{CO}_2$  à 2,8 en ajoutant aux gaz issus du condenseur, dont le rapport  $\text{NH}_3/\text{CO}_2$  optimal est de 2,4, la quantité d'ammoniac nécessaire. Le temps de séjour pour la synthèse est de 45 à 65 mn. L'eau qui est recyclée avec le carbamate intervient dans un rapport  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$  de 0,3-0,4. Dans le stripper on traite l'effluent du réacteur, avec la charge de  $\text{CO}_2$ , dans un échangeur tubulaire vertical avec passage de vapeur coté calandre.

A la sortie du stripper, la solution d'urée est détendus à 2 – 5 bars, débarrassés de l'ammoniac, du gaz carbonique résiduaire et d'une partie de l'eau ; ces produits sont refroidis et renvoyés au condenseur haut pression.

La solution d'urée est ensuite soumise aux traitements de finition.

La chaleur de formation du carbamate lors de sa synthèse dans le réacteur et lors de la recombinaison dans le condenseur permet de produire de la vapeur basse pression.

Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

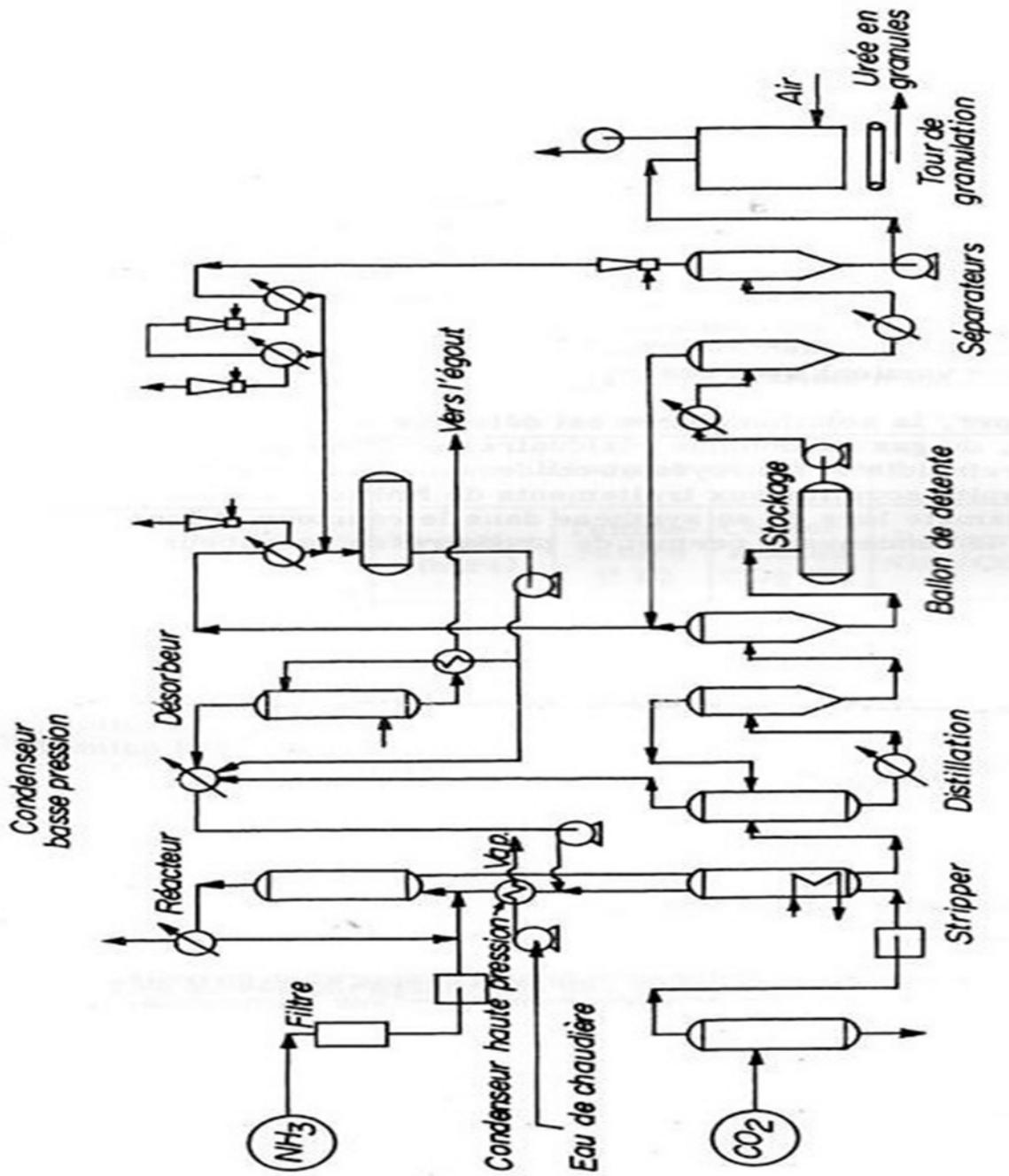


Figure II-1: Procédé Stamicarbon D.S.M avec stripping au gaz carbonique.

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

### **II-3-2-Les procédés Snamprogetti**

La synthèse de l'urée développée par Snam met en œuvre le stripping à haute pression du carbamate d'ammonium par l'ammoniac. On retrouve les trois éléments importants : réacteur, stripper et condenseur, du procédé stamicarbon.

Le recyclage de la solution de carbamate du condenseur au réacteur peut être réalisé de diverses manières selon la pression d'opération ; à l'aide d'une pompe, si l'on opère de façon classique à 200-250 bar (procédés Snam I), ou par gravité lorsque la synthèse a lieu sous 120 à 140 bar (procédé Snam II). Dans les plus récentes de cette seconde variante on utilise un éjecteur à ammoniac liquide pour effectuer la recirculation du carbamate.

La solution d'urée à la sortie du stripper subit une évaporation en trois étapes sous pression décroissantes afin de récupérer au mieux l'ammoniac et le gaz carbonique résiduaire qui sont alors condensés et absorbés puis renvoyés au condenseur haute pression.

Quatre unités d'une capacité globale de 750 000 t/an fonctionnent selon cette technique.

Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

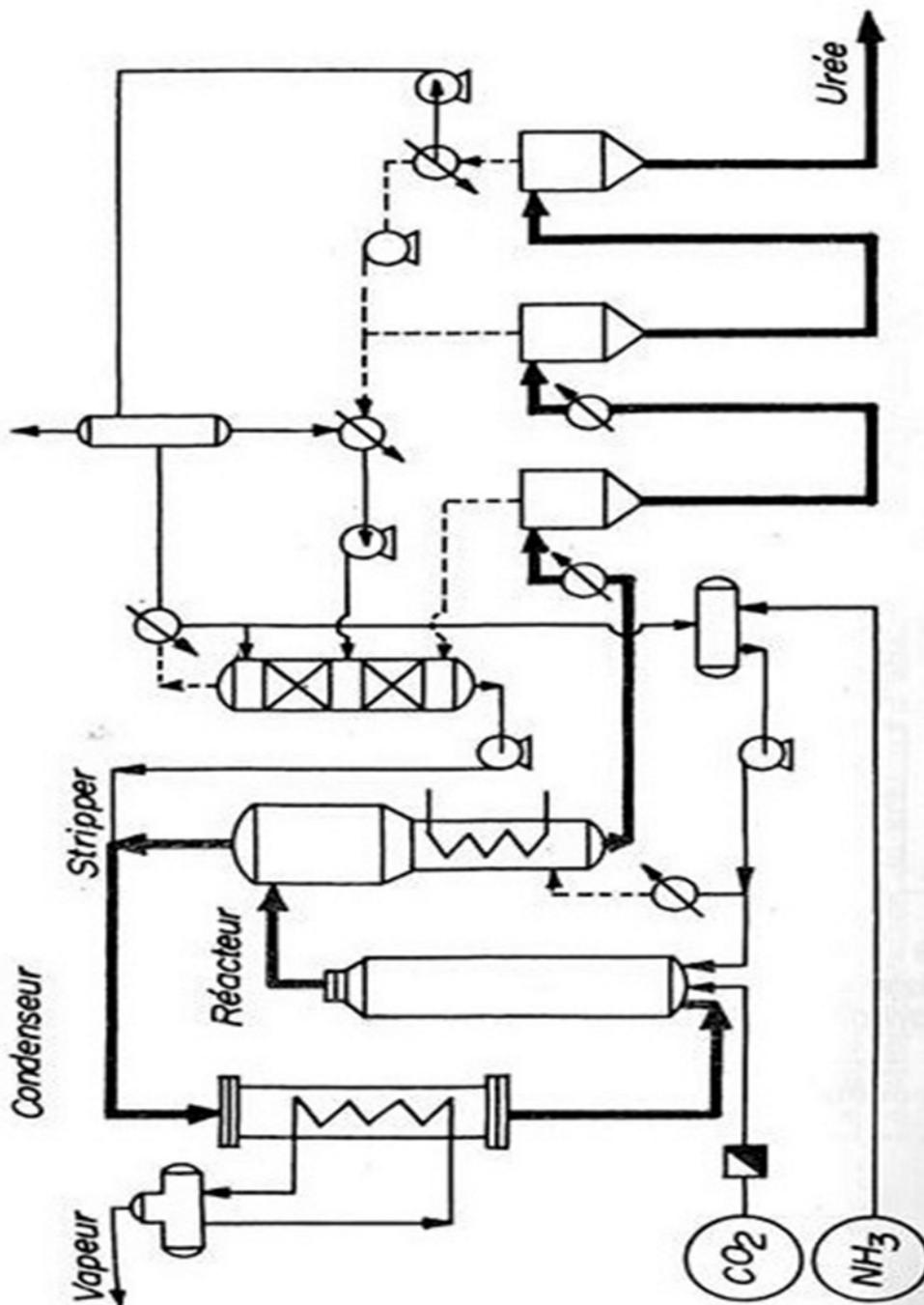


Figure II-2: Procédé Snamprogetti avec stripping à l'ammoniac.

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

### II-3-3- Les procédés Chemico (Chemical Construction Corp.)

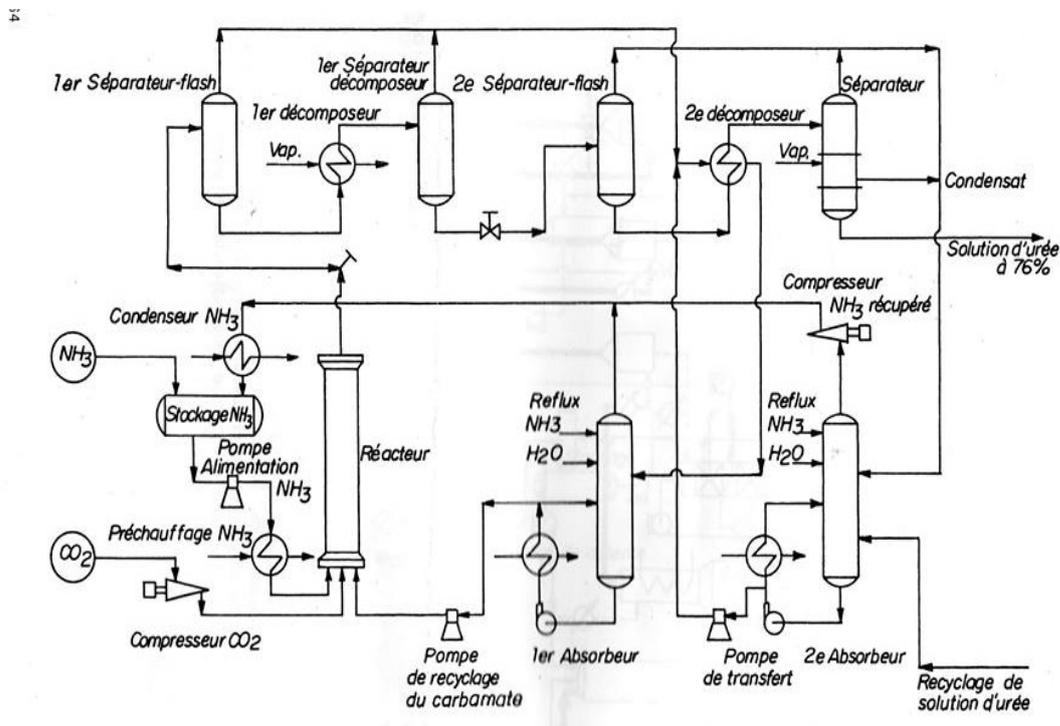
Chemico a développé deux techniques à recyclage total :

- Un procédé à recirculations liquides (variantes I)
- Le procédé « thermo urea » (variante II) qui recycle les produits à l'état gazeux au moyen de compresseurs centrifuges ; cette méthode n'a pas encore donné lieu à une réalisation industrielle.

Dans la variante I (fig. 3) ; l'effluent du réacteur est d'abord détendu à 29 bar ; le liquide restant est décomposé thermiquement puis à nouveau détendu sous 2 bar.

Les gaz issus de chacun de ces étages de détente sont absorbés dans une solution de carbamate dans deux absorbeurs comportant un reflux d'eau et d'ammoniac.

La solution est recyclée à l'aide de pompes.



**Figure II-3: Procédé Chemico à recyclage total.**

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

Dans la variante II la décomposition se fait en trois étages de détente (70, 14 à 28 et 1 à 2 bars)

Les gaz produits sont partiellement entre comprimés à 70 bars, puis globalement à 210 bars, sans refroidissement ; l'addition d'ammoniac froid permet alors d'obtenir la température de synthèse.

On évite ainsi le préchauffage des gaz et l'eau nécessaire à la condensation du carbamate.

Plus de 20 unités d'une capacité globale de près de  $2 \times 10^6$  t/an utilisent la variante I de ce procédé.

### **II-3-4-Les procédés Mitsui Toatsu**

Il existe également deux procédés Mitsui Toatsu :

- L'un à recyclage total, assez semblable au Chemico I, qui utilise des trains de décomposition et d'absorption en deux étages. Sa caractéristique est d'assurer une recirculation d'eau minimale en évitant au mieux son évaporation lors des étapes de décomposition
- L'autre assure l'intégration des unités de production d'ammoniac et d'urée. Les avantages en sont :
  - L'élimination des dépenses de compression du CO<sub>2</sub> qui provient directement de la préparation du gaz de synthèse de l'ammoniac.
  - la mise en œuvre directe de l'ammoniac.
  - la simplification du schéma d'absorption du CO<sub>2</sub> dans l'unité de fabrication de l'ammoniac, puisque la section de régénération de l'absorbant disparaît.

53 unités d'une capacité globale de  $9.3 \times 10^6$  t/an environ emploient la technique Mitsui Toatsu.

## Chapitre II : Les différents procédés et leurs caractéristiques.

### **II-3-5-Les autres procédés à recyclage total**

#### **II-3-5-1-Le procédé Montecatini-Fausser**

Plusieurs variantes de ce procédé ont été développées :

Les unes portent sur le recyclage d'une solution aqueuse de carbamate ou de cristaux de carbamate en suspension dans l'ammoniac anhydre, les autres sur recirculations du gaz carbonique et de l'ammoniac séparés ou associés sous forme de carbamate.

#### **II-3-5-2-Le procédé Péchiney Grace**

La synthèse a lieu en présence d'une huile neutre dont la fonction est triple. Elle diminue la corrosivité du milieu, sert à la fois de fluide caloporteur et de véhicule des cristaux de carbamate à recycler. Les calories emmagasinées par cette huile lors de la formation du carbamate sont restituées partiellement lors de sa décomposition.

#### **II-3-5-3-Le procédés Lonza-lumms**

Sa particularité est d'absorber le CO<sub>2</sub> dans une solution ammoniacale pour donner du carbamate que l'on recycle.

#### **II-3-5-4-Le procédé CPI-allied Chemical (vulcan-cincinnati)**

Le gaz carbonique, contenu dans les gaz de décomposition du carbamate, est absorbé sélectivement à l'aide de monoéthanolamine.

Seul l'ammoniac est recyclé. Le réacteur par ailleurs est revêtu de zirconium.

23 unités utilisent la technique CPI-allied Chemical.

### **II-4-Conclusion**

Les procédés Stamicarbon et Snamprogetti sont les plus utilisés dans les unités de la synthèse de l'urée dans le monde, ce sont des procédés à recyclage total, la différence entre ces deux procédés se montre dans le décomposeur de synthèse ; la décomposition de l'urée pour Stamicarbon se fait par le CO<sub>2</sub>, et elle se fait par l'ammoniac pour Snampregetti.

# *Chapitre III*

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### III-1-Introduction

L'urée reste l'engrais azoté solide d'usage commun ayant la plus forte teneur en azote, présentant ainsi les plus faibles coûts de transport par unité d'azote nutritif. Cette qualité ainsi que son aptitude à la fertilisation en zone humide pour la culture du riz en font l'un des engrais azotés les plus utilisés, avec une demande en forte croissance dans les pays du Sud-Est asiatique.

L'urée est synthétisée à partir de l'ammoniac et du dioxyde de carbone. Sa production est pratiquement toujours associée à la production d'ammoniac, et par là même à la production des hydrocarbures, plus particulièrement du gaz naturel.

### III-2-L'urée

#### III-2-1-Définition

L'urée ou carbamide est un composé organique de formule chimique  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ . C'est aussi le nom de la famille des dérivés de l'urée de formule générale  $(\text{R}_1, \text{R}_2) \text{N-CO-N} (\text{R}_3, \text{R}_4)$ .

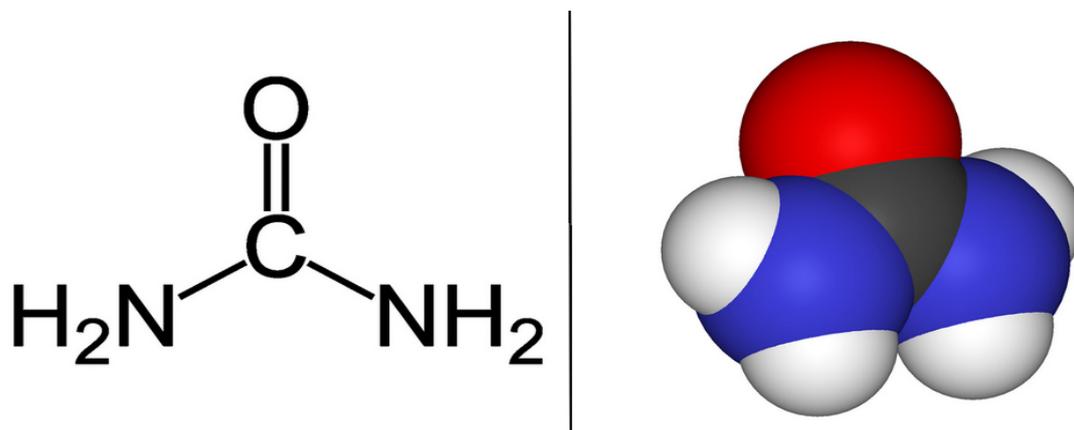


Figure III-1: Représentation de la molécule de l'urée en 2D et 3D.

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### III-2-2-Propriétés de l'urée

#### III-2-2-1-Propriétés chimiques

| Propriétés chimiques |   |
|----------------------|---|
| <u>Formule brute</u> | $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$   |
| <u>Masse molaire</u> | $60,0553 \pm 0,0018 \text{ g/mol}$<br>C 20 %, H 6,71 %, N 46,65 %, O 26,64 %, |

#### III-2-2-2-Propriétés physiques

| Propriétés physiques   |   |
|------------------------|---|
| <u>T° fusion</u>       | 132,7 à 135 °C <sup>1</sup>   |
| <u>Solubilité</u>      | 670 g·l <sup>-1</sup> (eau, 0 °C),<br>1 080 g·l <sup>-1</sup> (eau, 20 °C)<br>1 360 g·l <sup>-1</sup> (eau, 30 °C)<br>1 670 g·l <sup>-1</sup> (eau, 40 °C)<br>2 460 g·l <sup>-1</sup> (eau, 60 °C)<br>4 000 g·l <sup>-1</sup> (eau, 80 °C)<br>5 080 g·l <sup>-1</sup> (eau, 90 °C)<br>7 330 g·l <sup>-1</sup> (eau, 100 °C) |
| <u>Masse volumique</u> | 0,750 g·cm <sup>-3</sup> (liquide)<br>1,335 g·cm <sup>-3</sup> (solide)   |

#### III-2-2-3-Propriétés thermochimiques

| Propriétés thermochimiques     |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| $S^0_{\text{solide}}$          | 104 J/mol.K          |
| $\Delta_f H^0_{\text{solide}}$ | -333 kJ/mol          |
| $C_p$                          | 93 J/mol.K (à 298 K) |

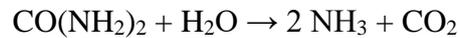
## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### **III-2-3-Utilisation**

#### **III-2-3-1-Engrais**

La plus importante utilisation actuelle se fait sous la forme d'engrais azotés.

L'urée est hydrolysée en ammoniac et en dioxyde de carbone dans le sol



L'urée, qui contient 46 % d'azote, ne pourrait être utilisée comme engrais en raison de son caractère hygroscopique élevé. La présentation en granulés ou perles de calibre homogène est nécessaire pour la régularité de l'épandage.

Sur le plan agronomique, c'est une formulation intéressante car sa minéralisation est progressive. L'urée a tendance à acidifier les sols. On l'utilise généralement en couverture sur des cultures d'été.

#### **III-2-3-2-Alimentation animale**

L'urée (qualité alimentaire) est employée dans l'alimentation des ruminants. En effet, les micro-organismes présents dans le rumen sont capables d'utiliser cette source d'azote pour synthétiser des acides aminés utilisables par le ruminant.

#### **III-2-3-3-Matières plastiques**

L'urée est utilisée en chimie industrielle pour la synthèse de plastiques thermodurcissables, les « résines urée-formol »

#### **III-2-3-4-Biochimie**

En biochimie, l'urée est utilisée en solution aqueuse à forte concentration (4 à 8 mol.L<sup>-1</sup>) comme agent dénaturant pour détruire la structure spatiale des acides nucléiques et des protéines.

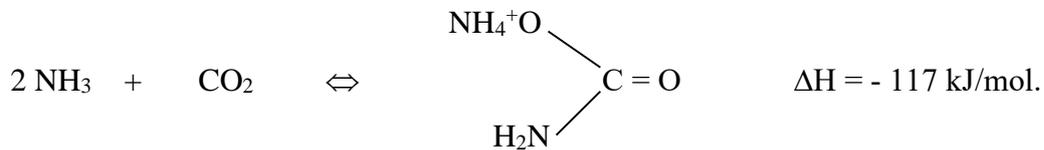
#### **III-2-3-5-Additif alimentaire**

L'urée est utilisée dans l'alimentation comme additif alimentaire comme agent améliorant.

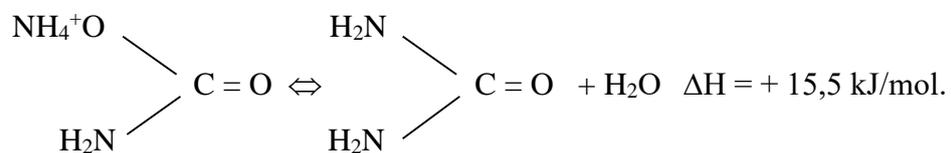
## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### III-3-La réaction principale dans le procédé de l'urée

La production d'urée a lieu à partir d'une réaction en deux temps. L'ammoniac et le dioxyde de carbone réagissent pour former du carbamate d'ammonium :



Cette réaction fortement exothermique atteint très rapidement un équilibre. Il sera par la suite fait mention de l'équilibre du carbamate pour évoquer le système de réaction présenté ci-dessus. En phase liquide, le carbamate d'ammonium est ensuite déshydraté en urée et en eau :



Cette réaction d'équilibre endothermique est plutôt lente en comparaison à la première réaction, le système sera par la suite appelé l'équilibre de l'urée.

L'ammoniac et le dioxyde de carbone doivent être mis en contact dans un dispositif capable d'éliminer de gros volumes de chaleur de réaction : le condenseur de synthèse (Pool condenser).

Dans le condenseur de synthèse, non seulement la chaleur est éliminée, mais le dispositif est dimensionné de telle manière que le temps de séjour est suffisant pour exécuter également une grande partie de la seconde réaction plus lente de déshydratation.

La solution urée / carbamate est acheminée vers le réacteur d'urée, relativement petit, depuis ce condenseur de synthèse, le second équilibre est établi.

En partant du fait que la réaction de déshydratation n'arrive pas à son terme, les réactifs non convertis doivent être éliminés de la solution du réacteur. La façon dont cela ce produit caractérise la plupart des procédés de fabrication d'urée.

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

Les pressions et températures du processus sont influencées par :

- Les compositions du gaz et du liquide .
- Le comportement des phases du mélange des quatre composants (ammoniac, dioxyde de carbone, eau et urée).
- Le pourcentage inerte.
- La consommation d'utilités désirée ou la production de vapeur de l'unité.

### **III-4-Procédé de décomposition au CO<sub>2</sub> Stamicarbon**

Dans le procédé de décomposition au CO<sub>2</sub> Stamicarbon, tous les réactifs non convertis sont renvoyés vers le réacteur. Une majeure partie des réactifs est éliminée du réacteur dans le décomposeur, à la pression de synthèse, en mettant en contact la solution à contre-courant avec le dioxyde de carbone. La chaleur de la réaction est obtenue par chauffage externe des tubes du décomposeur (échangeur de chaleur HP). En raison du temps de séjour réduit dans le décomposeur (échangeur de chaleur HP) et de la température relativement basse, la décomposition de l'urée est évitée, de telle sorte que l'hydrolyse de l'urée ne sorte pas des tolérances.

La solution du réacteur décomposée est détendue à une pression beaucoup plus basse (environ 4,1 bars) durant la phase de recirculation, et elle est soumise à l'élimination de l'ammoniac et du dioxyde de carbone résiduels. Les réactifs sont dissouts dans les condensats du procédé, puis ils sont repompés vers la section de synthèse.

### **III-5-Comportement des phases de la réaction dans le système de la production de l'urée**

Afin de bien comprendre le processus, il est essentiel de connaître le comportement des phases du mélange contenant de l'ammoniac, du dioxyde de carbone, de l'urée et de l'eau.

Le comportement des mélanges, selon les propriétés de leurs composants, sera expliqué en partant de l'application des principes de base de la théorie des phases.

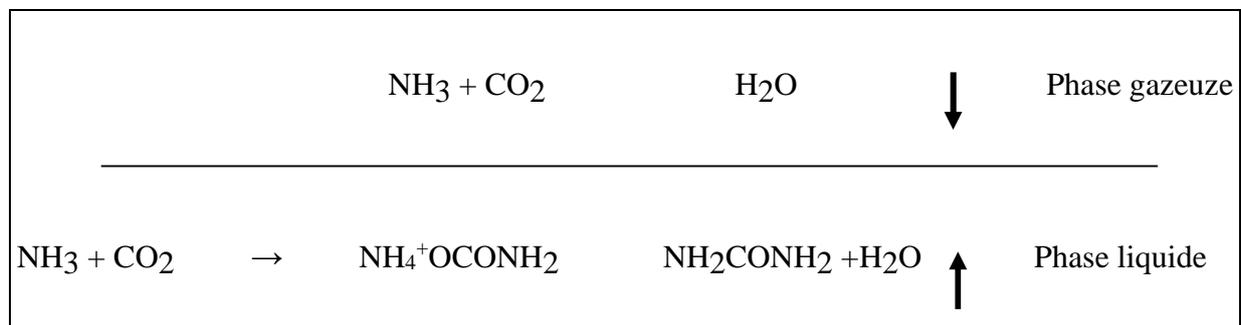
## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

Les quatre composants mentionnés plus haut sont classés en trois groupes :

- 1)-Les composants légers, l'ammoniac et le dioxyde de carbone sous forme pure, apparaissent en phase liquide uniquement à des pressions élevées et / ou des températures basses.
- 2)- Le composant de poids moyen, l'eau, apparaît à la fois en phase liquide et en phase gazeuse.
- 3)-Le composant lourd, l'urée, apparaît uniquement en phase gazeuse et seulement à des pressions extrêmement basses ou des températures extrêmement élevées.

Les transitions entre les phases sont représentées schématiquement comme suit :

Tableau III-1 : Les transitions entre les phases.



Le comportement des phases de ce système à quatre composants est fortement déterminé par le comportement du système binaire ammoniac / dioxyde de carbone.

### III-5-1-Ammoniac et dioxyde de carbone

De ce fait, la description la plus simple du comportement du mélange à quatre composants est obtenue en considérant le comportement du système binaire, et en y ajoutant ensuite les propriétés de l'eau et de l'urée.

Selon l'équation de la première réaction, l'ammoniac et le dioxyde de carbone réagissent pour former le sel, c'est-à-dire le carbamate d'ammonium. Ceci a deux conséquences importantes pour le système ammoniac / dioxyde de carbone :

- 1)-La réaction des deux composants légers donne lieu à la formation du composant lourd, le carbamate d'ammonium. La pression du mélange sera donc plus basse que la pression des composants individuels.
- 2)-La forte interaction entre l'ammoniac et le dioxyde de carbone donne naissance à un mélange azéotropique. Le fait que la pression de dissociation du carbamate d'ammonium reste relativement basse, et ce même à des températures plus élevées, a pour effet surprenant que le carbamate d'ammonium peut rester présent sous forme liquide, tandis que les

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

composants le constituant sont supercritiques. En association avec le mélange azéotrope, cela conduit à la situation illustrée à la fig. 1, laquelle décrit l'équilibre gaz-liquide du système, à une pression et à des températures constantes auxquelles le carbamate d'ammonium n'apparaît pas à l'état solide.

Lorsqu'un mélange gazeux de composition  $X_{AZ}$  est refroidi, il se condense à une température  $T_{AZ}$ , qui est la température de condensation azéotrope. Pendant la condensation, la température reste constante : le mélange se comporte comme un système unaire. Lorsqu'un mélange gazeux de composition différente est refroidi, il se comporte comme un mélange binaire et présente une plage de condensation, pas un point. Le début et la fin de cette plage se situent à des températures inférieures à la température de condensation azéotrope. La plage d'ébullition débute à la température la plus basse à laquelle des bulles de gaz se forment. C'est pourquoi cette température s'appelle le point de bulle. Le début de la plage de condensation est la plus haute température à laquelle le liquide est toujours présent, et c'est pourquoi cela s'appelle le point de rosée.

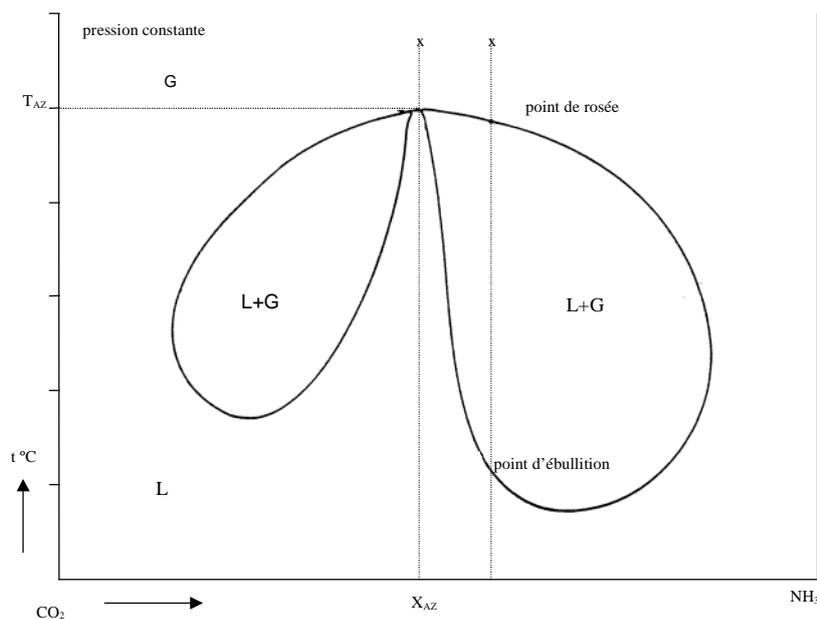


Figure III-2: Équilibre liquide / gaz du système  $\text{CO}_2$ - $\text{NH}_3$

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### **III-5-2-Ammoniac, dioxyde de carbone et eau**

L'eau est un composant de poids moyen en comparaison à l'ammoniac et au dioxyde de carbone. Toutefois, ces deux derniers composants diffèrent énormément de l'eau dans leur comportement. L'ammoniac est très soluble dans l'eau, le dioxyde de carbone très faiblement. Cela signifie qu'une phase liquide peut uniquement contenir des quantités sensibles de dioxyde de carbone sous forme liée, par exemple, de carbamate d'ammonium ou, éventuellement, de carbonate d'ammonium et uniquement un très faible volume de dioxyde de carbone libre.

### **III-5-3-Ammoniac, dioxyde de carbone, eau et urée**

L'urée est le plus lourd des quatre composants. Cela signifie que, comme l'eau, l'urée peut agir comme un solvant en phase liquide. Alors que la fraction d'urée augmente, la pression de la vapeur du mélange diminue, en supposant que la température reste constante. Toutefois, l'affinité entre l'ammoniac et l'urée est inférieure à celle existant entre l'ammoniac et l'eau.

La réaction de formation de l'urée étant endothermique, la conversion en urée sera, dans ces conditions, maximale également. Pour atteindre cette composition équilibrée, il est nécessaire d'utiliser un mélange ayant une composition reposant sur la ligne représentant le chemin de réaction jusqu'au point d'intersection mentionné.

En partant de l'équation de réaction brute de la formation d'urée à partir d'ammoniac et de dioxyde de carbone, ainsi que du poids molaire de ces substances, il apparaît que l'utilisation d'un mélange contenant 56,4 % en poids de dioxyde de carbone et 43,6 % en poids d'ammoniac mènera exactement au point de jonction eau / urée.

### **III-6-La réalisation techno-chimique du procédé de synthèse**

La réalisation techno-chimique de la synthèse est déterminée par l'équilibre physique et chimique dans le système constitué par l'ammoniac, le dioxyde de carbone, l'eau et l'urée. Le procédé de décomposition au CO<sub>2</sub> Stamicarbon opte pour une section de synthèse consistant en quatre éléments, c'est-à-dire :

1. Condenseur de synthèse.
2. Réacteur d'urée.
3. Décomposeur (échangeur de chaleur HP).
4. Laveur HP.

### Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

Les quatre éléments ensemble forment ce qui s'appelle la synthèse. La même pression domine tout au long de la synthèse. Les réactifs de recyclage contenant de l'ammoniac et du dioxyde de carbone sont acheminés vers le condenseur de synthèse. La composition du mélange à la pression dominante n'est pas loin de la ligne de crête supérieure. La chaleur de la condensation libérée dans la réaction est utilisée pour la génération de vapeur BP. Le degré de condensation dans le condenseur de synthèse peut être contrôlé au moyen de la pression de la vapeur BP.

Le mélange s'écoule vers le réacteur depuis le condenseur de synthèse. Le temps de séjour dans le réacteur est tel que la durée est suffisante pour atteindre l'équilibre de l'urée presque complètement. La composition dans la boucle de synthèse est telle que le produit quittant le réacteur à la température la plus haute possible à la pression du système. Cela se produit si la fin du chemin de réaction est sur la ligne de crête supérieure du liquide. À pression constante, la température peut donc augmenter à travers le réacteur. Afin d'augmenter la température du mélange et de fournir la chaleur de réaction pour la formation de l'urée, la chaleur doit être acheminée vers le réacteur.

Cette chaleur est produite par condensation additionnelle d'ammoniac et de dioxyde de carbone qui n'ont pas été condensés dans le condenseur de synthèse. Afin de suivre le chemin de réaction de bout en bout à la température la plus haute possible, il est nécessaire d'établir un écoulement piston. De plus, il devrait y avoir un contact intensif entre la phase gazeuse et la phase liquide, car il est nécessaire de maintenir un équilibre physique constant entre les phases afin de conserver la température aussi haute que possible.

Le décomposeur (échangeur de chaleur HP) est conçu comme un évaporateur de film à contre-courant. Le liquide s'écoule vers le bas, le long de la paroi du tube, dans un film, et le dioxyde de carbone introduit dans la partie inférieure élimine le carbamate qui s'est dissocié en ammoniac et en dioxyde de carbone. La chaleur nécessaire à la décomposition du carbamate provient de la condensation de vapeur. Les matières premières de la synthèse, le dioxyde de carbone et l'ammoniac, contiennent des substances inertes. De plus, de l'air est ajouté au dioxyde de carbone afin de minimiser la corrosion et la combustion de l'hydrogène. Cela signifie qu'un écoulement constant est nécessaire depuis la boucle de synthèse afin de prévenir l'accumulation des substances inertes. Afin de récupérer de l'ammoniac et du dioxyde de carbone à partir de ce flux d'évent, le gaz est tout d'abord lavé dans le laveur haut pression avec le carbamate recyclé provenant de l'étage basse pression ; il est lavé une seconde fois avec les condensats de procédé dans l'absorbeur BP. La solution formée dans le laveur HP est pompée vers le condenseur de synthèse à l'aide d'un éjecteur liquide-liquide.

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### III-7-Le condenseur de synthèse

De l'ammoniac et du dioxyde de carbone sont condensés dans le condenseur de synthèse et du carbamate d'ammonium se forme :



Le rapport molaire entre l'ammoniac et le dioxyde de carbone correspondant au point de rosée maximal à la pression du système est d'environ 2,5. Toutefois, dans la phase liquide du condenseur de synthèse, ce rapport molaire est d'environ 3,0 ; à ce point du procédé, cela implique qu'il existe un léger excédent de  $\text{NH}_3$  par rapport à la composition de la crête supérieure.

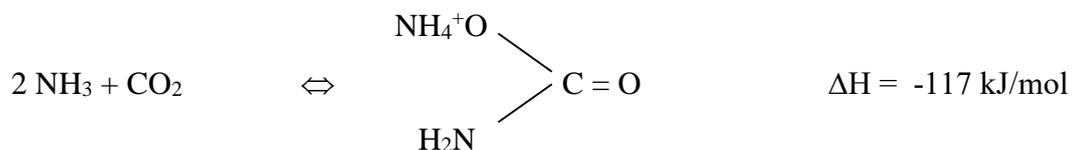
Une condensation incomplète est nécessaire dans le condenseur de synthèse, car une basse température à l'admission du réacteur n'est pas souhaitable. La condensation partielle dans le condenseur de synthèse a les conséquences suivantes :

- La température du mélange à l'admission du réacteur est relativement élevée.
- Les gaz non condensés assurent l'apport d'une chaleur suffisante dans le réacteur afin de provoquer la réaction de formation d'urée et, en outre, augmenter la température.
- La part de l'apport de gaz total qui ne se condense ni dans le condenseur de synthèse, ni dans le réacteur, garantit que le pourcentage inerte dans le haut du réacteur sera tel que les pressions de vapeur partielles de l'ammoniac et du dioxyde de carbone sont suffisamment élevées. Cette quantité est suffisante pour que la température à la sortie du réacteur atteigne environ 185 °C.

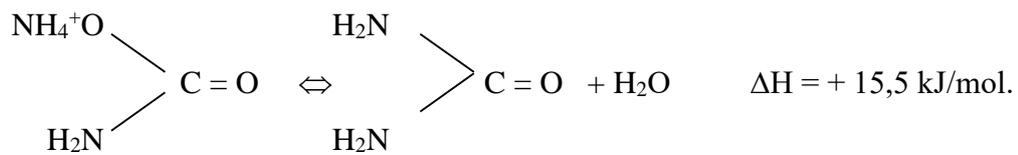
La chaleur est libérée à une température telle qu'elle convient à la génération d'une vapeur de 4,4 bars.

### III-8-L'équilibre physique et chimique du procédé global

Le dioxyde de carbone et l'ammoniac sont convertis en carbamate d'ammonium dans le condenseur de synthèse. Dans le réacteur et en partie dans le condenseur de synthèse, le carbamate d'ammonium en phase liquide est converti en urée et en eau.



## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.



Dans la première réaction, le dioxyde de carbone et l'ammoniac sont convertis en carbamate d'ammonium ; la réaction est rapide et exothermique. Dans la seconde réaction, qui est lente et endothermique, le carbamate d'ammonium se déshydrate pour produire de l'urée et de l'eau. Il est produit davantage de chaleur au cours de la première réaction qu'il en est consommé dans la seconde ; la réaction globale est donc exothermique.

Les procédés diffèrent principalement selon les conditions (composition, températures et pression) auxquelles ces réactions sont exécutées. Habituellement, la composition de la phase liquide dans la zone de réaction est exprimée à l'aide de deux rapports molaires :

$\text{NH}_3/\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ .

Les deux reflètent la composition de ce que l'on appelle le mélange initial, c'est-à-dire le mélange hypothétique se composant exclusivement de  $\text{NH}_3$ , de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{H}_2\text{O}$ , si les deux réactions sont complètement déplacées vers la gauche. La conversion réalisable par passage, conditionnée par l'équilibre chimique en fonction de la température, atteint un maximum. Cet effet est habituellement attribué au fait que la concentration de carbamate d'ammonium en fonction de la température, atteint un maximum.

Ce maximum de la concentration de carbamate d'ammonium peut s'expliquer, au moins qualitativement, par les effets thermiques respectifs des réactions du carbamate et de l'urée. Ce mécanisme ne peut toutefois pas expliquer totalement et quantitativement le maximum de conversion observé ; d'autres mécanismes contributifs ont été suggérés.

L'influence de la composition du mélange initial sur l'équilibre chimique peut s'expliquer qualitativement par les réactions du carbamate et de l'urée, et par la loi de l'action de masse :

- Une augmentation du rapport  $\text{NH}_3/\text{CO}_2$  (augmentation de la concentration de  $\text{NH}_3$ ) augmente la conversion de  $\text{CO}_2$  mais réduit la conversion de  $\text{NH}_3$ . Une augmentation de la quantité d'eau dans le mélange initial (augmentation du rapport  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ ) provoque une baisse à la fois de la conversion de  $\text{CO}_2$  et de celle de  $\text{NH}_3$ . Dans ces cas également, une description quantitative complète ne peut pas simplement être déviée de la loi d'action de masse et des réactions du carbamate et de l'urée. D'autres mécanismes de réaction, pas encore totalement compris, contribuent à l'équilibre chimique dans une faible mesure.

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### **III-9-Le décomposeur (échangeur de chaleur HP)**

Lorsque la réaction de formation d'urée n'atteint pas son terme, l'ammoniac, le dioxyde de carbone et le carbamate d'ammonium non convertis doivent être éliminés de la solution du réacteur. Ces réactifs sont, pour la majeure partie, récupérés à la pression de synthèse dans le décomposeur HP, puis recyclés vers le condenseur de synthèse. L'élimination du carbamate d'ammonium doit être rapide et exécutée à une température pas trop élevée.

L'équilibre d'urée ne prendra alors pas le temps de se produire, ce qui résulte en une hydrolyse de l'urée. Dans la méthode développée par Stamicarbon, la solution du réacteur est décomposée à contre-courant avec du dioxyde de carbone. Cela réduit la pression partielle de l'ammoniac en phase gazeuse et entraîne l'évaporation de l'ammoniac en phase liquide.

Du fait de la plus faible concentration d'ammoniac dans la phase liquide, le carbamate d'ammonium se dissocie en ammoniac et en dioxyde de carbone, comme le démontre l'équation d'équilibre du carbamate. La chaleur de la dissociation est obtenue par la condensation de vapeur à l'extérieur des tubes du décomposeur. Cela maintient la phase liquide à une température d'ébullition.

En pratique, la concentration en  $\text{NH}_3$  et en  $\text{CO}_2$  dans le décomposeur HP est limitée par la taille du décomposeur HP. De plus, particulièrement dans la partie basse des tubes, le procédé n'est plus isotherme. Au contraire, le  $\text{CO}_2$  relativement frais introduit dans la partie basse est à l'origine d'un certain refroidissement du liquide s'écoulant le long des parois des tubes. Cet effet de refroidissement dans la partie basse prédomine sur le chauffage par la vapeur dans la partie calandre. Le résultat net est que le liquide sortant du décomposeur HP est sensiblement plus frais, en comparaison avec le liquide introduit, et ce malgré le système de chauffage par la vapeur. Une augmentation plus importante de la taille du décomposeur HP afin de parvenir à une efficacité de décomposition encore plus élevée ne serait pas justifiée, non seulement d'un point de vue économique, mais également parce que l'apparition des deux réactions de chaque côté empêche une efficacité de décomposition plus faible.

Dans la partie basse des tubes du décomposeur HP, les conditions sont extrêmement favorables à une hydrolyse et à la formation de biuret. La température est élevée et les concentrations en carbamate et en ammoniac sont faibles. Afin de réduire ces réactions, le dioxyde de carbone pénètre dans la partie basse du décomposeur HP à une température maximale de 120 °C. En maintenant un niveau de condensation stationnaire dans la partie basse du décomposeur, le transfert de chaleur vers le liquide est partiellement bloqué. Dans cette partie du décomposeur HP, le procédé de décomposition est quasiment adiabatique.

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

Finalement, le niveau de solution décomposée du réacteur est contrôlé de telle sorte que le temps de séjour est le plus court possible.

### **III-10-Conditions de synthèse et contrôle**

Comme mentionné plus haut, il est recommandé d'avoir la pression la plus élevée possible dans le condenseur de synthèse et dans le réacteur. Dans le décomposeur toutefois, la pression doit être la plus basse possible. Pour des raisons économiques, Stamicarbon a opté pour une pression de système de 135 bars environ. En raison du volume inerte impliqué, cela revient à une pression de synthèse de 144 bars environ.

L'une des variables du procédé est le rapport molaire entre l'ammoniac et le dioxyde de carbone dans la boucle de synthèse. L'ammoniac et le dioxyde de carbone étant convertis en carbamate et en urée, il est souvent fait référence au rapport azote / carbone (rapport N/C) à la place du rapport ammoniac / dioxyde de carbone. Le rapport N/C est constant, depuis l'admission du condenseur de synthèse jusqu'à la sortie du réacteur. Le rapport N/C appliqué est tel qu'une utilisation optimale est faite de l'occurrence des lignes de crête supérieures.

Une vitesse de réaction élevée correspond à une économie en volume du réacteur. Une conversion élevée signifie qu'il est nécessaire de décomposer relativement peu de carbamate dans le décomposeur HP, de telle sorte que le décomposeur consomme relativement peu de vapeur à 25 bars. Dans ce contexte, le terme « rendement du dioxyde de carbone » est souvent utilisé, représentant la part de dioxyde de carbone convertie en urée en un passage à travers le réacteur. En tenant compte des avantages et des inconvénients, l'approvisionnement en ammoniac et en dioxyde de carbone doit être tel que la composition au niveau de la sortie du réacteur.

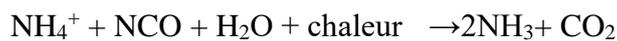
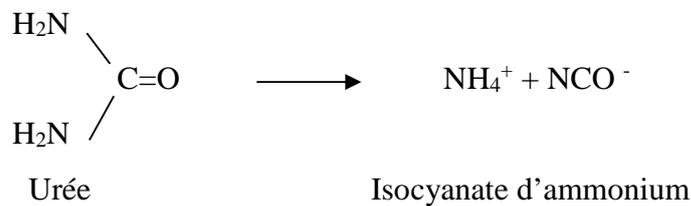
### **III-11-Hydrolyse**

Décomposition chimique d'une substance par l'action directe ou indirecte de l'eau, de façon qu'il apparaisse de nouvelles molécules.

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### III-11-1-Réaction d'hydrolyse

L'hydrolyse de l'urée se produit conformément aux équations de réaction suivantes :



Cette réaction d'équilibre doit se produire à une température élevée afin de se dérouler à une vitesse acceptable. Comme le montre l'équation de réaction, il est essentiel que les concentrations d'ammoniac et de dioxyde de carbone dans l'alimentation de l'hydrolyseur soient aussi faibles que possible ; c'est la garantie que la réaction arrive à son terme. Par conséquent, si une faible concentration d'urée est requise depuis l'hydrolyseur, les concentrations d'ammoniac et de dioxyde de carbone qu'il contient doivent être faibles également. C'est pourquoi le volume d'ammoniac et de dioxyde de carbone est tout d'abord extrait en amont du désorbeur depuis l'hydrolyseur.

Si le liquide séjourne suffisamment longtemps à une température élevée dans l'hydrolyseur pour que l'équilibre soit établi, la concentration d'urée à la sortie sera très faible. Pour de faibles concentrations à la sortie, il est nécessaire de retirer l'ammoniac et le dioxyde de carbone dans l'hydrolyseur lui-même. De ce fait, l'hydrolyseur devrait en outre agir comme un désorbeur afin d'éliminer partiellement l'ammoniac et le dioxyde de carbone qui évoluent dans le procédé d'hydrolyse.

L'hydrolyseur est conçu comme une colonne verticale et l'hydrolyse se produit à contre-courant. De la vapeur est envoyée à travers le bas tandis que l'évaporation sort par le haut. Le liquide est alimenté depuis le haut et il est refoulé à partir du bas. L'effet de désorption assure de faibles concentrations d'ammoniac et de dioxyde de carbone dans le liquide refoulé, ce qui favorise la réaction d'hydrolyse. De cette manière, la concentration d'urée dans le traitement des condensats de procédé peut être réduite de 1 ppm ou moins.

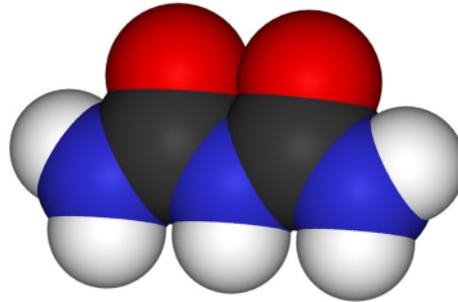
## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

### III-12-Biuret

Le biuret est un composé organique obtenu par condensation de deux molécules d'urée et élimination d'une molécule d'ammoniac. Dans les conditions normales de température et de pression, il se présente sous la forme d'un solide blanc, soluble dans l'eau chaude et se décomposant de 186 à 189 °C.

#### III-12-1-Propriétés du biuret

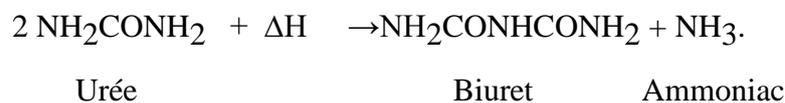
|                          |                                  |
|--------------------------|----------------------------------|
| Formule chimique         | $\text{NH}_2\text{CONHCONH}_2$ . |
| Poids moléculaire        | 103,08kg/kmol.                   |
| Masse volumique          | 1467kg/m <sup>3</sup> à -5 °C.   |
| Point de cristallisation | 180 – 190°C.                     |



**Figure III-3:**  
**Représentation de la molécule de biuret en 3D.**

#### III-12-2-Réaction de formation de biuret

Pendant la formation d'urée, le biuret se forme comme un dérivé, conformément à l'équation :



Il s'agit d'une réaction d'équilibre endothermique lente.

L'équation montre que la formation de biuret se produira lorsque la concentration d'urée est élevée, que la concentration d'ammoniac est faible et que la température est élevée.

Le biuret étant toxique pour les plantes, la teneur en biuret de l'urée engrais devra être maintenue aussi basse que possible. Cela signifie qu'il convient d'éviter au moins les associations des facteurs mentionnés plus haut, surtout dans les endroits où le temps est suffisant pour la formation d'une concentration de biuret.

Les emplacements les plus critiques à cet égard sont le décomposeur ainsi que les réchauffeurs de solution d'urée basse pression de recirculation et d'évaporation. Le liquide sortant du réacteur contient environ 0,11 % en poids de biuret, en rapport avec le total de l'urée plus du biuret. En raison des temps de séjour très courts dans le décomposeur et le réchauffeur de recirculation, la formation de biuret entre le réacteur et l'évaporateur est limitée à environ 0,2 % en poids. L'évaporateur est conçu comme un évaporateur à un seul

## Chapitre III : Les réactions de synthèse de l'urée.

passage, afin de minimiser le temps de séjour. Afin de maintenir la température basse, il fonctionne à une pression réduite. Cela maintient la formation de biuret basse à environ 0,30 % en poids, ce qui signifie que la formation globale de biuret sera d'environ 0,8 % en poids. Lorsqu'une unité fonctionne en dessous de sa capacité nominale, la concentration de biuret augmentera, ce qui est le résultat de temps de séjour plus longs dans la section évaporation.

Les temps de séjour peuvent être réduits en augmentant la pression dans le premier évaporateur, ce qui implique que le second évaporateur recevra une charge plus lourde.

### **III-13-Conclusion**

La synthèse de l'urée comprend deux réactions essentielles en deux temps, la première est celle de formation de carbamate, elle est fortement exothermique atteint très rapidement un équilibre, la deuxième est celle de la décomposition du carbamate en urée, cette dernière est lente et endothermique.

# *Chapitre IV*

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### IV-1-Introduction

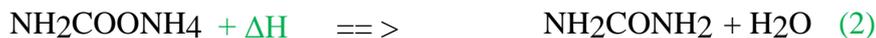
Le concept de base de l'unité d'urée a été créé par Stamicarbon, une filiale de DSM (Pays-Bas), pour les systèmes 021, 022, 023, 024, 028, 029 et par Uhde Fertilizer Technology B.V (Pays-Bas), pour le système 027 (Granulation).

L'unité est destinée à fonctionner selon le procédé de décomposition de CO<sub>2</sub> à recyclage total, et elle comprend tous les systèmes en un seul flux avec une capacité de 3 450 T/jour, exprimées sous la forme finale d'urée granulée pour tous les systèmes.

Les pressions indiquées dans la synthèse sont des pressions absolues, sauf notification contraire (par exemple pour les soupapes de sûreté, pour lesquelles la pression réglée est donnée en bars relatifs).

### IV-2-Description du procédé de production d'Urée

L'urée est produite en faisant réagir de l'ammoniac liquide et du dioxyde de carbone gazeux à une température d'environ **170 à 185 °C** et une pression de **135 à 145 bars**, selon les réactions suivantes :



Dans la première réaction, le dioxyde de carbone et l'ammoniac sont transformés en carbamate d'ammonium. Cette réaction est rapide et exothermique. Dans la seconde réaction, qui est lente et endothermique, le carbamate d'ammonium se déshydrate pour produire de l'urée et de l'eau.

Les deux alimentations, l'ammoniac et le dioxyde de carbone, sont introduits dans la section de synthèse d'urée à un rapport molaire de **2:1**, au début du démarrage le rapport molaire est de **3:1**.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

L'unité de production d'urée est située sur le site principal au voisinage des 2 unités de production d'ammoniac.



Figure IV-1 : Localisation de l'unité d'Urée à SORFERT.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### IV-3-Les Différents systèmes de l'unité d'Urée

L'Unité d'urée peut être subdivisée en systèmes comme suit:

- 020** Compression du CO<sub>2</sub>
- 021** Pompage d'Ammoniac
- 022** Synthèse Urée
- 023** Recirculation
- 024** Évaporation
- 027** Granulation
- 028** Désorption et Hydrolyse
- 029** Vapeur et condensation

#### IV-3-1- Compression du CO<sub>2</sub>

(Système 020, Schémas PFD N° 020-1)

Avant le compresseur de dioxyde de carbone 020K002, de l'air est acheminé depuis l'unité de NH<sub>3</sub> vers le flux de dioxyde de carbone. Cet ajout d'air sert à deux choses :

- à la combustion de l'hydrogène après le 2ème étage du compresseur dans le réacteur d'extraction de H<sub>2</sub> 020R001.
- comme agent anticorrosion dans la section de synthèse.

De l'air provenant de la seconde unité d'ammoniac peut être utilisé comme branchement de secours, ou, s'il n'y en a pas de disponible, un branchement d'air instruments est fourni (alimentation d'urgence uniquement).

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

La quantité d'air est contrôlée, de telle sorte que suffisamment d'oxygène est présent pour la combustion de l'hydrogène dans le réacteur d'extraction d'hydrogène 020R001 et qu'environ 0,3 % en volume d'oxygène est laissé dans le réacteur.

Le dioxyde de carbone, contenant environ 0,089 % en volume d'hydrogène, 0,124 % en volume d'azote et de l'eau, est alimenté à 1,5 bars et 40 °C.

La pression du dioxyde de carbone est augmentée à 150 bars par le compresseur de CO<sub>2</sub> 020K002 et il est refoulé vers le décomposeur 022E001. La température du CO<sub>2</sub> pressurisé est d'environ 120 °C.

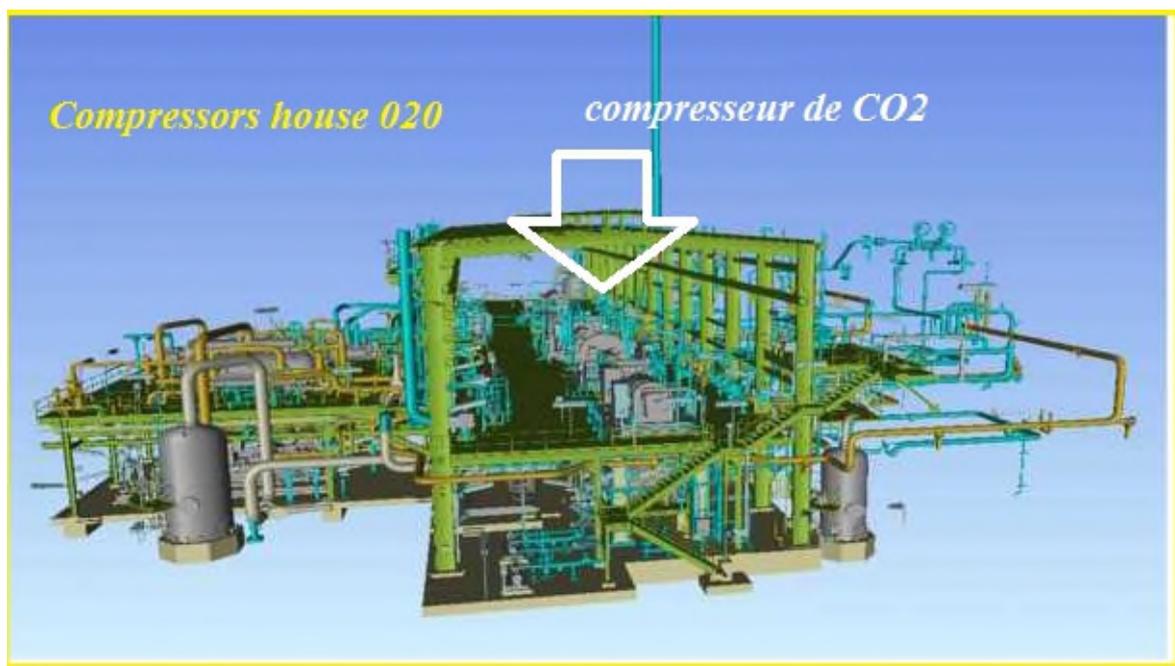


Figure IV-2 : dessin 3D illustrant la maison de compresseurs à SORFERT.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### IV-3-1-1-Extraction de l'hydrogène

(Schéma PFD N° 020-1)

Un convertisseur d'hydrogène 020R001 est installé au niveau du refoulement du deuxième étage du compresseur de CO<sub>2</sub> 020K002. Le convertisseur est rempli de platine sur un catalyseur d'oxyde d'aluminium. Dans le convertisseur, l'hydrogène est converti en eau par le biais d'une combustion catalytique avec de l'oxygène. En raison de la combustion catalytique de l'hydrogène, la température du dioxyde de carbone augmente. La hausse dépend de la teneur en hydrogène dans le dioxyde de carbone.



Figure IV-3 : Réacteur d'élimination de H<sub>2</sub> dans la section de compression du CO<sub>2</sub>.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### a) Réacteur 020R001

| <b>Catalyst Pellets 020R001-Z40</b> |   |                               |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|
| Size :                              | 3x3 mm                                    |                               |
| Material :                          | 0.3 %Pt on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                               |
| Bulk density                        | 1060 Kg/m <sup>3</sup>                    |                               |
| <u>Vessel</u>                       |   | <u>Volume (m<sup>3</sup>)</u> |
| 020R001                             | H2-Removal Reactor                        | 1,73                          |
|                                     | Spare                                     | 0,12                          |
|                                     | <b>Total</b>                              | <b>1,85 m<sup>3</sup></b>     |

Figure IV-4 : Les dimensions du réacteur d'élimination d'hydrogène.

### b) Catalyseur d'extraction du H2 dans la compression du CO<sub>2</sub>



Tableau 1 : Les caractéristiques de catalyseur du réacteur 020R001.

| Type  | TAG/Service | Volume   | Durée de Vie | Service                                   | Fournisseur                                   |
|---|-------------|--|--------------|---|---|
| 0.3% Pt sur Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Pellets 3x3 mm) | 020R001     | 1.73 m <sup>3</sup> installed + 0.12m <sup>3</sup> Spare | min. 5 years | H2 Removal in CO <sub>2</sub> Compression | Johnson Matthey or Europe) Engelhard (both W- |

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### IV-3-2- Pompage d'Ammoniac

(Système 021)

L'ammoniac liquide pénètre dans l'installation aux conditions suivantes :

- Température    environ 22 °C.
- Pression        17 bars.
- Ammoniac      99,7 % en poids.
- Eau              0,06 % en poids.

L'ammoniac est conduit depuis les limites de l'installation jusqu'à l'aspiration de la pompe à ammoniac HP 021P002A/B, via le filtre 021F005A/B et la cuve d'élimination des inertes de l'ammoniac 021D003.

La pompe d'ammoniac HP augmente la pression et alimente le condenseur de synthèse HP 022E005 avec de l'ammoniac à environ 147-148 bars (admission du condenseur de synthèse) et 30 °C, via un éjecteur HP 022F001.



Figure IV-5: la pompe d'ammoniac.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

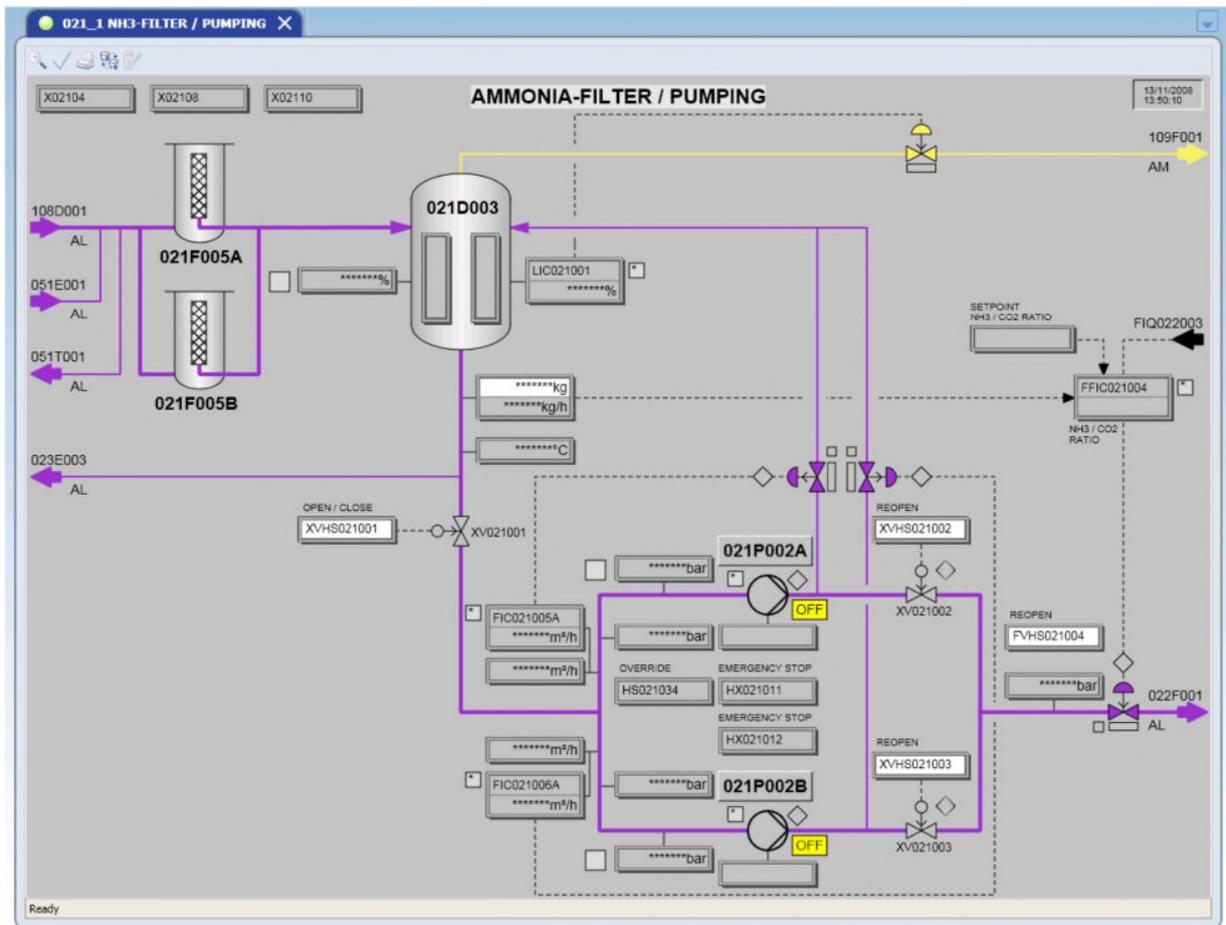


Figure IV-6: Schéma de pompage d'ammoniac provenant de la salle de contrôle (DCS).

### IV-3-3-Synthèse

(Système 022, PFD 020-1,022-1)

Le dioxyde de carbone provenant de l'unité du compresseur de CO<sub>2</sub> 020K002, à une pression d'environ 147 bars et une température de 110 °C, pénètre dans le bas du décomposeur 022E001 via un insert, au-dessus du niveau du liquide mais en dessous de la plaque tubulaire. Il quitte le décomposeur par le haut du condenseur de synthèse 022E005, transportant avec lui l'ammoniac extrait, le dioxyde de carbone, les vapeurs d'eau et certaines substances inertes. Le gaz décomposé est introduit dans le bas via un tuyau perforé ; il est ensuite distribué uniformément dans le liquide, réalisant ainsi un mélange optimal des réactifs (ammoniac et dioxyde de carbone) dans la solution

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

urée / carbamate. L'ammoniac, associé à l'excédent de carbamate provenant du laveur HP 022E003, à une température de 112°C et une pression d'environ 147 bars est également introduit dans le bas du condenseur de synthèse. Le rapport d'alimentation molaire ammoniac / dioxyde de carbone est 2/1.

Le condenseur de synthèse 022E005 est un échangeur de chaleur en position horizontale. Le procédé se situe dans la partie calandre, et l'eau d'alimentation de la chaudière dans la partie tube. Le volume de liquide, relativement important dans la partie calandre du condenseur de synthèse, est à l'origine de la conversion d'environ 40% du dioxyde de carbone en urée. La chaleur issue de la condensation de l'ammoniac et du dioxyde de carbone est utilisée pour générer de la vapeur saturée à basse pression de 4,4 bars dans le ballon de vapeur BP 022D001. Faire varier la pression de la vapeur dans le ballon de vapeur BP revient à modifier la température d'ébullition de l'eau d'alimentation chaudière, et de ce fait, la différence de température entre la partie calandre et la partie tube dans le condenseur de synthèse. Celle-ci affecte à son tour la quantité de chaleur échangée et, de ce fait, la quantité d'ammoniac et de dioxyde de carbone gazeux à condenser.

La pression de la vapeur est configurée à une valeur telle qu'une partie de l'ammoniac et du dioxyde de carbone ne se condense pas. L'ammoniac et le dioxyde de carbone non convertis dans le condenseur de synthèse 022E005 formeront du carbamate dans le réacteur 022R001, fournissant ainsi la chaleur nécessaire à la réaction d'urée dans le réacteur. La température maximale du réacteur se situant dans une plage entre 183 et 186 °C en fonctionnement normal, est une indication de la bonne vitesse de condensation dans le condenseur de synthèse. Le liquide de procédé et le gaz provenant du condenseur de synthèse 022E005 sont conduits vers le réacteur 022R001 via deux conduites séparées, et ce afin de maintenir la pression basse et d'assurer un débit stable vers le réacteur 022R001. La température des deux flux est de 178-179 °C.

Pour la réaction endothermique d'équilibre de l'urée, il est nécessaire d'établir de la chaleur ainsi qu'un certain temps de séjour. La chaleur est fournie par l'ammoniac et le dioxyde de carbone non convertis provenant du condenseur de synthèse et réagissant pour former le carbamate. Le temps de séjour est obtenu en appliquant un volume de réacteur suffisamment important. Afin d'améliorer le contact entre les phases liquide et gazeuse et d'obtenir un écoulement piston (afin

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

d'éviter un rétromélange), cinq plateaux-tamis sont installés dans le réacteur. Dans le réacteur d'urée, environ 60% du dioxyde de carbone fourni pour la synthèse sont convertis en urée.

Le mélange liquide du réacteur d'urée descend via la conduite de trop-plein dans le décomposeur 022E001. Dans la conduite de trop-plein du réacteur, le rapport N/C du liquide du réacteur est analysé en continu par un mesureur N/C. Pour une conversion optimale du CO<sub>2</sub>, le rapport N/C est régulé dans la plage 2,95-3,1. La conduite de trop-plein est construite de telle manière qu'une garde liquide est formée entre le réacteur et le décomposeur. Ceci associé à un niveau minimal d'au moins un mètre au-dessus de l'entonnoir situé en haut de la conduite de trop-plein, garantit un fonctionnement stable, sans danger d'un écoulement inversé de mélange gazeux provenant du décomposeur et se dirigeant vers le réacteur d'urée.

Le liquide du réacteur entrant dans le décomposeur 022E001 est distribué dans le haut par un grand nombre de tubes répartiteurs de liquide. Le dioxyde de carbone gazeux montant par les tubes entraîne une baisse de la pression partielle de l'ammoniac. En ajoutant de la chaleur, le carbamate commence à se décomposer en ses composants d'origine. La chaleur est obtenue par condensation de vapeur HP saturée dans une plage de pression de 20,7 bars dans la partie calandre du décomposeur. La décomposition du carbamate, la température d'alimentation relativement basse de 110 °C du dioxyde de carbone ainsi que la légère expulsion adiabatique, entraînent une chute de la température du liquide descendant dans les tubes de 186 °C à 174 °C en moyenne dans le bas du décomposeur.

Le décomposeur est équipé d'une soupape de sûreté dans la partie calandre. En cas de fuite ou de rupture d'un tube, la pression augmentera dans la partie vapeur. Afin d'éviter d'avoir une solution de synthèse et du gaz entrant dans le système d'alimentation en vapeur HP, la soupape s'ouvrira et la synthèse sera évacuée à l'air libre via une conduite d'évacuation (dans un endroit sûr).

Depuis le décomposeur 022E001, le liquide est refoulé vers la colonne de rectification 023C003. Le niveau dans le décomposeur est régulé puis il est maintenu aussi bas que possible afin de conserver un temps de séjour minimum à cette plage de température relativement élevée ; la formation de biuret et l'hydrolyse de l'urée sont ainsi réduites. La conduite de sortie de liquide du décomposeur comporte un point de prélèvement.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

La phase gazeuse provenant du réacteur 022R001, contenant de l'ammoniac et du dioxyde de carbone non convertis ainsi que du gaz inerte, est refoulée vers le laveur HP 022E003. Dans la conduite de refoulement de gaz, des soupapes sont installées avec une pression de consigne de 160 bars. La conduite de purge de la soupape de sûreté est dotée d'une injection de vapeur vive passant par un orifice de restriction, et ce afin d'assurer que la conduite soit ouverte et préchauffée en cas de décharge. L'évacuation se produira vers l'atmosphère.

Dans le laveur HP 022E003, la condensation d'ammoniac et de dioxyde de carbone est exécutée. La chaleur de la condensation est éliminée dans la partie d'échange de chaleur en faisant circuler de l'eau de refroidissement conditionnée.

Le laveur HP 022E003 se compose de trois parties :

- ✓ Un réservoir sphérique tampon par lequel les gaz du réacteur passent.
- ✓ La partie d'échange de chaleur avec un tuyau de descente central par lequel du liquide dégazé s'écoule. Un distributeur de gaz est installé en bas.
- ✓ La partie lavage dans laquelle les gaz restants sont lavés avec la solution de carbamate, et où l'ammoniac et le dioxyde de carbone sont presque complètement condensés.

Les gaz du réacteur passant par le réservoir sphérique tampon pénètrent dans le bas du laveur et sont mélangés avec la solution descendant depuis le haut. Le mélange gaz / liquide monte par le biais des tubes de l'échangeur de chaleur. De cette manière, la circulation est exécutée, améliorant le transfert de chaleur. Ici, le volume des gaz du réacteur est condensé. Dans la partie lavage, la concentration de gaz inerte augmente. En fonctionnement normal, la composition du gaz est maintenue bien en dehors de la plage inflammable.

Au cas où le mélange gazeux atteint les limites d'explosion et si une source d'inflammation est présente, la pression du mélange enflammé entraînera la rupture de la partie lavage, mais dans le réservoir sphérique tampon la hausse de pression sera faible et le laveur HP ne subira aucun dégât important.

Le système d'eau de refroidissement conditionnée pour le laveur HP 022E003 est un circuit fermé. La pompe de circulation d'eau 029P006 A/B fait circuler l'eau par la calandre de la partie échangeur de chaleur du laveur HP. La température d'admission de l'eau de refroidissement vers

## *Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.*

le laveur HP 022E003 est de 91°C. La température de sortie de l'eau de refroidissement est d'environ 103°C.

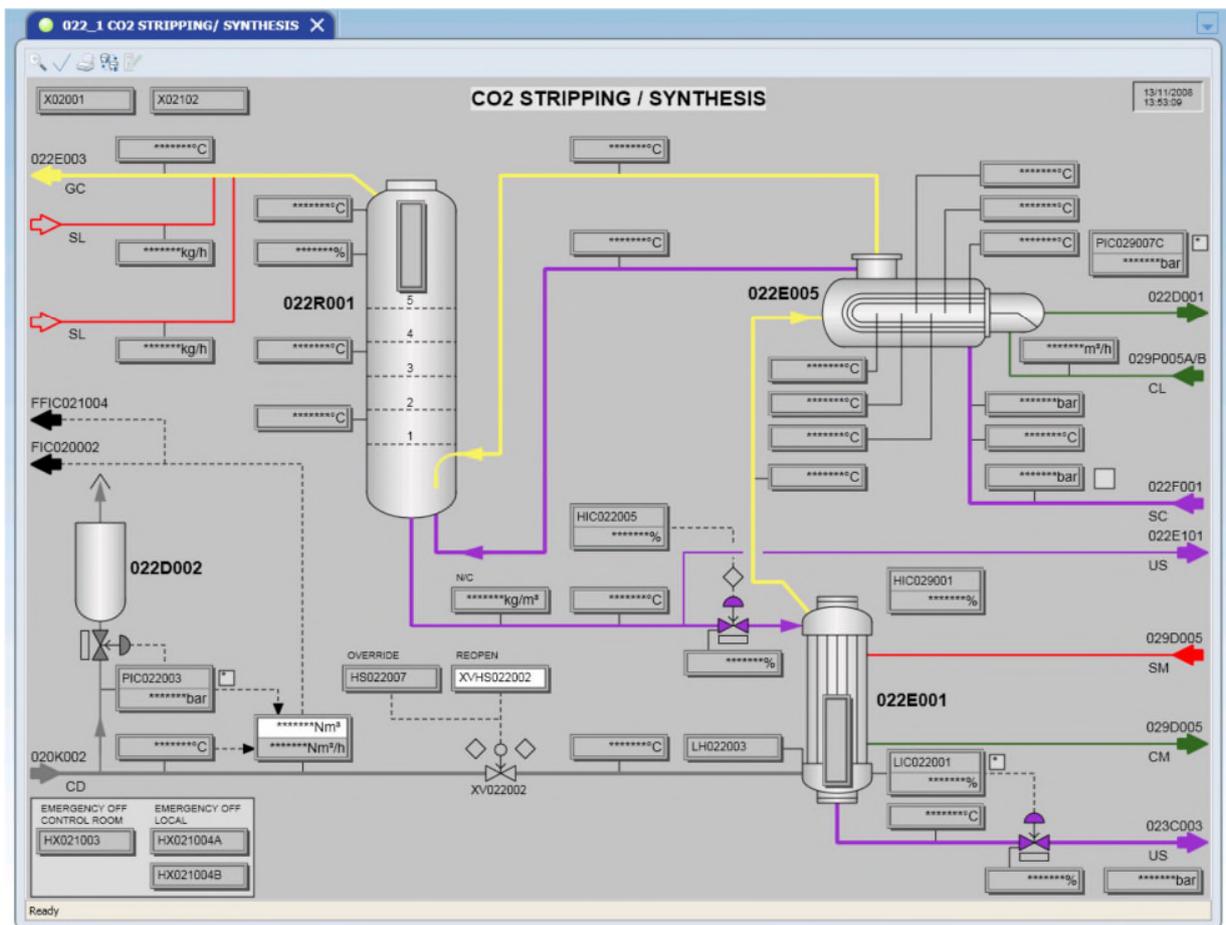
Afin d'éviter une ébullition de l'eau de refroidissement, une pression de 9 bars minimum est maintenue dans ce circuit de refroidissement d'eau.

Le gaz provenant du laveur HP 022E003, contenant seulement de minimes quantités d'ammoniac et de dioxyde de carbone, est acheminé vers l'absorbeur BP 022C001. L'admission de gaz vers l'absorbeur BP est assurée par la soupape de sûreté réglée à une pression de 15 bars relatifs. La température du gaz inerte est dans la plage située entre 98 et 115 °C.

La solution de carbamate provenant du laveur HP 022E003 s'écoule vers l'éjecteur HP 022F001, à travers lequel elle est transportée par l'ammoniac liquide vers le condenseur de synthèse 022E005.

La pression de synthèse est indiquée en amont du condenseur de synthèse HP 022E005. Dans des conditions normales de fonctionnement, cette pression est d'environ 147 bars. La température du mélange de carbamate ammoniac est de 112°C.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.



**Figure IV-7: Schéma de la synthèse d'urée provenant de La salle de contrôle (DCS).**

L'absorbeur BP 022C001 se compose de deux lits d'anneaux Pall et il fonctionne à 3,9 bars. Le lit inférieur est humidifié à l'aide de condensats de procédé provenant du réservoir d'eau ammoniacale 028T003, via la pompe d'alimentation de l'absorbeur BP 022P002 A/B. Le débit indiqué est d'environ  $61 \text{ m}^3/\text{h}$ . La température des condensats de procédé est refroidie à  $44^\circ\text{C}$ . Les condensats de vapeur sont acheminés vers le lit supérieur. Le débit indiqué est d'environ  $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Avant de pénétrer en haut de l'absorbeur BP, les condensats de vapeur sont refroidis à  $47^\circ\text{C}$  dans le refroidisseur de condensats de vapeur, à l'aide d'eau de refroidissement.

Le niveau dans l'absorbeur BP est régulé dans la conduite de refoulement depuis le bas vers l'absorbeur atmosphérique 023C005. La pression est régulée à 3.9 bars, dans la conduite de refoulement du gaz depuis le haut de l'absorbeur BP 022C001 vers l'atmosphère. De la vapeur BP

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

est approvisionnée en amont, dans la conduite de refoulement du gaz. La fourniture de vapeur sert à éviter les dépôts de carbamate provoqués par la condensation de  $\text{NH}_3$  et de  $\text{CO}_2$ . Cela se produit en raison de la détente du gaz à partir de 3,9 bars vers la pression atmosphérique. Des échantillons peuvent être prélevés au point de prélèvement, à partir de la conduite d'échappement de l'absorbeur BP.

Le réacteur d'urée, le condenseur de carbamate HP, le laveur HP, le condenseur de synthèse et le décomposeur (haut et bas) sont équipés d'un revêtement intérieur résistant à la corrosion. Un système de détection de fuites est prévu afin d'assurer un contrôle permanent du revêtement intérieur.

La section de synthèse est fournie avec un circuit de vidange reliant toutes les conduites HP vers la sortie du décomposeur, afin de vidanger la section de synthèse si nécessaire. Cette conduite de vidange et d'autres parties vitales de la section de synthèse sont reliées au circuit d'eau de chasse HP, où les condensats de vapeur HP sont approvisionnés, par une pompe d'eau de chasse HP 029P002 A/B.

Chapitre IV: Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.



Figure IV-8: Les importants équipements assurant la synthèse de la production d'urée.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### **IV-3-4-Recirculation**

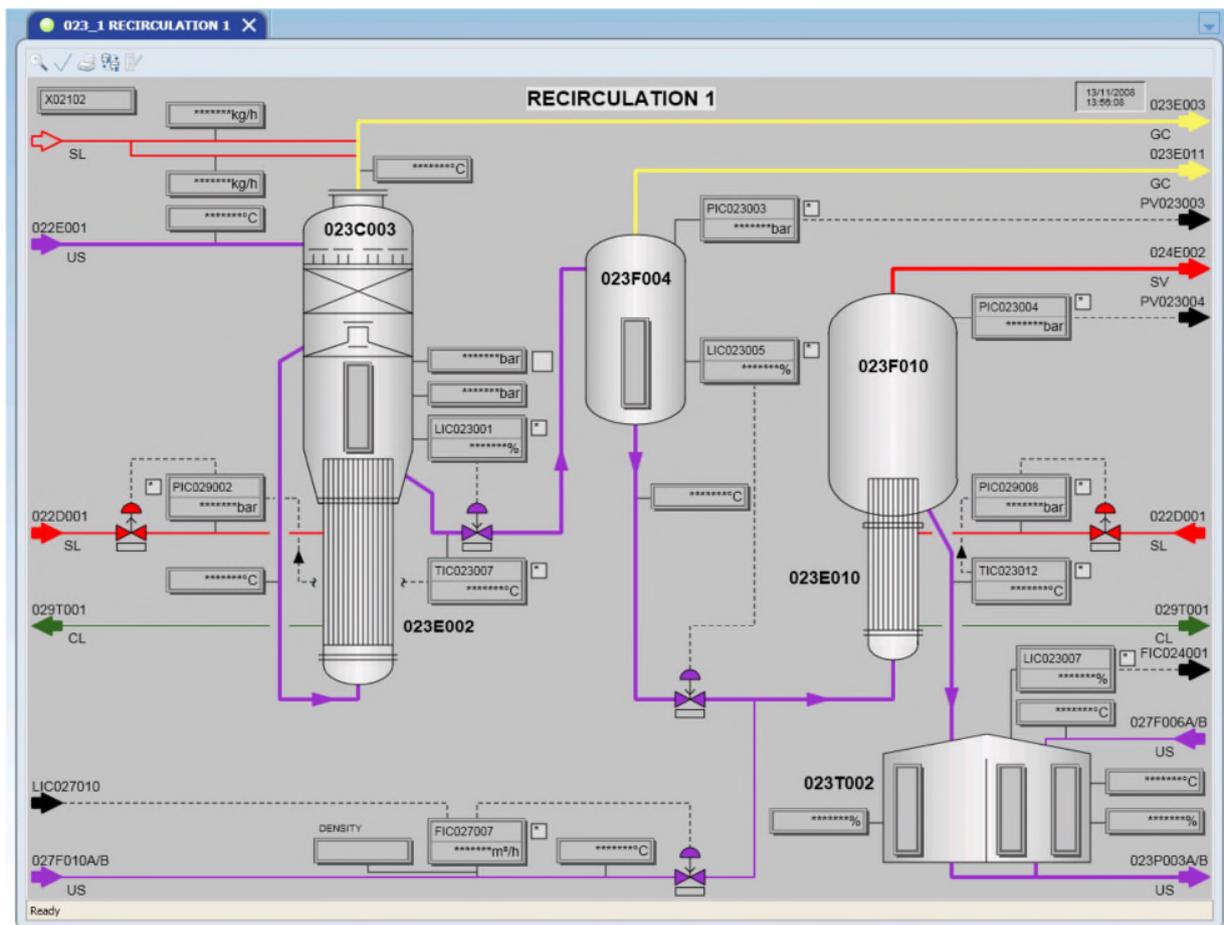
(Système 023, PFD N° 020-1, 024-1)

La solution de carbamate urée sortant de la partie basse du décomposeur 022E001, est dilatée à 4,1 bars, En raison de cette dilatation, une partie du carbamate se décompose. La chaleur nécessaire est fournie par la solution elle-même. La température baisse d'une moyenne d'environ 174 °C à environ 115 °C, Le mélange gaz / liquide pénètre dans le haut de la colonne de rectification 023C003 via une entrée tangentielle. Le liquide est distribué à partir d'un lit à garnissage d'anneaux Pall. Le gaz quitte le haut de la colonne de rectification pour atteindre le condenseur de carbamate BP 023E003 à une température de 115 °C.

La solution de carbamate urée s'écoule depuis le bas de la colonne de rectification vers le réchauffeur de recirculation 023E002. Le réchauffeur élève la température à 135 °C grâce à la vapeur BP dans la partie calandre ; le carbamate se décompose ensuite presque entièrement en NH<sub>3</sub> et CO<sub>2</sub>.

La solution est refoulée depuis le réchauffeur de recirculation 023E002 en direction de la partie séparateur, située entre la colonne de rectification et le réchauffeur, appelée séparateur de recirculation de 023C003. Le gaz et le liquide se séparent dans cette partie. Les gaz sont dirigés vers la colonne de rectification, en montant par le lit à garnissage afin d'être refroidis par la solution plus froide urée-carbamate qui descend. Cela entraînera la condensation d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans le gaz. La solution d'urée sortant du séparateur est refoulée vers le ballon de détente 023F004. La pression dans le ballon de détente est maintenue à 1,15 bar et une baisse de la température à 106 °C. Les gaz détendus sont conduits vers le condenseur du ballon de détente 023E011.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.



**Figure IV-9: Schema de la section de recirculation 1 provenant de la salle de contrôle (DCS).**

La conduite de refoulement du gaz de la colonne de rectification 023C003 est fournie avec une soupape, avec une pression de consigne de 7 bars relatifs. La conduite de purge de la soupape de sûreté dispose d'une injection de vapeur BP équipée d'une alarme de bas débit, de façon à maintenir la conduite chaude et exempte d'éventuels dépôts de carbamate. Ce mélange de gaz est introduit dans le bas du condenseur de carbamate BP 023E003, avec une solution de carbamate régénérée provenant du réservoir de niveau pour le condenseur de reflux 028D001, via la pompe de reflux 028P002 A/B et avec du carbamate régénéré provenant du réservoir de niveau pour le condenseur du ballon de détente 023D011, via la pompe de carbamate BP 023P008 A/B. Des condensats de procédé, acheminés depuis le réservoir d'eau ammoniacale 028T003 par la pompe d'alimentation du désorbeur 028P003 A/B, sont introduits dans cette conduite d'admission de gaz

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

pour réguler la concentration de carbamate requise dans le condenseur de carbamate BP 023E003.

Le point de cristallisation du carbamate produit dans le condenseur de carbamate BP 023E003 dépend non seulement de la concentration en eau, mais également du rapport ammoniac / dioxyde de carbone. Afin d'ajuster ce rapport, il est possible d'introduire de l'ammoniac liquide provenant du collecteur d'ammoniac principal dans le condenseur de carbamate BP 023E003. La quantité d'ammoniac requise en fonctionnement normal est d'environ 0,4 m<sup>3</sup>/h, entraînant un rapport ammoniac / dioxyde de carbone supérieur à 2,05 dans la solution de carbamate sortant du réservoir de niveau 023D001. La température du carbamate est d'environ 73 °C.

La solution de carbamate provenant du réservoir de niveau 023D001 est refoulée vers le laveur HP 022E003 par la pompe de carbamate HP 023P001 A/B.

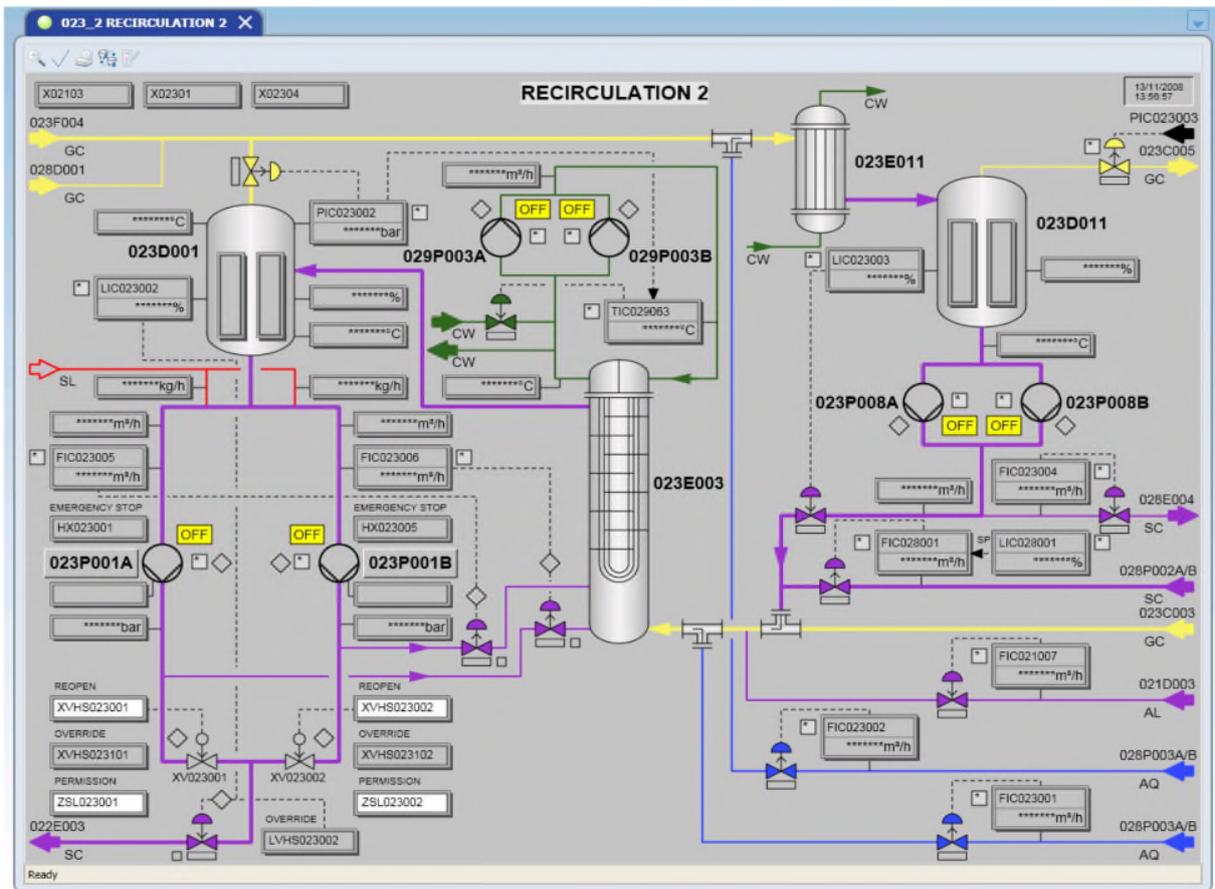
Pour éliminer la chaleur de condensation, la pompe d'eau de circulation 029P003 A/B fait circuler de l'eau par le condenseur de carbamate BP 023E003. Le débit moyen est de 2 385 m<sup>3</sup>/h. Cette boucle d'eau de refroidissement est reliée au circuit d'eau de refroidissement principal par le biais d'une conduite d'entrée et d'une conduite de sortie dans la conduite d'aspiration de la pompe d'eau de circulation. La température d'admission de l'eau de refroidissement au niveau du condenseur de carbamate BP est dans la plage de 55 °C.

La pression dans cette section dépend du taux de condensation et elle est maintenue à 3,2 bars.

Le gaz non condensé dans le condenseur de carbamate BP 023E003 est refoulé vers le condenseur du ballon de détente 023E011. Dans le condenseur du ballon de détente, ce gaz, accompagné du gaz refoulé depuis le ballon de détente 023F004 et contenant toujours une certaine quantité d'ammoniac et de dioxyde de carbone, est refroidi par de l'eau de refroidissement dans la partie tubes et il est presque entièrement condensé. Pour les besoins de la dilution, les condensats du procédé sont alimentés via la pompe d'alimentation du désorbeur 028P003 A/B.

Le carbamate régénéré s'écoule vers le réservoir de niveau pour le condenseur du ballon de détente 023D011, et il est refoulé par la pompe de carbamate régénéré 023P008 A/B vers le condenseur de carbamate BP 023E003 et le condenseur de reflux 028E004.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.



**Figure IV-10: Schema de la section de recirculation 2 provenant de la salle de contrôle (DCS).**

Le gaz non condensé est refoulé depuis le réservoir de niveau 023D011 et le condenseur du ballon de détente 023E011, vers l'absorbeur atmosphérique 023C005 à une température d'environ 60 °C, et en maintenant une pression de 1,15 bars dans cette section. Ce gaz contient beaucoup de substances inertes. De plus, le gaz provenant de l'évaporation de premier niveau de l'éjecteur 024F001 est conduit dans la partie inférieure de l'absorbeur atmosphérique.

Dans l'absorbeur atmosphérique, l'absorption de l'ammoniac a lieu dans la partie supérieure ; elle est conditionnée par un débit de condensats de procédé de 64 m<sup>3</sup>/h à une température de 46 °C, pulvérisés sur un lit d'anneaux Pall et provenant de l'absorbeur BP 022C001. Dans la partie inférieure, environ 25 m<sup>3</sup>/h de condensats circulent à une température d'environ 44 °C. Ces condensats sont refroidis dans le refroidisseur 023E012 depuis environ 61 °C à l'aide d'eau de refroidissement. La circulation est maintenue par la pompe 023P009 A/B. La pression dans

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

l'absorbeur atmosphérique 023C005 est proche de la pression atmosphérique. Le flux est refoulé par gravité depuis le bas de la colonne vers la colonne d'évent 028V001 à une température de 61 °C. Depuis la colonne d'évent 028V001, les condensats de procédé s'écoulent vers la cuve d'eau ammoniacale 028T003. Le gaz non condensé (en grande partie inerte) et une infime quantité d'ammoniac sont refoulés depuis le haut de l'absorbeur atmosphérique 023C005 vers la colonne d'évent 028V001 à une température de 46 °C.

Les conduites d'aspiration des pompes de carbamate HP 023P001 A/B sont fournies avec des soupapes de sûreté. Leur pression de consigne est de 11 bars relatifs. L'évacuation est dirigée vers la colonne d'évent 028V001. Les conduites sont maintenues chaudes et ouvertes par une injection de vapeur BP. La conduite d'aspiration de chaque pompe est reliée au circuit de condensats de vapeur maintenu par la pompe de condensats de vapeur 029P001 A/B. Le condenseur de carbamate BP 023E003 et le réservoir de niveau 023D001 peuvent être vidangés vers la cuve d'eau ammoniacale 028T003. La vidange est commandée manuellement par une vanne placée dans la conduite de vidange.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

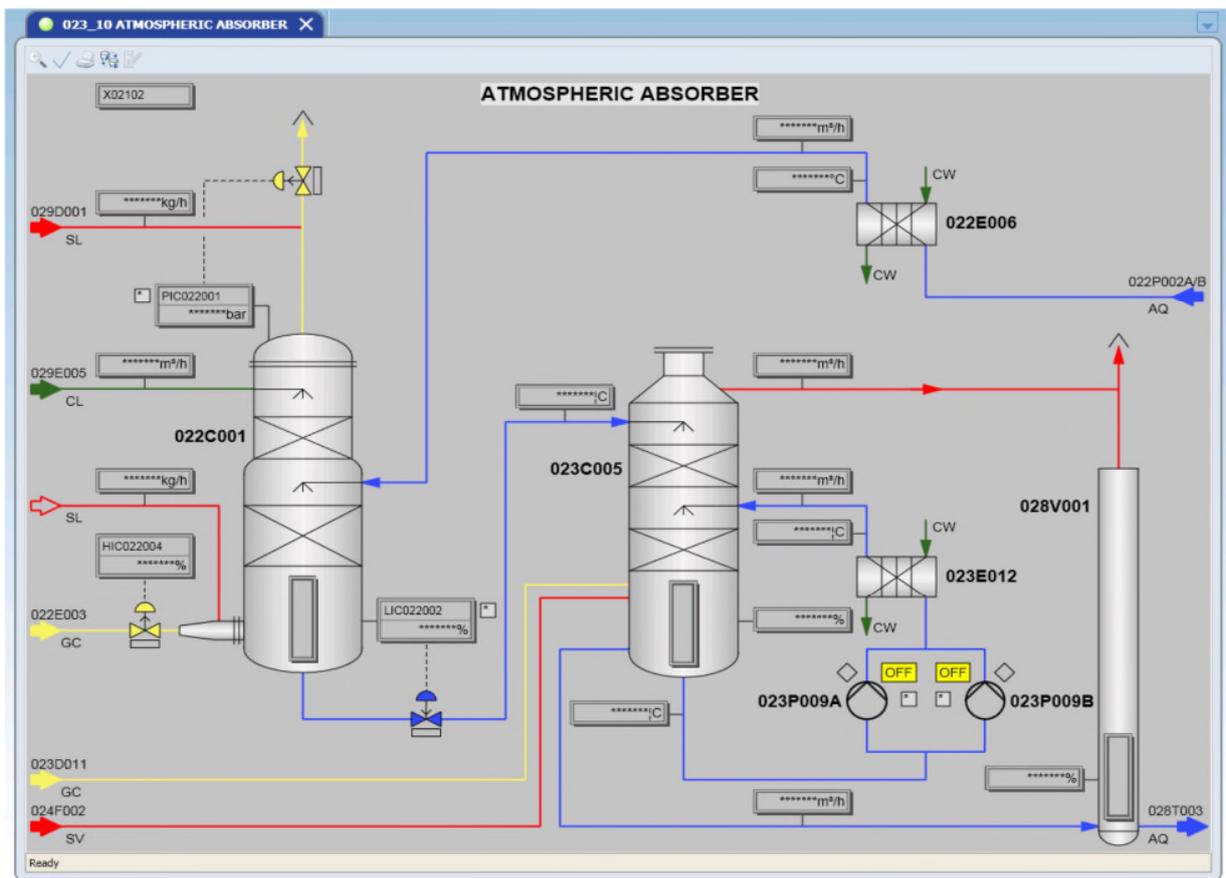


Figure IV-11: Schema de la section de recirculation (Absorbeur Atmosphérique) provenant de la salle de contrôle (DCS).

### IV-3-5- Évaporation

(Système 024, PFD N° 024-1)

La solution d'urée provenant de la colonne de rectification 023C003 est refoulée vers le ballon de détente 023F004. La pression dans le ballon de détente 023F004 est maintenue à 1,15 bars. Cela provoque la détente du liquide depuis la colonne de rectification, entraînant une baisse de la température de 135 à environ 106 °C. La concentration d'urée augmente depuis environ 68 % en poids à environ 71 % en poids.

La solution d'urée provenant de 023F004 est refoulée vers le pré-évaporateur 023E010. Dans le pré évaporateur du séparateur 023F010 en haut du réchauffeur, une pression de 0,38 à 0,39 bar est

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

maintenue. Cela entraîne la détente de la solution d'urée, suite à quoi la concentration d'urée augmente jusqu'à environ 79 % en phase liquide. La chute de température due à cette détente est compensée dans le pré-évaporateur par la vapeur BP dans la partie calandre du réchauffeur. La température est maintenue à 93 °C.

La solution d'urée est refoulée depuis le pré-évaporateur du séparateur de détente 023F010 jusqu'au compartiment I du réservoir de solution d'urée 023T002. Le gaz évacué est refoulé depuis le haut du séparateur 023F010 vers le condenseur 024E002 afin d'y être condensé. Les condensats sont refoulés vers le compartiment I du réservoir d'eau ammoniacale 028T003.

De plus, la conduite de recyclage de solution d'urée provenant de la section de granulation est reliée à l'admission de solution d'urée vers le pré-évaporateur.

Le réservoir de stockage d'urée 023T002 est divisé en deux compartiments, I et II. Un temps de séjour et une température élevés augmentent la formation de biuret et l'hydrolyse de l'urée. De ce fait, l'alimentation de l'évaporateur 024E001 provient du compartiment I. Le compartiment II agit comme un réservoir de stockage au cas où le niveau du compartiment I est trop élevé (trop-plein). C'est le cas lorsque l'évaporation est stoppée pour une courte durée tandis que la synthèse de l'urée se poursuit. Lorsque la synthèse d'urée doit être vidangée, le compartiment II sert à stocker la solution d'urée vidangée.

Les niveaux dans le réservoir de stockage 023T002 sont toujours maintenus aussi bas que possible afin d'éviter la formation de biuret et l'hydrolyse de l'urée. Une garde d'eau remplie de condensats de vapeur, située sur le toit du réservoir, protège le réservoir d'une surpression ou d'une sous-pression, outre la conduite d'évent ouverte vers la colonne 028V001.

Depuis le réservoir de stockage d'urée 023T002, la solution d'urée (à une concentration d'urée d'environ 79 % en poids) est transportée par la pompe de solution d'urée 023P003 A/B vers l'évaporateur 024E001.

La pression dans l'évaporateur du séparateur 0024F001 en haut du réchauffeur, est maintenue à 0,28 bar. L'admission d'air vers la conduite de refoulement de gaz du séparateur de l'évaporateur, influence le niveau de condensation, ce qui explique la pression dans le séparateur d'évaporation 024F001. En raison d'une basse pression, la plus grande partie de l'eau s'évapore et la concentration augmente de 79 à 96-97 % en poids. Afin de compenser la perte de chaleur due à la



## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

inférieure du séparateur, via deux petites garnitures dans l'anneau. Les aubes, tout comme l'anneau, doivent être rincées toutes les 8 heures. Pour ce faire, un pulvérisateur conique et une rampe d'aspersion sont installés. Les condensats de procédé provenant de la pompe d'alimentation de l'absorbeur BP 022P002 A/B servent de liquide de rinçage. De plus, un raccordement à la solution d'urée est installé, ce qui permet de rincer sans perturbation importante de la pression dans le séparateur ; et, en raison d'une meilleure solubilité des sédiments solides contenus dans l'urée, il permet également un meilleur nettoyage du séparateur. Depuis le séparateur 024F001, les vapeurs sont refoulées vers le condenseur 024E002. Celles-ci, avec les vapeurs provenant du séparateur 023F010, sont refroidies par de l'eau de refroidissement pure et, en majeure partie, condensées dans la partie calandre du condenseur. Les condensats sont refoulés vers le compartiment I du réservoir d'eau ammoniacale 028T003, à travers une colonne barométrique à une température d'environ 52 °C. Le gaz non condensable est refoulé, avec la vapeur utilisée dans l'éjecteur 024F002, vers l'absorbeur atmosphérique 023C005.

### **IV-3-6-Desorption et hydrolyse**

#### **(Système 028, PFD N° 028-1)**

Les condensats de procédé contiennent du NH<sub>3</sub>, du CO<sub>2</sub> et de l'urée. Ils peuvent occasionnellement venir de différentes parties de l'installation, mais les principaux flux de condensats de procédé proviennent en continu de l'absorbeur atmosphérique 023C005 via la colonne d'évent 028V001, à un débit d'environ 68 m<sup>3</sup>/h, et du condenseur d'évaporation 024E002 à un débit d'environ 66 m<sup>3</sup>/h ; ils sont collectés dans le réservoir d'eau ammoniacale 028T003 dans les compartiments II et I, respectivement.

Les condensats de procédé sont introduits dans l'unité de désorption / hydrolyse où ils sont traités dans deux désorbeurs et un hydrolyseur afin d'éliminer l'urée et de récupérer l'ammoniac et le dioxyde de carbone. Les condensats de procédé traités quittant le refroidisseur de démarrage 028E001 sont refoulés vers les limites de l'installation. Lorsque les condensats de procédé traités contiennent des concentrations trop importantes d'ammoniac et / ou d'urée, il est possible de les recycler vers le réservoir d'eau ammoniacale 028T003. Les vapeurs provenant du premier désorbeur 028C002 sont condensées dans le condenseur de reflux 028E004. Les condensats sont

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

en partie utilisés comme reflux dans le désorbeur 028C002 ; la solution pauvre en carbamate restante est recyclée vers le condenseur de carbamate basse pression 023E003.

### **IV-3-6-1-Stockage des condensats de procédé**

Le réservoir d'eau ammoniacale 028T003 contient trois compartiments : le compartiment I d'une capacité de 40 m<sup>3</sup>, le compartiment II d'une capacité de 40 m<sup>3</sup>, et le compartiment III d'une capacité de 818 m<sup>3</sup>. Les cloisons séparant le réservoir en trois compartiments ont des trous d'un diamètre de 100 millimètres. Le réservoir est fourni avec un trop-plein conduisant à une cuve étanche et, de là, l'écoulement se dirige vers l'égout. Une garde d'eau est placée sur le toit du réservoir afin de protéger le réservoir d'une sur-pression ou sous-pression, en plus de la conduite d'évent reliée à la colonne d'évent 028V001. L'eau de la garde est alimentée via la conduite provenant de la pompe d'alimentation de l'absorbeur BP 022P002 A/B.

Le compartiment I reçoit des condensats de :

- Condenseur 024E002.
- Regard de trop-plein / garde d'eau.
- Appoint d'eau provenant de l'extérieur du périmètre de l'installation.
- Conduites de débit minimum provenant de 022P002 A/B.

Le compartiment II reçoit les flux suivants :

- Trop-plein provenant de la colonne d'évent 028V001 (023C005)
- Déversement revenant de la pompe d'alimentation du désorbeur 028P003 A/B
- Condensats de procédé recyclés provenant de 028E001 pendant la stabilisation de la section de désorption.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

Le compartiment III agit comme un compartiment de vidange et reçoit les flux suivants :

- Depuis le condenseur de reflux 028E004 et le condenseur de reflux du réservoir de niveau 028D001 en cas de vidange de la section de synthèse.
- Depuis la pompe d'ammoniac HP 021P002 A/B lorsqu'elle a été rincée.

Depuis le compartiment I, la pompe d'alimentation de l'absorbeur BP 022P002 A/B fournit le débit de condensats de procédé requis à l'absorbeur BP 022C001. Le débit (61 m<sup>3</sup>/h normalement). La pompe d'alimentation 022P002 A/B fournit également des condensats de procédé au séparateur d'évaporation 024F001 en cas de rinçage des parties internes du séparateur.

La conduite d'aspiration de la pompe du désorbeur 028P003 A/B est reliée au compartiment II. Outre l'alimentation du premier désorbeur 028C002, la pompe fournit 4,5 m<sup>3</sup>/h de condensats de procédé au condenseur du ballon de détente 023E011, et 4,5 m<sup>3</sup>/h au condenseur de carbamate BP. Si nécessaire, il est possible qu'elle fournisse des condensats de procédé au condenseur de reflux 028E004.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

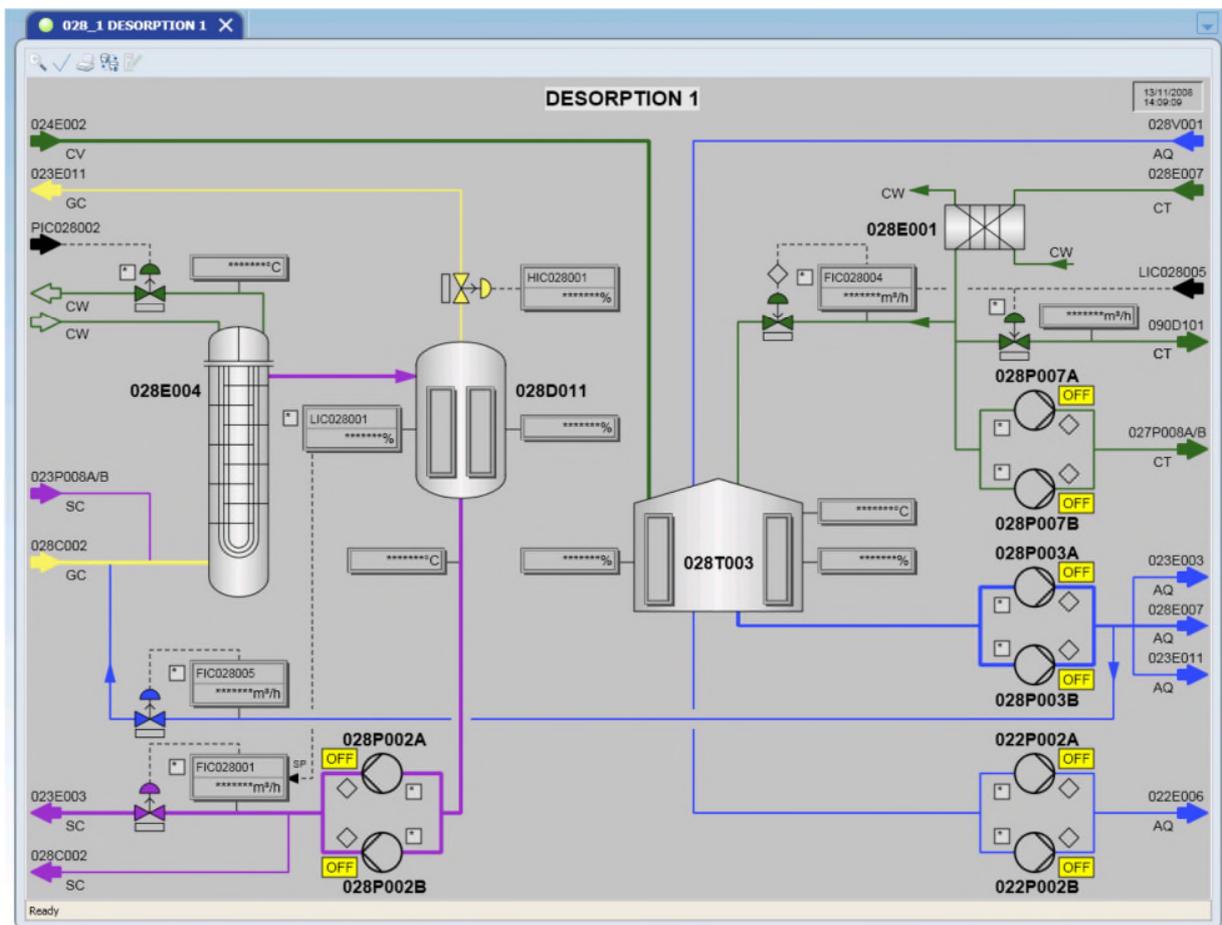


Figure IV-13: Schema de la section de désorption 1 provenant de la salle de contrôle (DCS).

### IV-3-6-2-Premier désorbeur 028C001

La pompe d'alimentation du désorbeur 028P003 A/B fournit des condensats de procédé au premier désorbeur 028C002. Le débit est à environ  $59 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'alimentation passe par l'échangeur de chaleur du désorbeur 028E007, où la température est élevée d'environ  $61 \text{ }^\circ\text{C}$  à environ  $117 \text{ }^\circ\text{C}$ . L'échangeur de chaleur dispose d'une dérivation permettant de réguler manuellement la température d'alimentation du premier désorbeur. L'alimentation pénètre dans le premier désorbeur au niveau du tuyau de descente du second plateau.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

Le premier désorbeur 028C002 est équipé de 15 plateaux-tamis. Tout en descendant la colonne, la température des condensats de procédé augmente grâce aux vapeurs ascendantes provenant du second désorbeur 028C004 et aux vapeurs provenant de l'hydrolyseur supérieur 028C003. Cela provoque la désorption du  $\text{NH}_3$  et du  $\text{CO}_2$ . La quantité de  $\text{NH}_3$  chute de 5,3 % en poids dans l'alimentation à 0,4 % en poids en quittant le bas du premier désorbeur 028C002 pour l'hydrolyseur 028C003.

Un reflux est ajouté en direction du plateau supérieur afin de contrôler le pourcentage d'eau dans la sortie de gaz en haut du premier désorbeur à environ 46 % en poids. Le reflux provient du condenseur de reflux du réservoir de niveau 028D001 via la pompe de reflux 028P002 A/B. Le débit du reflux, dans des conditions normales de fonctionnement, est de  $5,2 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Le produit du bas du premier désorbeur 028C002, à une température d'environ  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  est refoulé par la pompe d'alimentation de l'hydrolyseur 028P006 A/B vers l'hydrolyseur 028C003 via l'échangeur de chaleur de l'hydrolyseur 028E021.

### **IV-3-6-3-Hydrolyseur 028C003**

Le flux d'alimentation de l'hydrolyseur 028C003 échange de la chaleur avec l'effluent du bas de l'hydrolyseur dans l'échangeur de chaleur de l'hydrolyseur 028E021. La température d'alimentation augmente d'environ  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  à environ  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . L'orifice d'admission est situé en haut du premier plateau. La colonne est équipée de 12 plateaux-tamis avec des tuyaux de descente, afin d'assurer un bon contact entre le liquide et les vapeurs du procédé. La colonne est presque complètement remplie de liquide, à l'exception de l'espace situé au-dessus du premier plateau. Pendant le temps de séjour d'environ une heure, toute l'urée présente dans l'alimentation est hydrolysée à une température moyenne de  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . La chaleur nécessaire à l'hydrolyse et au maintien d'une température d'environ  $202 \text{ }^\circ\text{C}$ , dans le haut de l'hydrolyseur 028C003 est fournie par la vapeur HP provenant du périmètre de l'installation, à 20 bars et une température de  $338 \text{ }^\circ\text{C}$ . La vapeur est alimentée par en dessous le plateau 12, dans le bas de la colonne.

La pression dans la colonne est contrôlée à 18,1 bars.

La température de l'effluent du bas est de  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  avant l'échangeur de chaleur de l'hydrolyseur 028E021. Après l'échange de chaleur avec le flux d'alimentation, la température chute à environ

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

150 °C. L'hydrolyseur est équipé d'une soupape de sûreté, réglée à une pression de 26 bars relatifs et installée en aval de la tubulure d'admission du liquide provenant de 028P006 vers l'hydrolyseur 028C003.

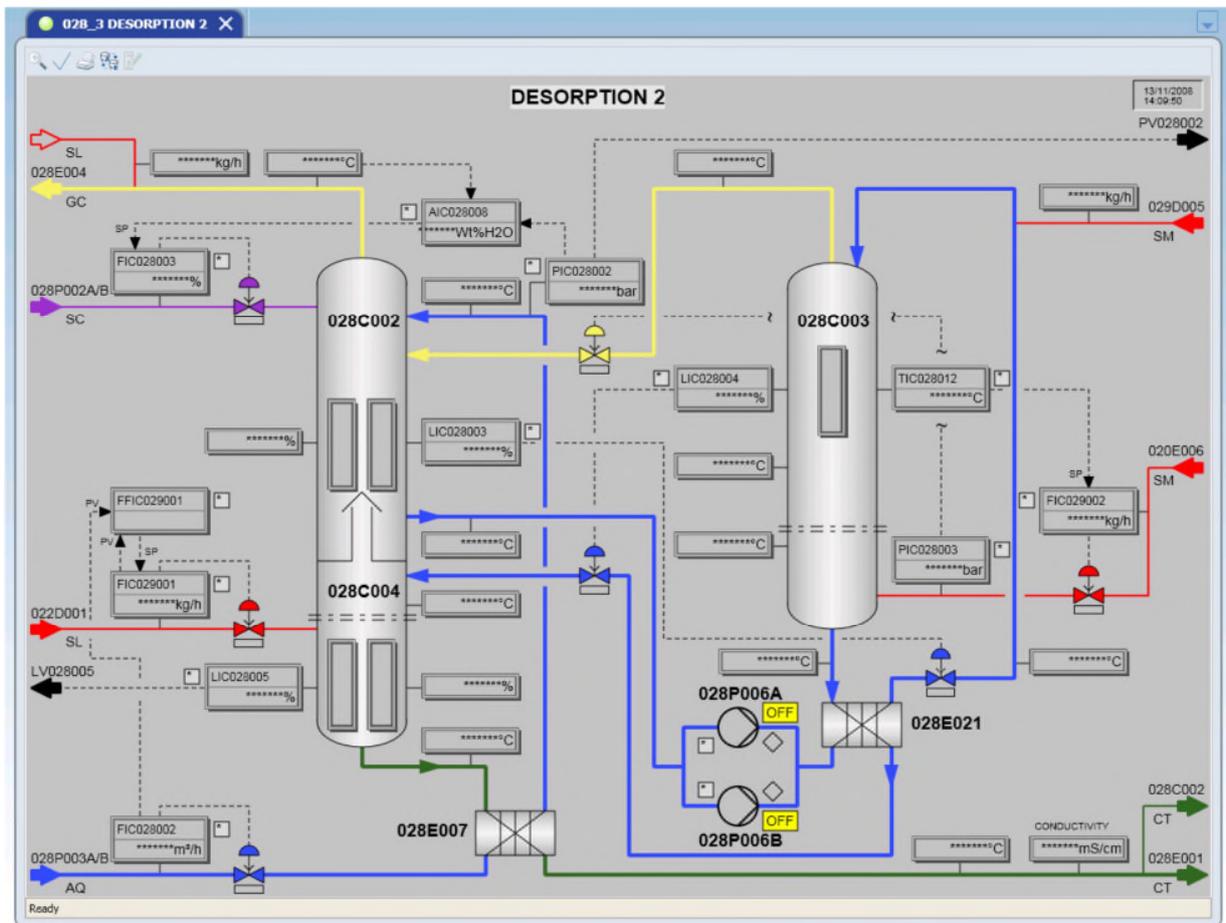


Figure IV-14: Schema de la section de désorption 2 provenant de la salle de contrôle (DCS).

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### **IV-3-6-4-Second désorbeur 027C004**

Le second désorbeur 028C004 est équipé de 21 plateaux-tamis. L'alimentation provenant de l'hydrolyseur 028C003 pénètre dans la colonne au niveau du plateau 1 situé en haut. La température du flux d'alimentation est d'environ 140 °C (après évacuation à la pression de la colonne du désorbeur). La chaleur nécessaire à la désorption est fournie par la vapeur BP. Le flux de vapeur pénètre dans le second désorbeur en dessous du plateau 21. Le rapport débit de vapeur / débit d'alimentation est normalement de 0,22 à 0,24. Le liquide descend par la colonne et la vapeur ascendante réduit la teneur en NH<sub>3</sub> du flux provenant de l'hydrolyseur à moins d'1 ppm.

Le gaz provenant du second désorbeur 028C004 est refoulé vers le premier désorbeur 028C002 à une température moyenne de 140 °C et pénètre dans la colonne en dessous du plateau du bas. L'effluent du bas du désorbeur 028C004, contenant 1 ppm de NH<sub>3</sub> et 1 ppm d'urée, a une température d'environ 143 °C. Il échange de la chaleur avec le flux d'alimentation du premier désorbeur 028C002 dans l'échangeur de chaleur 028E007, où la température baisse à environ 92 °C. Dans le refroidisseur de démarrage 028E001, l'effluent du bas échange de la chaleur avec l'eau de refroidissement pure. La température chute à environ 45 °C.

Environ 33 m<sup>3</sup>/h de l'effluent du bas sont utilisés dans l'unité de granulation, en grande partie comme appoint d'eau pour le système de lavage. La partie restante, après le refroidissement dans le refroidisseur de démarrage 028E001, est transférée en dehors du périmètre de l'installation. Dans le refoulement de l'échangeur de chaleur du désorbeur 028E007, un analyseur de conductivité est installé, avec une alarme de conductivité haute.

### **IV-3-6-5-Reflux du désorbeur**

Les vapeurs de tête du premier désorbeur 028C002 sont refoulées vers le condenseur de reflux 028E004 afin d'y être condensées en quasi-totalité. Un débit d'environ 10 m<sup>3</sup>/h de carbamate régénéré provenant du réservoir de niveau 023D011, via la pompe de carbamate pur 023P008 A/B. Le carbamate régénéré s'écoule depuis le condenseur de reflux 028E004 dans le condenseur de reflux du réservoir de niveau 028D001. Depuis le réservoir de niveau, le carbamate régénéré est transporté par la pompe de reflux 028P002 A/B vers le haut du premier désorbeur 028C002 et vers le condenseur de carbamate BP 023E003. Le débit est normalement d'environ 16,7 m<sup>3</sup>/h. Le débit

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

du reflux allant vers le premier désorbeur 028C002 est normalement de 5,2 m<sup>3</sup>/h. Afin d'éviter une obturation de la conduite d'alimentation en reflux du premier désorbeur 028C002, un faible débit est maintenu.

La chaleur de la condensation est éliminée du condenseur de reflux 028E004 avec de l'eau de refroidissement, et influence le degré de condensation du gaz provenant du premier désorbeur 028C002, ce qui explique la pression dans la section de désorption.

Le gaz évacué du réservoir de niveau 028D001 est refoulé vers le condenseur du ballon de détente 023E011. Le condenseur de reflux du réservoir de niveau 028D001 ainsi que le condenseur de reflux 028E004 sont équipés d'une conduite de vidange vers le réservoir d'eau ammoniacale 028T003, compartiment III.

### **IV-3-7-Granulation**

**(Système 027, PFD 027-1 et 027-2)**

Fondamentalement, le granulateur, composé d'une partie inférieure 027R001 A et d'une partie supérieure 027R001 B, est une cuve vide qui contient une couche fluidisée de particules d'urée.

Il se compose de :

- La plaque perforée.
- Le cuvelage inférieur (027R001 A).
- Les collecteurs d'injection.
- Le cuvelage supérieur (027R001 B).

L'air de fluidisation (courants N° 027-822, 027-823, 027-824, 027-825, 027-826) fourni dans le cuvelage inférieur est uniformément distribué par la plaque perforée, suspend les solides dans le cuvelage supérieur 027R001 B, puis s'échappe en haut du granulateur 027R001B (courants N° 027-804, 027-831). Ce courant d'air est chargé de poussière d'urée et il passe ensuite au traitement ultérieur dans le laveur 027C001.

La couche fluidisée a une épaisseur de 0,5 à 2 m ; elle est restreinte par la partie inférieure du cuvelage supérieur, lequel est divisé en sept sections verticalement.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

Les semences sont introduites dans la première section du cuvelage supérieur, chambre 1 et chambre 2, où elles sont pulvérisées avec une solution d'urée. Tandis que les granulés se déplacent de la chambre 1 à la chambre 2, à la chambre 3 et puis 4, leur taille augmente en permanence par accrétion, comme expliqué précédemment. Ils atteignent le diamètre requis, et le produit est évacué du granulateur.

Dans les chambres 5 à 7, les granulés ne seront plus pulvérisés d'urée ; elles servent uniquement de chambres de conditionnement et de refroidissement.

L'urée utilisée comme stock d'alimentation est, typiquement, une solution d'urée à 96 %-97 % en poids qui contient du formaldéhyde. Le formaldéhyde, qui est ajouté dans le procédé sous forme de précondensats d'urée / formaldéhyde (urée formaldéhyde 85 par exemple), remplit deux fonctions :

- Il est nécessaire comme aide à la granulation.
- Il sert d'agent anti-agglomérant.

La solution alimentée est finement atomisée au moyen de 400 gicleurs situés sur 16 collecteurs d'injection (4 collecteurs dans chacune des chambres de granulation), lesquels sont actionnés par de l'air d'atomisation (courants N° 027-829) dans la couche du lit.

### **IV-3-7-1-Usage de la Solution de Formaldéhyde UF-80**

Le méthanal ou formaldéhyde ou aldéhyde formique ou formol est un composé organique de la famille des aldéhydes, de formule chimique  $\text{CH}_2\text{O}$ .

- Formaldéhyde 57%,
- Urée 23%
- Eau 20%

(Source Limitrophe externe par camion-citerne)

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

- Formule :  $\text{CH}_2\text{O}$ .
- Densité :  $815,30 \text{ kg/m}^3$
- Point d'ébullition :  $-19 \text{ }^\circ\text{C}$
- Nom IUPAC : M é t h a n a l
- Masse molaire :  $30,031 \text{ g/mol}$
- Point de fusion :  $-92 \text{ }^\circ\text{C}$
- Solubilité : Eau



Figure IV-15: Représentation de la molécule de Formaldéhyde.

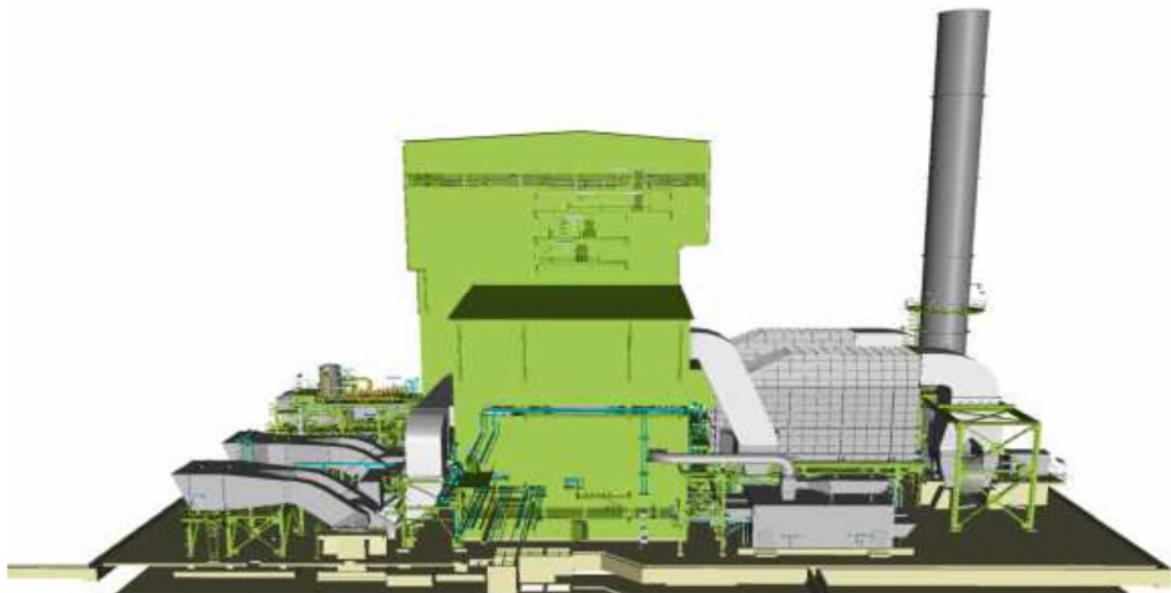


Figure IV-16: Unité de granulation en 3D.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.



**Figure IV-17: Unité de granulation.**

### **IV-3-7-2-Circuit des solides**

**(PFD N° 027-1, 027-2)**

Le granulateur 027R001A (partie inférieure) reçoit la solution de départ (courants N° 027-803) provenant de la pompe d'alimentation en urée 027P001A/B dans l'unité de solution d'urée. La solution de formaldéhyde (courants N° 027-802), puisée dans le réservoir d'urée formaldéhyde 027T007, est dosée par la pompe d'urée formaldéhyde 027P002A/B et ajoutée à la solution d'urée. Le point d'injection préféré se situe au niveau de l'aspiration de la pompe d'alimentation en urée 027P001 A/B afin de garantir un mélange efficace des deux fluides. En fonction des conditions de fonctionnement, il est possible d'ajouter jusqu'à 30 % du total d'urée formaldéhyde 85 directement dans le second point d'injection, en amont du filtre à urée fondue 027F006 A/B.

Lorsque de l'urée formaldéhyde est ajoutée à deux points d'injection, les deux pompes volumétriques 027P002A/B sont en fonctionnement ; lorsque de l'urée formaldéhyde est ajoutée

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

au niveau de la pompe d'alimentation en urée 027P001A/B uniquement, seule l'une des pompes volumétriques 027P002A/B est en fonctionnement.

La solution d'urée contenant du formaldéhyde, à une concentration de 96 à 97 % en poids, est alimentée par le filtre à urée fondue 027F006 A/B avant d'être distribuée vers les collecteurs d'injection puis pulvérisée avec de l'air d'atomisation. L'air d'atomisation est fourni comprimé depuis le ventilateur d'air d'atomisation 027K002 (courants N° 027-829).

L'air d'atomisation est de l'air ambiant (courants N° 027-827) qui est réchauffé après compression à 132-135 °C dans le réchauffeur d'air d'atomisation du granulateur 027E002 (courants N° 027-829).

Le réchauffeur fonctionne avec de la vapeur à 9 bars.

L'air de fluidisation du granulateur, également de l'air ambiant (courants N° 027-821), est comprimé dans le ventilateur de fluidisation du granulateur 027K001 et envoyé au granulateur (courants N° 027-822, 027-823, 027-824, 027-825, 027-826).

La température de l'air de fluidisation fourni au granulateur permet de contrôler l'équilibre de chaleur du granulateur et dépend des conditions de l'air ambiant ainsi que de la capacité de l'installation. Pour ces raisons, le circuit d'air de fluidisation du granulateur est équipé des dispositifs suivants

- La partie de l'air de fluidisation total qui est utilisée dans les quatre premières chambres de granulation (courants N° 027-822, 027-823, 027-824, 027-825) peut être chauffée à l'aide des réchauffeurs 027E001A/B/C/D.
- Le reste de l'air qui est envoyé vers les chambres de refroidissement N° 5, 6 et 7 (courants N° 027-826) n'est soumis à aucun chauffage supplémentaire.

027E001A/B/C/D fonctionnent avec de la vapeur à 4,4 bars, mais il est également possible de raccorder les réchauffeurs à une pression de vapeur de 9 bars.

Lorsque l'air ambiant est particulièrement froid et / ou humide, ou que l'unité fonctionne en capacité réduite et / ou lors du démarrage de l'unité, les réchauffeurs 027E001A/B/C/D doivent

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

être mis en service, habituellement avec de la vapeur à 4,4 bars. La vapeur à 9 bars est exclusivement utilisée dans des conditions de démarrage.

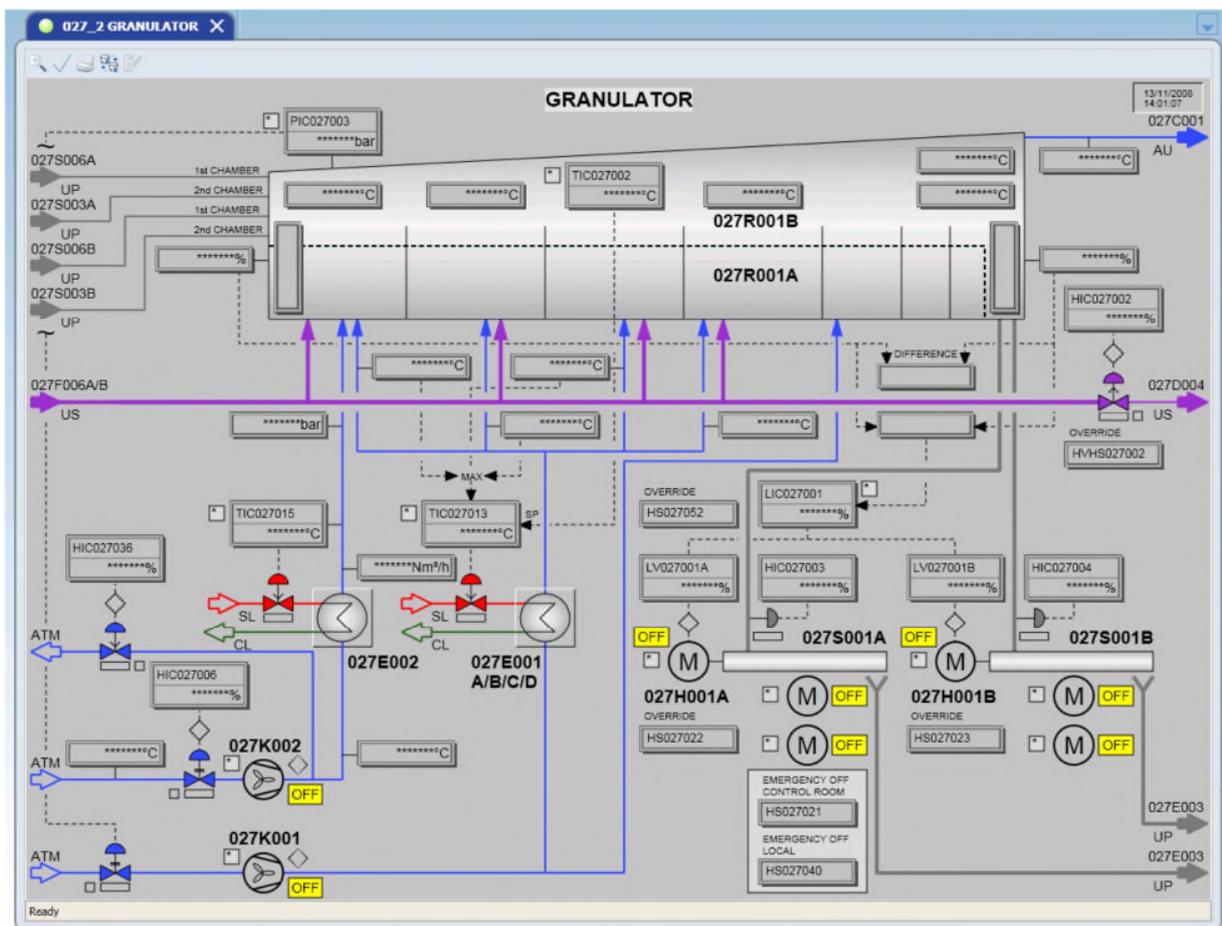


Figure IV-18: Schema de la section de granulation provenant de la salle de contrôle (DCS).

L'urée granulaire extraite par les extracteurs vibrants 027H001A/B s'écoule à travers les cribles de sécurité du granulateur 027S001A/B, lesquels tamisent tous les blocs et plus gros agglomérats supérieurs à 10 mm (taille standard). La fraction des blocs est introduite dans le réservoir de recyclage 027D004 et le produit tombe dans le premier refroidisseur du lit fluidisé 027E003.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

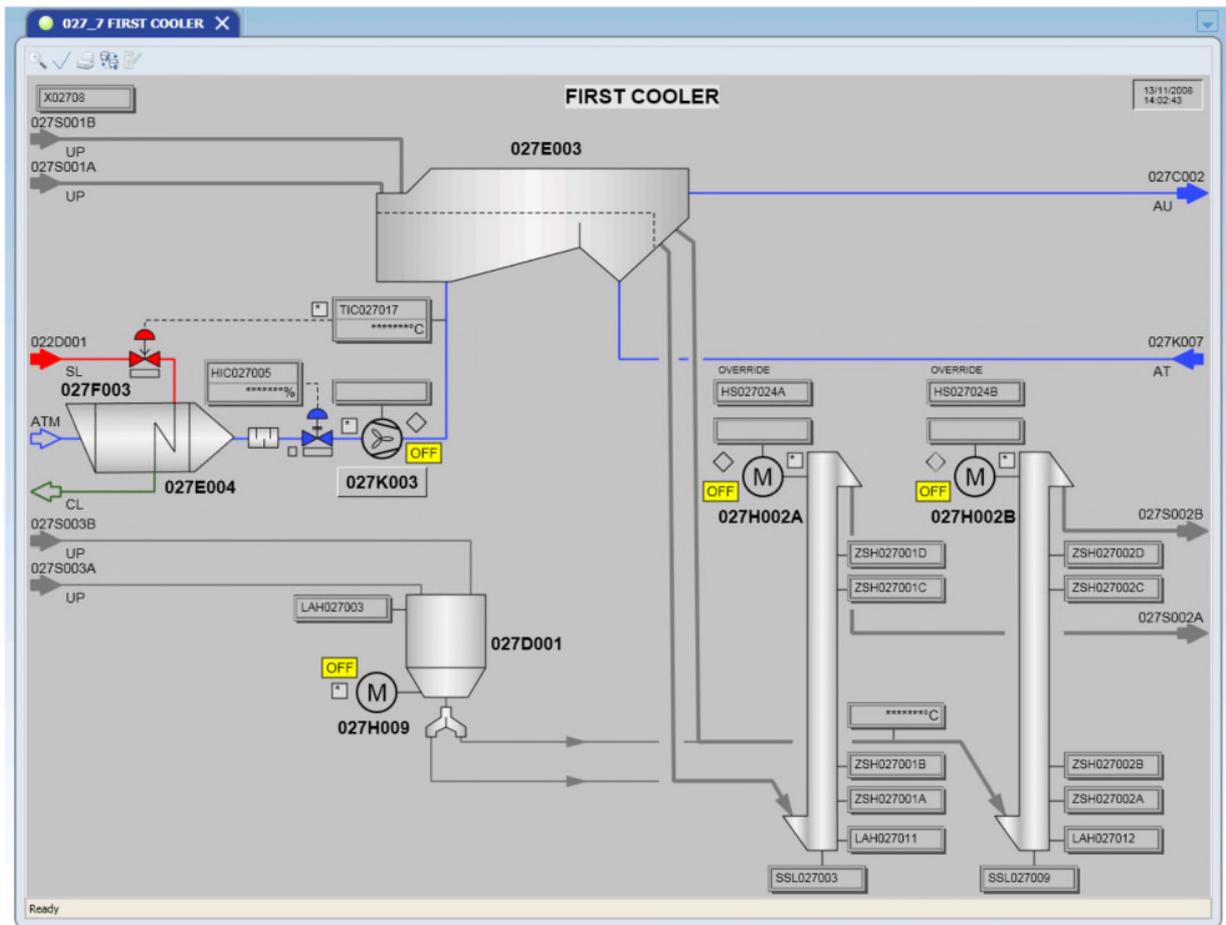
Le premier refroidisseur 027E003 est un refroidisseur de lit fluidisé qui est divisé en deux tables. Dans la première table, de l'air ambiant est fourni par le ventilateur de fluidisation 027K003 (courants N° 027-843) puis utilisé comme fluide de refroidissement. Dans le cas où l'air ambiant est particulièrement humide, froid ou lorsque l'unité fonctionne à capacité réduite, il est possible d'utiliser le réchauffeur 027E004 afin de réduire l'humidité relative de l'air.

La seconde table du refroidisseur 027E003 utilise une partie de l'air traité qui est préparé pour le refroidisseur final à lit fluidisé 027E007. Ce courant d'air (courants N° 027-850) est pris comme un courant latéral du courant de refoulement du ventilateur final d'air de fluidisation du refroidisseur 027K007.

Le total de l'air de fluidisation du refroidisseur 027E003 s'échappe vers la colonne 027V001 et l'atmosphère via le laveur 027C002 (courants N° 027-806, 027-851) à l'aide du ventilateur 027K005 (courant N° 027-856, 027-857).

Les granulés d'urée refroidis dans le premier refroidisseur (courant N° 027-807) à la température intermédiaire requise de 60 °C, sont hissés à l'aide d'élévateurs à godets 027H002A/B vers la section de tamisage 027S004A/B/C/D ; là, ils sont classés en trois catégories : trop grands, trop petits et bonne taille.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.



**Figure IV-19: Schema de la section de granulation (1er refroidisseur) provenant de la salle de contrôle (DCS).**

La fraction à la bonne taille (courants N° 027-811) est envoyée vers le refroidisseur final à lit fluidisé, puis est transférée pour stockage via 027H013.

La fraction trop petite (courants N° 027-809) est recyclée directement vers la partie supérieure du granulateur 027R001B, tandis que la fraction trop grande (courants N° 027-808) est tout d'abord broyée dans les broyeurs à cylindres 027S006A/B, avant d'être réintroduite dans le granulateur comme semences.

Le rapport débits trop petits + trop grands sur débit bonne taille, est le rapport de recyclage de solides et il est environ de 0,5.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

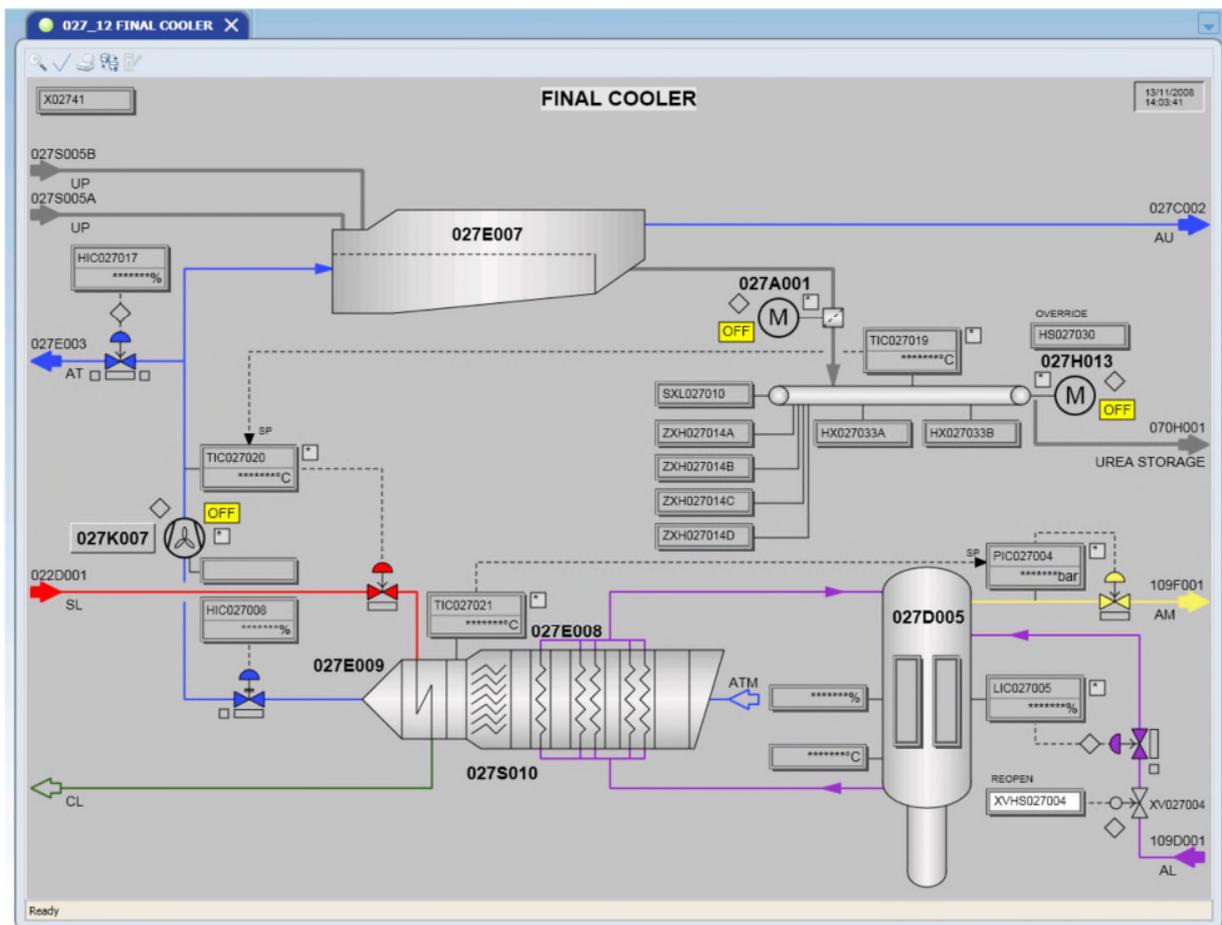


Figure IV-20: Schema de la section de granulation (2eme refroidisseur) provenant de la salle de contrôle (DCS).

Le refroidisseur final 027E007 est un refroidisseur standard à lit fluidisé. De l'air traité fourni par le ventilateur de fluidisation 027K007 (courants N° 027-849) est utilisé comme fluide de refroidissement. L'air est traité afin d'éviter au produit d'absorber de l'humidité pendant le refroidissement. L'air ambiant est tout d'abord réfrigéré à 6 °C dans l'unité de refroidissement d'air afin d'éliminer l'humidité excessive. Le liquide réfrigérant est de l'ammoniac à 1 °C. Des gouttelettes d'eau sont séparées dans 027S010. L'air est ensuite réchauffé dans le réchauffeur 027E009 à environ 11 °C (courants N° 027-848) et utilisé comme fluide de refroidissement dans le refroidisseur final à lit fluidisé 027E007 (courants N° 027-849). Comme déjà mentionné, une

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

partie de cet air traité est envoyée vers la seconde table du premier refroidisseur à lit fluidisé 027E003 (courants N° 027-850).

L'air de fluidisation des deux refroidisseurs s'échappe à travers le laveur 027C002 (courants N° 027-854 et 027-855) via le ventilateur d'échappement du laveur du refroidisseur 027K005 à l'air libre (courants N° 027-856, 027-857).

Les granulés d'urée refroidis (courants N° 027-13) sont envoyés au stockage via le transporteur à courroie 027H013.

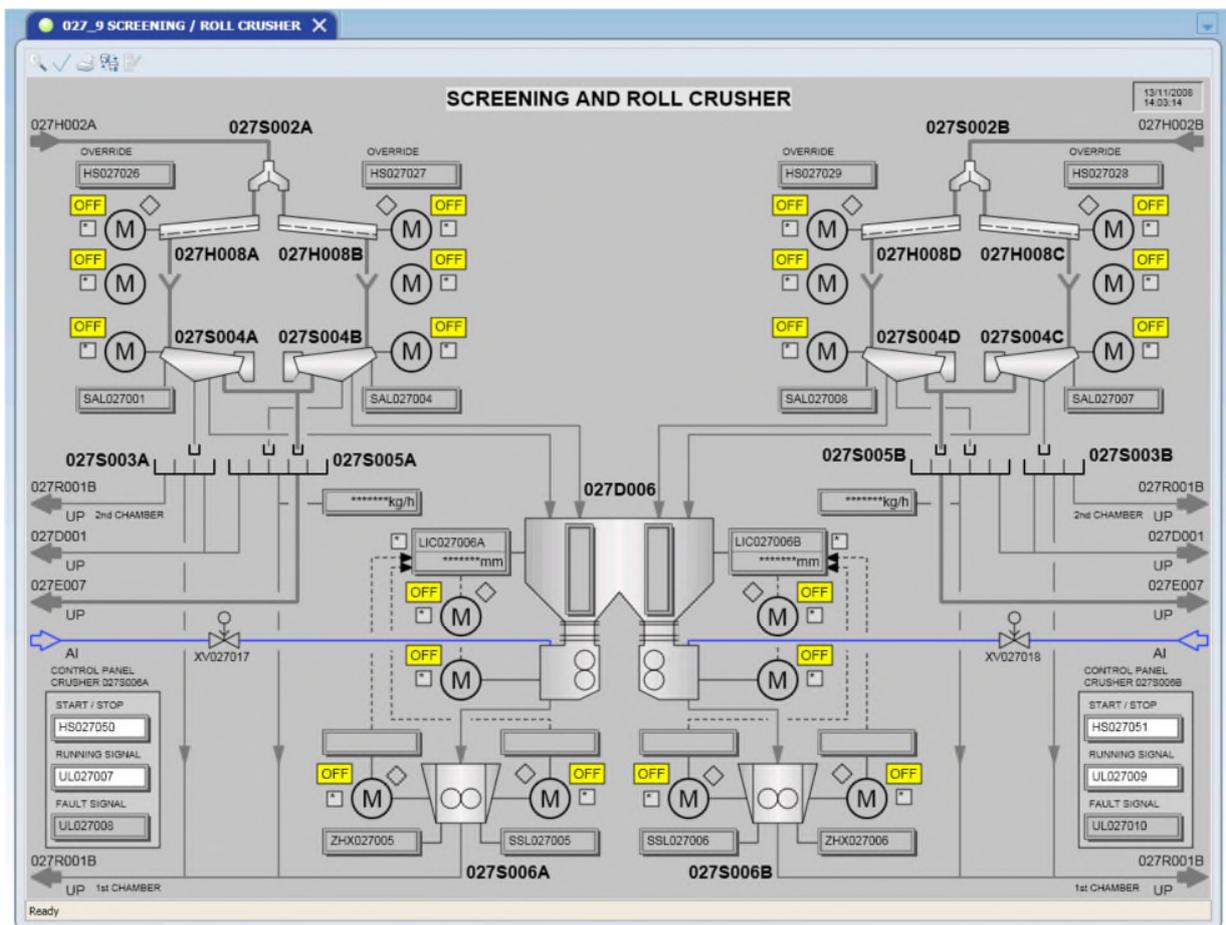


Figure IV-21: Schema de la section de granulation final provenant de la salle de contrôle (DCS).

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

### **IV-3-8-Vapeur et condensation**

(Système 029)

Les circuits principaux du complexe :

- Circuit de vapeur HP a une pression de 25 bars absolus et une température de 343°C.
- Circuit de vapeur MP a une pression de 9 bars absolus et une température de 175°C.
- Circuit de vapeur LP a une pression de 4,4 bars absolus et une température de 147°C.

La vapeur HP est utilisée pour :

- Le décomposeur ( S t r i p p e r )
- La vapeur d'appoint pour les circuits de vapeur MP et LP

La vapeur MP est utilisée pour : le dessalement

La vapeur LP pour la purge uniquement.

Condensat de vapeur :

Les condensats collectés du complexe sont utilisés pour servir les différents besoins de procédés (rinçages ; produire des vapeurs .....etc.).

### **IV-4-Stockage et chargement d'urée**

(Unité 070, 072 et 073)

L'Urée produite dans l'unité de granulation 027 est soit acheminée jusqu'à l'unité de stockage en vrac 072, soit envoyée directement à l'unité de chargement des camions 073.

En dehors de l'unité de stockage en vrac 072, l'Urée est récupérée par un appareil de reprise à portique, puis envoyée à l'unité de chargement de camions 073.

Dans l'Unité de chargement des camions, l'Urée est envoyée dans deux trémies tampon.

De là, le chargement peut se faire soit via les bascules de pesée par camions, soit directement à partir des trémies tampon, sans passer par les bascules de pesée par camions.

## Chapitre IV : Procédés de synthèse de l'urée dans le complexe Pétrochimique.

Pour éviter l'intrusion de poussière dans l'Unité de chargement des camions, un système de dépoussiérage est prévu.



**Figure IV-22: Unité de stockage d'urée.**

### **IV-5-Conclusion**

Ce stage, effectué au niveau du complexe des fertilisants d'Algérie SORFERT, s'est traduit par une riche expérience qui nous a permis de mettre en exergue nos connaissances théoriques et de développer, ainsi, nos acquis. Il nous a, par ailleurs, ouvert une vision large du domaine industriel et principalement celui relatif à notre spécialité.

il nous a également donné l'occasion de découvrir les capacités dont dispose notre pays à travers notamment la qualité de l'encadrement humain et les disponibilités matérielles en appliquant un de nouveaux procédés au domaine de la production d'ammoniac et d'engrais fertilisants précisément l'urée.

# *Chapitre V*

# Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

## V-1-Introduction

Le terme compresseur désignera toute machine mécanique destinée à réaliser un accroissement de pression d'un fluide à l'état gazeux. Donc on transforme l'énergie mécanique reçue en énergie de pression.

## V-2- Différents types des compresseurs

Les machines de compression reçoivent de nombreux noms qui ne sont pas liés à leur conception et leur technologie, mais à leur utilisation, qu'elle soit industrielle ou domestique : ventilateurs, soufflantes, surpresseurs, boosters, compresseurs, pompes à vide, roots, etc. La littérature divise ces machines en deux grandes familles :

- les compresseurs "volumétriques"
- les compresseurs "dynamiques"

### V-2-1-Compresseurs volumétriques

Ils sont eux-mêmes subdivisés en deux familles :

- **les compresseurs alternatifs** qui incluent les compresseurs à piston et les compresseurs à membrane. Les compresseurs à piston ont un mode de compression pratiquement isentropique mais ne possédant pas de mécanisme à vitesse constante, ils ont des éléments présentant du frottement, et, les clapets servant au transvasement ont des fonctionnements plutôt sévères. Cette particularité, en plus du mouvement alternatif, limite en application industrielle les possibilités de ce type de machine en débit.

- **les compresseurs rotatifs** type Roots (ou à lobes), à vis, à palettes, à becs, à anneau liquide, etc. Les particularités mécaniques de ces différentes machines les ont rendues efficaces sur des services assez spécifiques. L'air service pour les compresseurs à vis par exemple, ou certains cycles froids ; le vide pour les compresseurs type Roots à anneau liquide ou à becs, certains gaz pour les palettes glissantes. Des technologies de parties mobiles sans contact permettent des débits non négligeables par le moyen de vitesses de rotation élevées.

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

### **V-2-2-Compresseurs dynamiques**

Dans ces machines, l'énergie est transférée au gaz par l'intermédiaire d'un aubage animé d'un mouvement rotatif, ce qui confère à ces machines le nom de "rotodynamique" (dans les "techniques de l'ingénieur"). La forme du trajet du fluide les classent comme pour les pompes en :

- machines centrifuges (radial flow), où le gaz sort de l'aubage dans un champ perpendiculaire à l'axe de rotation.
- machines axiales (axial flow), où le gaz sort de l'aubage dans une direction générale parallèle à l'axe de rotation.
- machines hélico-centrifuges (mixed flow) où le gaz sort de l'aubage dans une direction intermédiaire aux deux précédentes.

Ces dernières machines, peu présentes en industrie de procédé, se rencontrent parfois sur des compresseurs de transport par gazoduc.

### **V-2-3-Présentation générale d'un compresseur Centrifuge**

Un compresseur centrifuge est une machine rotative tournant à vitesse élevée (de 6000 à 30000 tr/min) dans laquelle une ou plusieurs roues fournissent l'énergie nécessaire au transfert du gaz.

On trouve ainsi des compresseurs centrifuges à :

- 1 étage pour les compresseurs de recyclage (reformage ou recyclage d'ammoniac sur la synthèse).
- 2 étages pour les compresseurs de transfert tels que le craquage catalytique, compression de chlore, ...
- 5 étages et 3 corps pour les compresseurs de synthèse d'ammoniac ou de gaz craqué de vapocraqueurs.
- 2 à 4 étages pour la compression de l'air service ou instrument.

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

Sur site, un compresseur centrifuge forme avec ses annexes, un ensemble qui comprend :

- Le compresseur lui-même.
- Le dispositif d'entraînement.
- Un ensemble d'équipements auxiliaires.

### **a) Le compresseur**

Extérieurement un compresseur centrifuge se présente généralement sous la forme d'une machine à un ou plusieurs corps. Le nombre de corps mis en œuvre dépend du taux de compression.

Le corps est à plan de joint horizontal quand la pression est inférieure à 35-40 bars, il est à plan joint vertical (on dit communément compresseur de type « BARREL ») pour les pressions plus élevées.

### **b) Le dispositif d'entraînement**

Les compresseurs centrifuges peuvent être entraînés par une turbine à vapeur (groupe turbocompresseurs), un moteur électrique (groupe moto-compresseurs) et quelquefois une turbine à gaz.

### **c) L'ensemble d'équipements auxiliaires (disposition interne)**

Un compresseur centrifuge est composé d'une ou plusieurs roues dans lesquelles le gaz recroît de l'énergie.

Des canaux internes (diffuseurs) récupèrent le gaz en sortie de roue et le ramènent à la roue suivante (canal de retour).

## **V-3-Discription du compresseur du CO<sub>2</sub> du complexe SORFERT**

Le compresseur 020K002 utilisé dans l'unité de compression du CO<sub>2</sub> (système 020), est un compresseur centrifuge de Technologie Uhde (Technologie allemande) à 4 étages et 2 corps, le premier corps BP (basse pression) est un corps à 2 étages et le second est un corps HP (haute pression) à 2 étages aussi.

Le compresseur est entraîné directement par une turbine à vapeur 020MT02 à un régime normal de 12200 tr/min.

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

### V-4-Types de compression

Comprimer un fluide, c'est le porter d'une pression  $P_a$  dite pression d'aspiration à une pression  $P_r$  (supérieure à  $P_a$ ) dite pression de refoulement. la transformation met en jeu un certain travail, dit « de compression ».

Lors compression des gaz pour passer de l'état initial  $(T_1, P_1)$  jusqu'à l'état final  $(T_2, P_2)$ , plusieurs évolution sont possibles :

#### 1) La compression isentropique (compression adiabatique réversible)

C'est une compression théorique appliquée au gaz lors de son passage dans un compresseur c'est-à-dire une compression adiabatique réversible :

**Adiabatique** car il n'y a pas d'échange de chaleur entre le gaz à l'intérieur du compresseur et le milieu ambiant.

**Réversible** car il n'y a pas de pertes interne par frottement.

#### 2) La compression isotherme (évolution à température constante)

Ce type de compression présente de l'intérêt, au moins sur le plan théorique : il s'agit de la compression isotherme qui serait réalisée si on était capable de refroidir le fluide de travail, qui a tendance à s'échauffer du fait de la compression, pour que sa température reste constante.

Pour cela elle nécessite un refroidissement très efficace réparti tout au long de la compression.

#### 3) La compression polytropicque

Pour une compression réelle est afin de tenir compte des pertes par frottement, recirculation interne... etc. on définit l'évolution polytropicque suivant une loi  $PV^k = Cste$ ,  $k$  est appelé coefficient polytropicque de la transformation.

En pratique, le processus de compression est parfois assez différent d'un processus isentropique ou isothermique pour cela on parle d'une compression polytropicque.

L'un des grands intérêts que présente la notion de polytropicque tient à la simplicité de l'équation ( $PV^k=Cste$ ) en faisant varier  $k$ , elle engendre un grand nombre de transformations thermodynamiques.

Le coefficient  $k$  prend les valeurs suivantes :

- $k=1$  : compression isotherme.
- $k=2$  : compression isentropique.
- $k=\gamma$  : compression polytropicque.

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

### V-5-Thermodynamique de la compression

#### V-5-1-Compression isentropique adiabatique

Cette expression obéit à la loi de Laplace :

$$PV^\gamma = Cste \quad (1)$$

Avec :

P : Pression.

V : Volume.

$\gamma$  : Coefficient adiabatique de compression.

Si  $(P_1, V_1)$  et  $(P_2, V_2)$  représentent respectivement la pression et le volume massique du gaz en début et en fin de compression, la relation (1) permet d'écrire :

$$PV^\gamma = P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma = Cste \quad (2)$$

Si on considère notre gaz comme un gaz parfait. Il obéit donc à la loi de Mariotte :

$$PV = RT \quad (3)$$

Avec :

T : Température thermodynamique.

R : Constante des gaz parfaits.

L'application des relations (1) et (3) au début et à la fin de compression isentropique permet d'écrire les relations :

$$\frac{T_2}{T_1} = (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (4)$$

Donc :

La température en fin de compression isentropique est :

$$T_{2\ is} = T_1 \times (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

### V-5-2-Le travail adiabatique

C'est-à-dire le travail utile dépensé dans le compresseur pour comprimer et transvaser le gaz de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ , s'exprime alors sous la forme :

$$W_{ad} \int_{P_1}^{P_2} V dp \quad (5)$$

Avec :

$V$  : volume occupé à la pression  $P$  par la masse  $m$  du gaz comprimé.

La compression de 1 à 2 obéissant à la loi de Laplace, et notre gaz pouvant être considéré comme un gaz parfait, la loi de Mariotte s'écrit, pour la masse  $m$  :

$$PV = mRT$$

$$P_1 V_1 = mRT_1 \quad (6)$$

La formule de Mayer  $C_P - C_V = R$  et la définition du coefficient adiabatique de compression

$$\gamma = C_P / C_V$$

Permettent d'écrire le travail isentropique sous la forme :

$$W_{is} = C_P (T_{2is} - T_1)$$

$$W_{is} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times \frac{RT_1}{M} \times [(P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1]$$

### V-5-3-Compression polytropique

L'évolution polytropique suivant la loi  $PV^k = Cste$

La température en fin d'évolution polytropique est plus élevée que la température en fin d'évolution isentropique s'écrit par :

$$T_{2poly} = T_2 \times (P_2/P_1)^{[k-1]/(k)}$$

Le travail d'évolution polytropique est supérieur au travail isentropique s'écrit par analogie :

$$W_{poly} = \frac{k}{k-1} \times \frac{RT_1}{M} \times [(P_2/P_1)^{[k-1]/(k)} - 1]$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

### V-5-4-le travail de compression indiqué (ou travail réel, hors pertes mécaniques)

$W_i$  est aussi le travail de compression isentropique qui aurait donné la température  $T_2$  (poly) il est donné par :

$$W_i = C_p (T_{2 \text{ poly}} - T_1)$$

### V-5-5-Rendement isentropique

Est défini comme le rapport entre le travail isentropique  $W_{is}$  et le travail indiqué  $W_i$ , soit :

$$\eta_{is} = \frac{W_{is}}{W_i} = \frac{T_2 (is) - T_1}{T_2 (poly) - T_1}$$

$$\eta_{is} = \frac{[(P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}] - 1}{(T_2/T_1) - 1}$$

### V-5-6-Rendement polytropique

Est défini comme le rapport entre le travail d'une compression polytropique  $W_{poly}$  et le travail indiqué  $W_i$ , soit :

$$\eta_{poly} = \frac{W_{poly}}{W_i} = \frac{k}{k-1} \frac{\gamma-1}{\gamma}$$

$$\eta_{poly} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \times \frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(T_2/T_1)}$$

### V-5-7-Compression isothermique

Suivant la loi :

$$PV = Cste$$

#### V-5-7-1-le travail isothermique

$$W_{\theta} = \int_{P_1}^{P_2} V dp$$

$$W_{\theta} = P_1 V_1 \ln \frac{P_2}{P_1}$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

Tableau V-1 : Récapitulatif des paramètres isentropiques selon la nature de compression.

| La nature de compression    | Compression isentropique   |
|-----------------------------|--|
| Loi de comportement         | $PV^\gamma = \text{cste avec } \gamma = C_p / C_v = C_p / (C_p - R)$ $T_2 / T_1 = P_2 / P_1^{[(\gamma-1)/\gamma]}$                                   |
| Température de refoulement  | $T_{2 \text{ is}} = T_2 \times (P_2 / P_1)^{[(\gamma-1)/\gamma]}$  |
| Travail                     | $W_{is} = C_p (T_{2 \text{ is}} - T_1)$ $W_{is} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \times \frac{RT_1}{M} \times [(P_2 / P_1)^{[(\gamma-1)/\gamma]} - 1]$      |
| Rendement de la compression | $\eta_{is} = \frac{W_{is}}{W_i} = \frac{T_2 (is) - T_1}{T_2 (poly) - T_1}$ $\eta_{is} = [(P_2 / P_1)^{[(\gamma-1)/\gamma]} - 1] / [(T_2 / T_1) - 1]$ |

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

Tableau V-2 : Récapitulatif des paramètres polytropique selon la nature de compression.

| La nature de compression    | Compression polytropique  |
|-----------------------------|---|
| Loi de comportement         | $PV^{k= \text{Cste}}$ $\frac{T_2}{T_1} = (P_2/P_1)^{[(k-1)/k]}$ $d'ou: k = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1}$                   |
| Température de refoulement  | $T_{2 \text{ poly}} = T_2 \times (P_2/P_1)^{[(k-1)/k]}$   |
| Travail                     | $W_{poly} = \frac{k}{k-1} \times \frac{RT_1}{M} \times [(P_2/P_1)^{[(k-1)/k]} - 1]$   |
| Rendement de la compression | $\eta_{poly} = \frac{W_{poly}}{W_i} = \frac{k}{k-1} \frac{\gamma-1}{\gamma}$ $\eta_{poly} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \times \frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(T_2/T_1)}$ |

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

### V-6-Partie calcul

#### V-6-1-Calcul du rendement du design pour le premier étage

Tableau V-3: les conditions du fonctionnement du design.

| Les conditions de fonctionnement du design du compresseur 020K002 | Valeurs |        |        |        |
|---|---------|--------|--------|--------|
|   | Etage1  | Etage2 | Etage3 | Etage4 |
| $P_1$ : Pression d'aspiration (bar).                              | 1,43    | 6,364  | 21,543 | 81,105 |
| $P_2$ : Pression de refoulement (bar).                            | 6,504   | 23,443 | 81,875 | 150    |
| $T_1$ : Température d'aspiration (C°).                            | 40      | 42     | 42     | 51     |
| $T_2$ : Température de refoulement (C°).                          | 190,97  | 179,03 | 184,41 | 110    |
| Le coefficient ( $\gamma$ ) à 95°C (température moyenne).         | 1,2650  | 1,2650 | 1,2650 | 1,2650 |

Le coefficient ( $\gamma$ ) représente le rapport molaire des chaleurs spécifiques à pression constante ( $C_p$ ) et à volume constant ( $C_v$ ).

#### a) Détermination du coefficient polytropique pour le premier étage

Le coefficient polytropique est déterminé par la relation :

$$PV^k = Cste$$

$$\frac{T_2}{T_1} = (P_2/P_1)^{[(k-1)/k]}$$

D'où :

$$k_1 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3511$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

b) Détermination du rendement polytropique  $\eta_{poly}$  pour le compresseur 020K002 dans les conditions du design pour le premier étage

$$\eta_{poly} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \times \frac{\ln(P_2 / P_1)}{\ln(T_2/T_1)}$$

$$\eta_{poly (1)} = \frac{1.2602-1}{1.2602} \times \frac{\ln(6,504 / 1.43)}{\ln(463,97/313)} = 80,58\%$$

$$\eta_{poly (1)} = 80,58\%$$

V-6-2-Calcul du rendement du design pour le deuxième, troisième et quatrième étage

Le calcul du deuxième, troisième et quatrième étage se fait par la même opération que le premier étage, soit :

$$k_2 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3831$$

$$\eta_{poly (2)} = \frac{1.2602-1}{1.2602} \times \frac{\ln(23,443 / 6,364)}{\ln(452.03/315)} = 75,59\%$$

$$\eta_{poly (2)} = 75,59\%$$

$$k_3 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3877$$

$$\eta_{poly (3)} = \frac{1.2602-1}{1.2602} \times \frac{\ln(81,875/21,543)}{\ln(457,41/315)} = 74,95\%$$

$$\eta_{poly (3)} = 74,95\%$$

$$k_4 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3737.$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

$$\eta_{poly(4)} = \frac{1.2602-1}{1,2602} \times \frac{\ln(150/81,105)}{\ln(383/324)} = 76,96\%$$

$$\eta_{poly(4)} = 76,96\%$$

### V-6-3-Calcul du rendement réel (actuel) pour le premier étage

Tableau V-4 : les conditions du fonctionnement réel (actuel).

| Les conditions de fonctionnement actuel du compresseur 020K002 | Valeurs |        |        |        |
|--|---------|--------|--------|--------|
|  | Etage1  | Etage2 | Etage3 | Etage4 |
| <b>P<sub>1</sub> : Pression d'aspiration (bar).</b>            | 1,623   | 7,21   | 25,05  | 90,5   |
| <b>P<sub>2</sub> : Pression de refoulement (bar).</b>          | 6,33    | 25,8   | 92,5   | 140,9  |
| <b>T<sub>1</sub> : Température d'aspiration (C°).</b>          | 37,2    | 37,3   | 38,4   | 54,9   |
| <b>T<sub>2</sub> : Température de refoulement (C°).</b>        | 179,7   | 171,1  | 171,5  | 97,8   |
| <b>Le coefficient (γ) à 95°C (température moyenne).</b>        | 1,2602  | 1,2602 | 1,2602 | 1,2602 |

#### a) Détermination du coefficient γ

Le coefficient (γ) représente le rapport molaire des chaleurs spécifiques à pression constante (C<sub>p</sub>) et à volume constant (C<sub>v</sub>), il est déterminé par la relation suivante :

$$\gamma = C_p / C_v = C_p / (C_p - R).$$

Tel que :

$$C_p = \sum [(C_{pi}) \times (Y_i)] \dots \dots \dots (\text{J/mol.K}).$$

Les (C<sub>pi</sub>) sont déterminés du (tableau 1 dans les annexes) à la température moyenne

$$T_{moy} = 88.5^\circ\text{C}.$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau V-5 : Récapitulatif des résultats.

| Les composants  | $Y_i$ (%)<br>mol) | $C_{pi}$<br>(J/kg.K°) | Masse molaire $M_i$<br>(Kg/mol) | $C_{pi}'$<br>(J/mol.K°) | $\overline{C_{pi}}=C_{pi}' \times Y_i$<br>(J/mol.K°) |
|-----------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|--|
| N <sub>2</sub>  | 3,82              | 1046                  | 0,028                           | 29,288                  | 1,1188   |
| O <sub>2</sub>  | 0,79              | 920                   | 0,032                           | 29,44                   | 0,2325   |
| CO <sub>2</sub> | 95,16             | 920                   | 0,044                           | 40,48                   | 38,5207  |
| H <sub>2</sub>  | 0,0001            | 14438                 | 0,002                           | 28,876                  | 0,0029   |
| Total           | 100               |                       |                                 | 128,084                 | 39,8749  |
|                 |                   |                       |                                 |                         |  |

$$C_{pi}' = C_{pi} \times M_i$$

$$C_p = \sum \overline{C_{pi}} = 39,8749 \text{ (J/mol.K}^\circ\text{)}.$$

**R = 8.31 (J/mol.K°).** Avec (R : Constante des gaz parfaits).

$$\gamma = C_p / (C_p - R).$$

$$\gamma = 1,2632$$

b) Détermination du coefficient polytropique pour le premier étage

Le coefficient polytropique (k) est déterminé par la relation suivante :

$$PV^{k-1} = \text{Cste}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = (P_2/P_1)^{[(k-1)/k]}$$

D'où :

$$k_1 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3845.$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

- c) Détermination du rendement polytropique  $\eta_{poly}$  pour le compresseur 020K002 dans les conditions actuelles pour le premier étage

$$\eta_{poly (1)} = \frac{1.2632-1}{1.2632} \times \frac{\ln(6.33 / 1.623)}{\ln(452,7/310,2)} = 75\%.$$

$$\eta_{poly (1)} = 75\%$$

### V-6-4-Calcul du rendement réel pour le deuxième, troisième et quatrième étage

Le calcul du deuxième, troisième et quatrième étage se fait par la même opération que le premier étage, soit :

$$k_2 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3912.$$

$$\eta_{poly (2)} = \frac{1.2632-1}{1.2632} \times \frac{\ln(25,8 / 7,21)}{\ln(444.1/310,3)} = 74,07\%.$$

$$\eta_{poly (2)} = 74,07\%$$

$$k_3 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3744.$$

$$\eta_{poly (3)} = \frac{1.2632-1}{1.2632} \times \frac{\ln(92,5/25,05)}{\ln(444,5/311,4)} = 76,46\%.$$

$$\eta_{poly (3)} = 76,46\%$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

$$k_4 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_2 - \ln P_1 - \ln T_2 + \ln T_1} = 1,3845.$$

$$\eta_{poly(4)} = \frac{1,2632 - 1}{1,2632} \times \frac{\ln(140,9/90,5)}{\ln(370,8/327,9)} = 75\%$$

$$\eta_{poly(4)} = 75\%$$

Le tableau suivant montre les conditions de fonctionnements du design et actuelles du compresseur 020K002 pour le corps HP.

Tableau V-6 : Comparaison entre les paramètres du design et actuelles du corps HP.

| Les conditions du corps HP du design         |  | Les conditions actuelles du corps HP         |   |
|--|--|--|---|
| Etage 3                                      | Etage 4                                      | Etage 3                                      | Etage 4                                   |
| <b>P<sub>1</sub>=21,543 bar</b>              | <b>P<sub>1</sub>=81,105 bar</b>              | <b>P<sub>1</sub>=25,05 bar</b>               | <b>P<sub>1</sub>=90,5 bar</b>             |
| <b>P<sub>2</sub>=81,875 bar</b>              | <b>P<sub>2</sub>=150 bar</b>                 | <b>P<sub>2</sub>=92,5 bar</b>                | <b>P<sub>2</sub>=140,9 bar</b>            |
| <b>T<sub>1</sub>=42 °C</b>                   | <b>T<sub>1</sub>=51 °C</b>                   | <b>T<sub>1</sub>=38,4 °C</b>                 | <b>T<sub>1</sub>=54,9 °C</b>              |
| <b>T<sub>2</sub>=184,41 °C</b>               | <b>T<sub>2</sub>=110 °C</b>                  | <b>T<sub>2</sub>=184,41 °C</b>               | <b>T<sub>2</sub>=110 °C</b>               |
| <b><math>\eta_{poly(3)} = 74,95\%</math></b> | <b><math>\eta_{poly(4)} = 76,96\%</math></b> | <b><math>\eta_{poly(3)} = 76,46\%</math></b> | <b><math>\eta_{poly(4)} = 75\%</math></b> |

Selon les résultats obtenus, les paramètres du corps HP dans la marche actuelle sont quasiment proches aux paramètres du design.

Le tableau suivant montre les conditions de fonctionnements du design et actuelles du compresseur 020K002 pour le corps BP :

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

Tableau V-7 : Comparaison entre les paramètres du design et actuelles (actuel) du corps BP.

| Les conditions du corps HP du design        |   | Les conditions actuelles du corps HP     |   |
|---|---|--|---|
| Etage 1                                     | Etage 2                                     | Etage 1                                  | Etage 2                                     |
| <b>P<sub>1</sub>=1,43 bar</b>               | <b>P<sub>1</sub>=6,364 bar</b>              | <b>P<sub>1</sub>=1,123 bar</b>           | <b>P<sub>1</sub>=7,21 bar</b>               |
| <b>P<sub>2</sub>=6,504 bar</b>              | <b>P<sub>2</sub>=23,443 bar</b>             | <b>P<sub>2</sub>=6,23 bar</b>            | <b>P<sub>2</sub>=25,8 bar</b>               |
| <b>T<sub>1</sub>=42 °C</b>                  | <b>T<sub>1</sub>=51 °C</b>                  | <b>T<sub>1</sub>=37,2 °C</b>             | <b>T<sub>1</sub>=37,3 °C</b>                |
| <b>T<sub>2</sub>=190,97 °C</b>              | <b>T<sub>2</sub>=179,03 °C</b>              | <b>T<sub>2</sub>=179,7 °C</b>            | <b>T<sub>2</sub>=171,1 °C</b>               |
| <b><math>\eta_{poly (1)}=80,58\%</math></b> | <b><math>\eta_{poly (2)}=75,59\%</math></b> | <b><math>\eta_{poly (1)}=75\%</math></b> | <b><math>\eta_{poly (2)}=74,07\%</math></b> |

Selon les résultats obtenus, les paramètres du corps BP dans la marche actuelle sont quasiment proches aux paramètres du design.

### ➤ **Interprétation**

Le rendement du compresseur 020K002 du design est similaire à celui de la marche actuelle, cela se traduit par une stabilité du système.

Pour le premier étage, on note une légère différence entre le rendement de fonctionnement actuel et celui du design, afin d'augmenter ce rendement, on a proposé une solution à l'aide du simulateur Hysys.

## **V-7-Simulation**

### **V-7-1 Introduction**

La conception d'une unité de production chimique est une opération complexe qui demande des moyens financiers et humains conséquents. Dans le contexte actuel, un procédé industriel doit répondre à trois critères : la sécurité, l'économie et l'environnement.

Ainsi, lorsqu'un nouveau procédé est développé, le rôle de l'ingénieur consiste à trouver le système le plus adapté, non seulement en termes d'efficacité et de sécurité, mais aussi de coût et de rentabilité pour la fabrication du produit.

A ce titre, la simulation peut être d'une aide bien précieuse en prenant en charge et en traitant ce problème, surtout lorsque de nombreuses variables sont en jeu (diversité des composants, complexité des interactions, non linéarité des phénomènes, etc.).

### **V-7-2 Présentation du logiciel de simulation « Aspen Technology »**

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

Aspen Technology, est un fournisseur mondial de solutions logicielles d'optimisation des processus intégrés et de services professionnels pour les industries de process. AspenTech propose un ensemble complet de solutions visant à intégrer et optimiser les processus couvrant l'ingénierie, l'exploitation des centrales et la gestion de la chaîne d'approvisionnement à l'échelle de l'entreprise. Depuis sa création en 1981, AspenTech a appliqué le processus savoir-faire technique pour modéliser les processus de la chaîne de fabrication et d'approvisionnement.

L'entreprise a conçu Aspen ONE, sa suite logicielle intégrée, afin d'optimiser l'ingénierie de clients, la fabrication et les opérations de la chaîne d'approvisionnement. D'un point de vue technique, Aspen ONE fournit un cadre d'intégration basée sur des standards qui unifie les modèles, des données et des applications sur le portefeuille de produits. Du point de vue du marché, des solutions Aspen ONE sont conçus pour répondre aux besoins spécifiques de chaque segment de marché vertical ils servent. Une partie de la stratégie d'AspenTech avec Aspen ONE est de profiter d'une tendance de l'industrie vers une intégration plus étroite des processus et de la normalisation.

### **V-7-3-Simulation du compresseur 020K002**

#### **V-7-3-1-Les recommandations**

Pour augmenter le rendement du premier étage il faut :

- Diminuer la pression d'aspiration.
- Diminuer la température d'aspiration.

Dans le but de diminuer ces deux paramètres nous avons proposé de mettre une vanne de détente pour le courant d'alimentation.

Le schéma d'installation de l'unité de compression est le suivant :

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

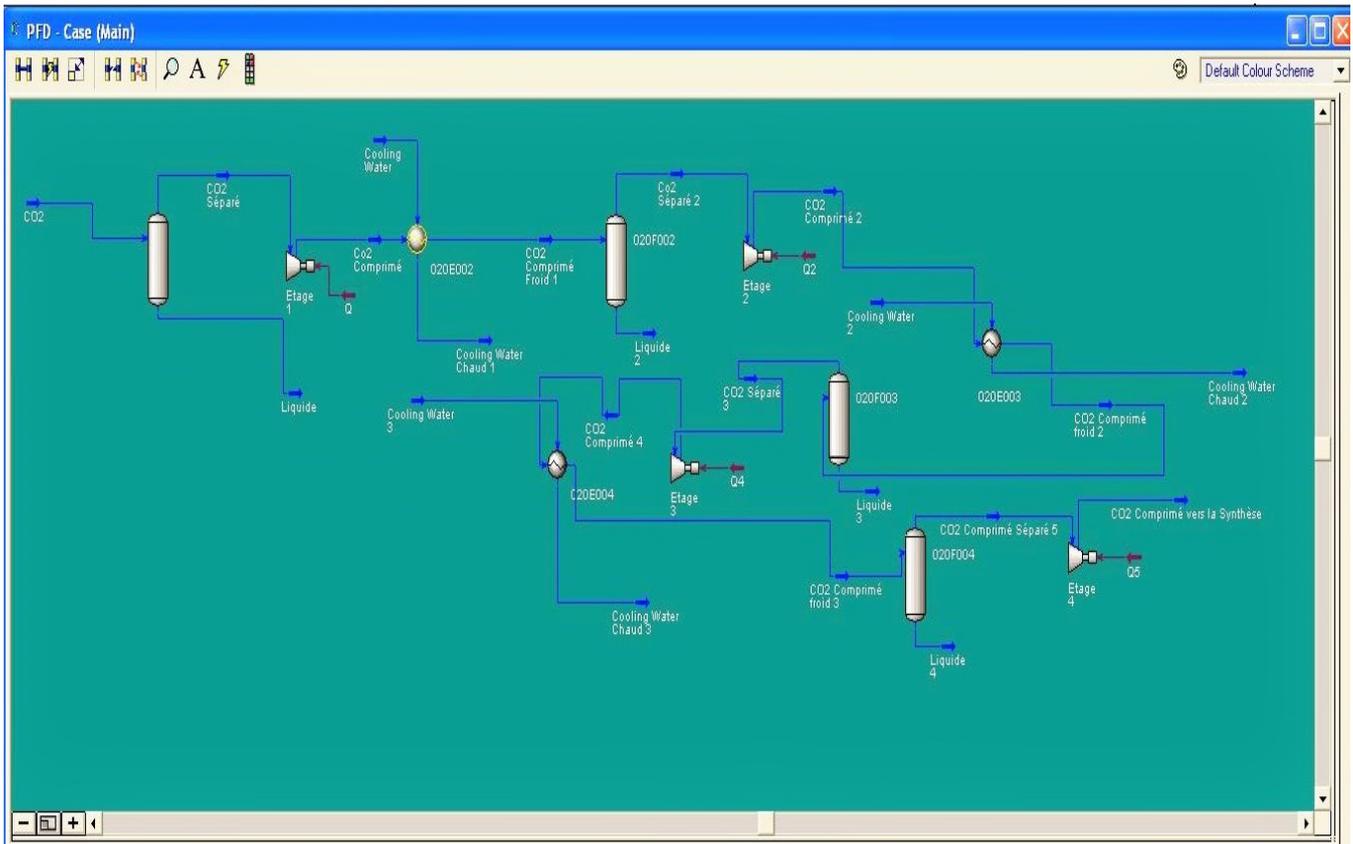


Figure V-1: Le schéma d'installation de l'unité de compression à l'aide du simulateur Hysys.

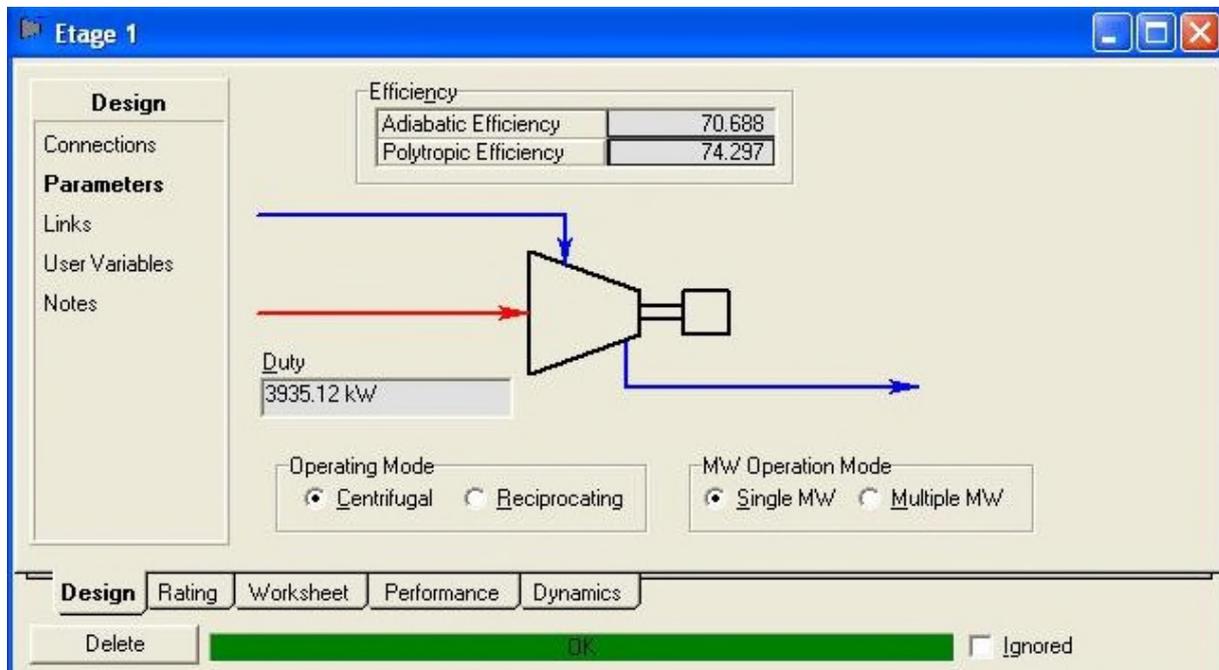


Figure V-2: Résultat du premier étage par le simulateur Hysys.

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

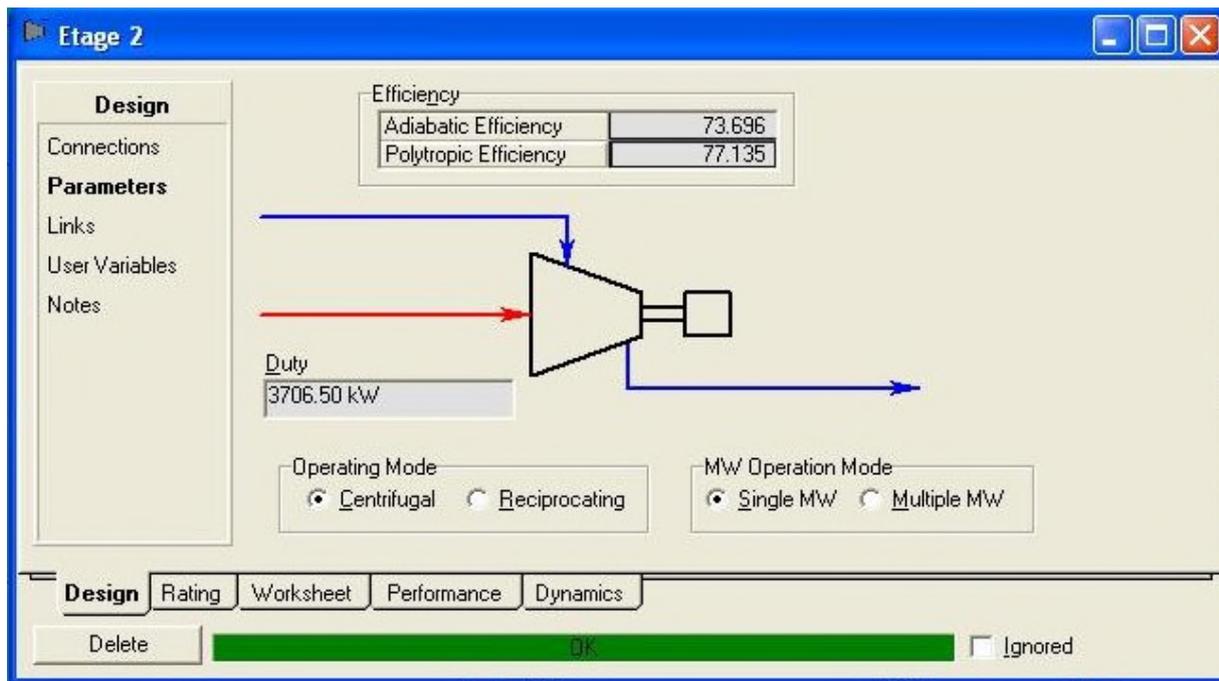


Figure V-3: Résultat du deuxième étage par le simulateur Hysys.

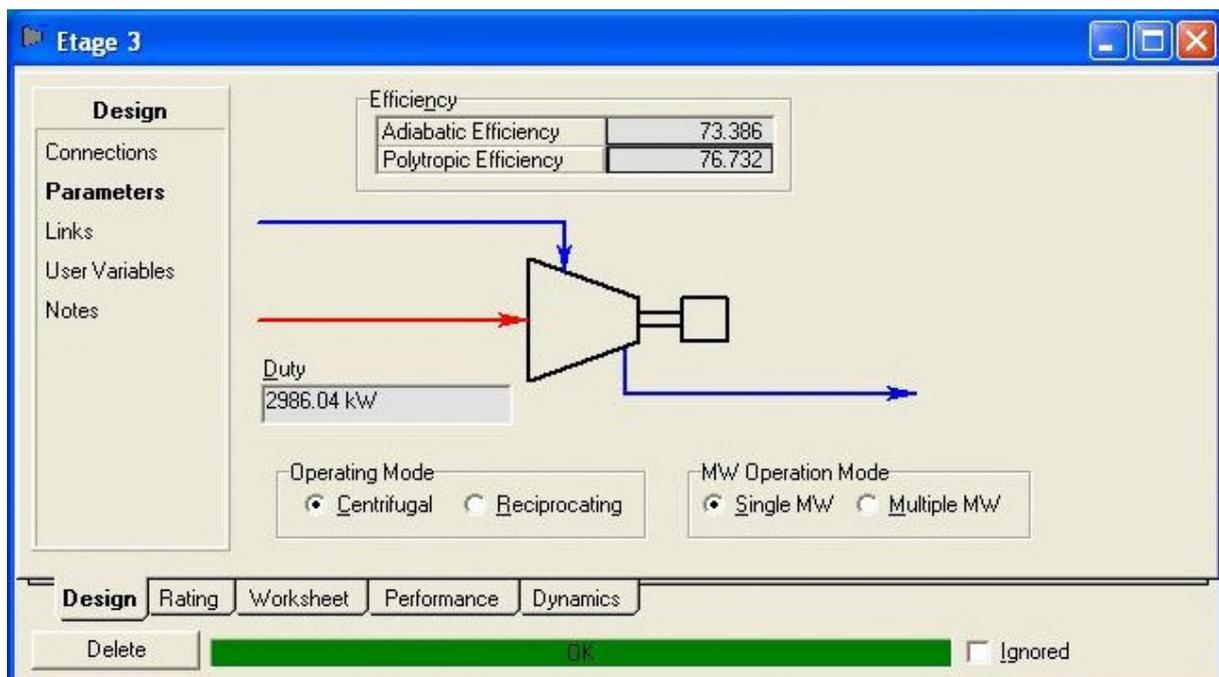


Figure V-4: Résultat du troisième étage par le simulateur Hysys.

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

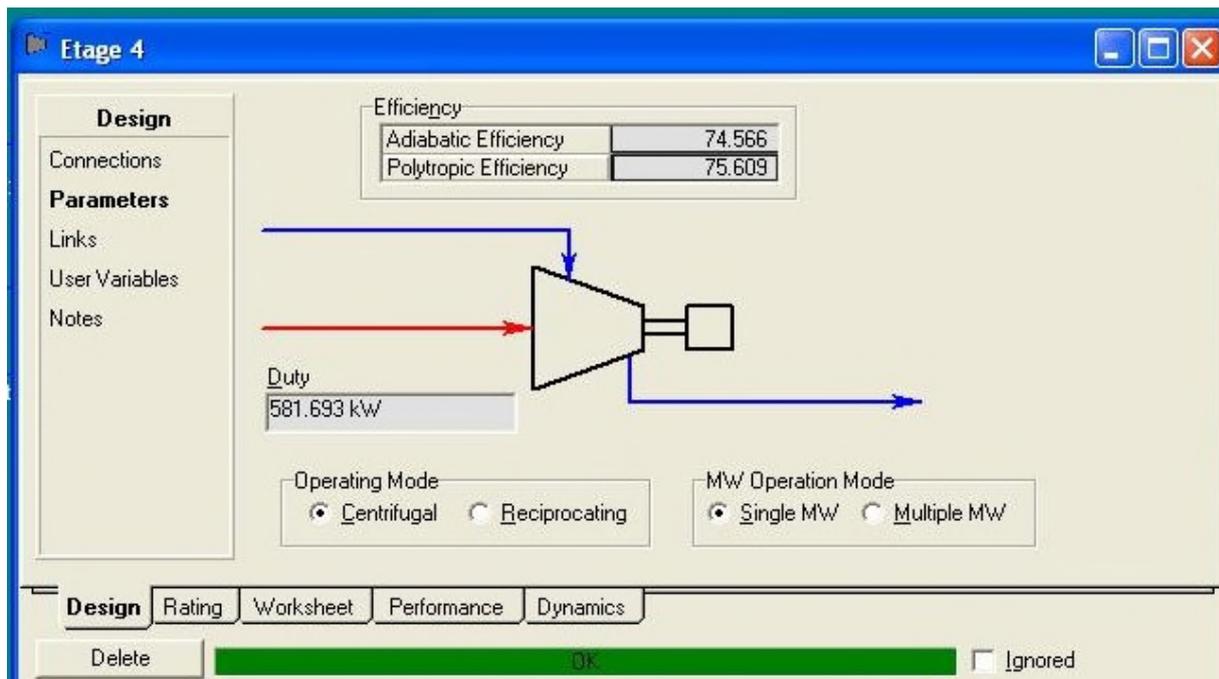


Figure V-5: Résultat du quatrième étage par le simulateur Hysys.

Le schéma d'installation de l'unité de compression après l'ajout de la vanne de détente est le suivant :

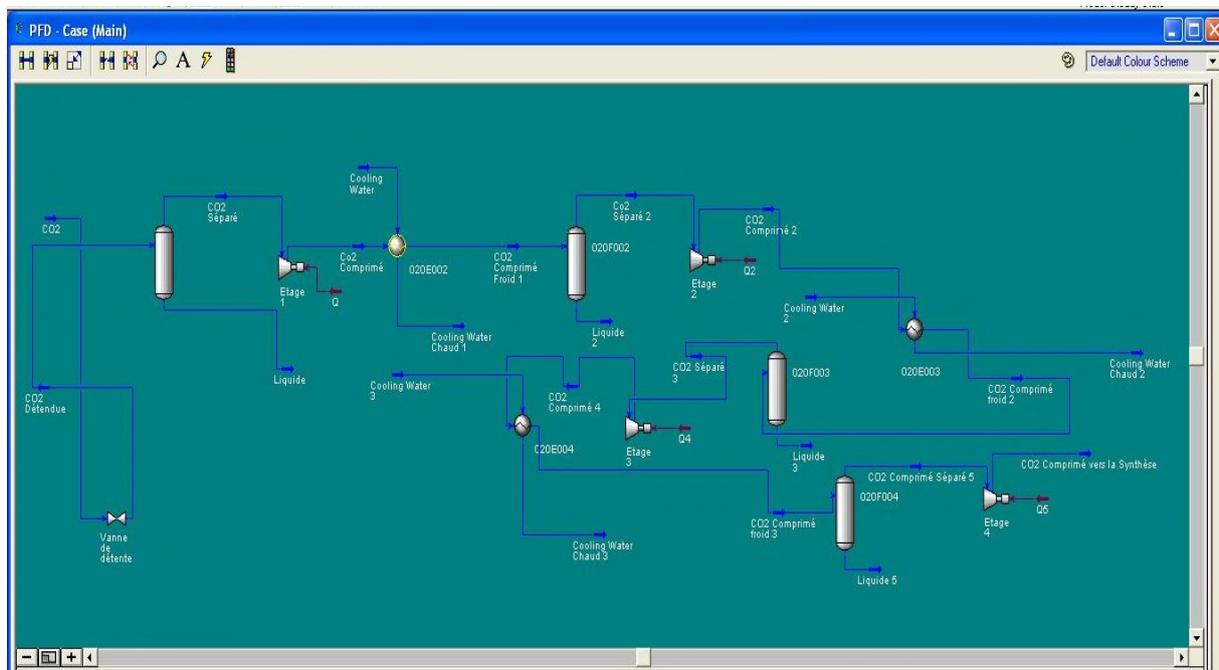


Figure V-6: Schéma de l'installation après l'ajout d'une vanne de détente.

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

| Worksheet   | Name                               | CO2         | CO2 Détendue |
|-------------|------------------------------------|-------------|--------------|
| Conditions  | Vapour Fraction                    | 0.97584     | 0.97721      |
|             | Temperature [C]                    | 37.200      | 35.509       |
| Properties  | Pressure [kPa]                     | 162.30      | 143.00       |
| Composition | Actual Vol. Flow [m3/h]            | 39156       | 44299        |
| PF Specs    | Mass Enthalpy [kJ/kg]              | -9081.6     | -9081.6      |
|             | Mass Entropy [kJ/kg-C]             | 3.9915      | 4.0156       |
|             | Molecular Weight                   | 42.269      | 42.269       |
|             | Molar Density [kgmole/m3]          | 6.4990e-002 | 5.7446e-002  |
|             | Mass Density [kg/m3]               | 2.7471      | 2.4282       |
|             | Std Ideal Liq Mass Density [kg/m3] | 828.43      | 828.43       |
|             | Liq Mass Density @Std Cond [kg/m3] | 890.92      | 890.92       |
|             | Molar Heat Capacity [kJ/kgmole-C]  | 39.594      | 39.454       |

Figure V-7: Les paramètres de la vanne de détente.

| Worksheet   | Name                        | CO2 Séparé  | Co2 Comprimé | Q          |
|-------------|-----------------------------|-------------|--------------|------------|
| Conditions  | Vapour                      | 1.0000      | 1.0000       | <empty>    |
|             | Temperature [C]             | 35.51       | 179.7        | <empty>    |
| Properties  | Pressure [kPa]              | 143.0       | 633.0        | <empty>    |
| Composition | Molar Flow [kgmole/h]       | 2487        | 2487         | <empty>    |
| PF Specs    | Mass Flow [kg/h]            | 1.065e+005  | 1.065e+005   | <empty>    |
|             | LiqVol Flow [m3/h]          | 128.8       | 128.8        | <empty>    |
|             | Molar Enthalpy [kJ/kgmole]  | -3.862e+005 | -3.804e+005  | <empty>    |
|             | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 172.3       | 175.3        | <empty>    |
|             | Heat Flow [kJ/h]            | -9.604e+008 | -9.461e+008  | 1.433e+007 |

Figure V-8: Les paramètres du premier étage après l'ajout de la vanne de détente.

**V-7-3-2-Calcul de rendement du compresseur en utilisant les paramètres donnés par le simulateur**

$$\eta_{poly (1)} = \frac{1.2632 - 1}{1.2632} \times \frac{\ln(6.33 / 1.43)}{\ln(452,7 / 308,51)} = 80.81\%$$

## Chapitre V : Généralités sur les compresseurs et simulation.

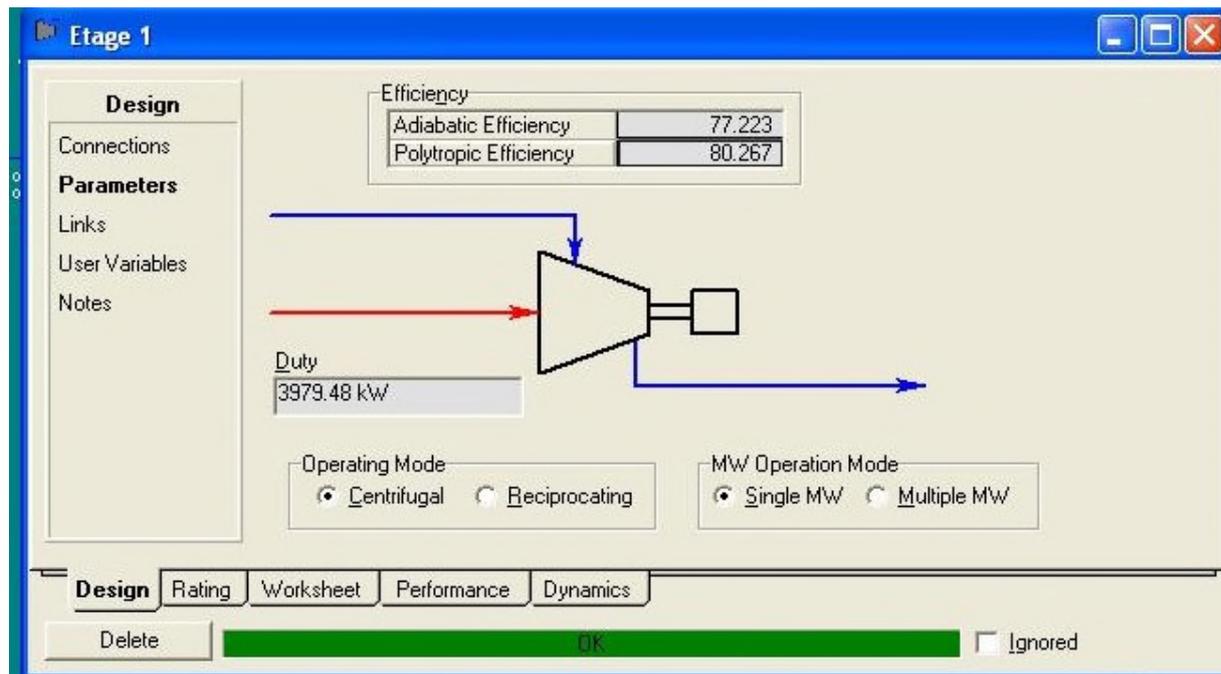


Figure V-9: Le rendement du premier étage après l'ajout de la vanne de détente.

### V-8-Conclusion

D'après le calcul qu'on a réalisé dans cette étude et à l'aide des résultats obtenues, on constate que le rendement du compresseur dans le cas design est quasiment proche que celui dans le cas actuel.

Pour le premier étage, on a noté une légère diminution entre le rendement de fonctionnement actuel et celui du design.

A partir de ces résultats on a conclu que l'augmentation de la température et de la pression actuelle du compresseur sont responsables de cette diminution du rendement.

A la fin on a trouvé que la solution de ce problème se réside dans l'installation d'une vanne de détente de pression d'aspiration.

## *Conclusion générale.*

Dans le cadre de la réalisation de ce modeste travail qui nous a été confié de réaliser, nous avons pu définir et présenter les différentes étapes de production de l'urée au niveau du complexe SORFERT ALGERIE SPA.

Bien que nous soyons pétrochimistes de formation, nous avons fait exprès de choisir un projet purement pétrochimique afin de nous apporter des connaissances dans ce domaine. Notre projet de fin d'étude nous a permis de nous perfectionner et de mieux comprendre le process de synthèse de l'urée.

Ce projet est intitulé "synthèse de l'urée". Il est préparé dans le cadre d'un projet afin d'obtenir un Diplôme de Master Académique en pétrochimie, qui achève une période de formation de cinq ans à l'institut de maintenance et de sécurité industrielle de l'université d'Oran 2 Mohammed Benahmed.

L'objectif principal de notre étude consiste à suivre les différents procédés, étapes, ainsi les conditions de travail respectées dans chaque phase du process lors de la production de l'urée et l'étude de rendement du compresseur de CO<sub>2</sub> avec les recommandations requises à l'aide d'un simulateur (HYSYS) pour le bon fonctionnement du compresseur.

Ce travail nous a permis de découvrir le sens du travail en groupe et l'importance de l'organisation dans le processus de réalisation d'un projet de fin d'étude.

## *Bibliographie.*

[1] Document « Raffinage et Pétrochimie », ENSPM, Formation industrie, IFP, Paris, 2005.

[2] Document « Fonctionnement des compresseurs centrifuges, Raffinage, Pétrochimie, Chimie, Ingénierie, SONATRACH/IAP, Arzew. Edition, Technip, 1972.

[3] I.TOUMI « Étude de problème de la baisse de rendement du compresseur de l'unité Méthanol CP1/Z, Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un diplôme de Master en génie des procédés, Université ABDELHAMID IBN BADIS, Mostaganem, 2011.

[4] Manuel d'exploitation de l'urée.

[5] P.Whitier, « Le pétrole, Raffinage et génie chimique », Tome II, 1<sup>ère</sup> training, Paris, 2005.

[6] Techniques de l'ingénieur B2 365, B2 630, B2632.

# *Annexes*



Labyrinthe d'étanchéité du piston d'équilibrage  
Balancing piston labyrinth seal

Rotor à 7 roues  
7 impellers rotor

Canal de retour  
Return channel

Diffuseur  
Diffuser

Système d'étanchéité à labyrinthe  
Labyrinth seal

Palier  
Bearing

Butée  
Thrust bearing

Captteur de déplacement axial  
Axial displacement probe

Corps de palier et de butée  
Bearing and thrust bearing housing

Tubulures de lubrification  
Lube oil piping

Aspiration 1<sup>er</sup> étage  
1<sup>st</sup> section suction

Refoulement 1<sup>er</sup> étage  
1<sup>st</sup> section discharge

Aspiration 2<sup>ème</sup> étage  
2<sup>nd</sup> section suction

Refoulement 2<sup>ème</sup> étage  
2<sup>nd</sup> section discharge

Volutes de refoulement  
Discharge volutes

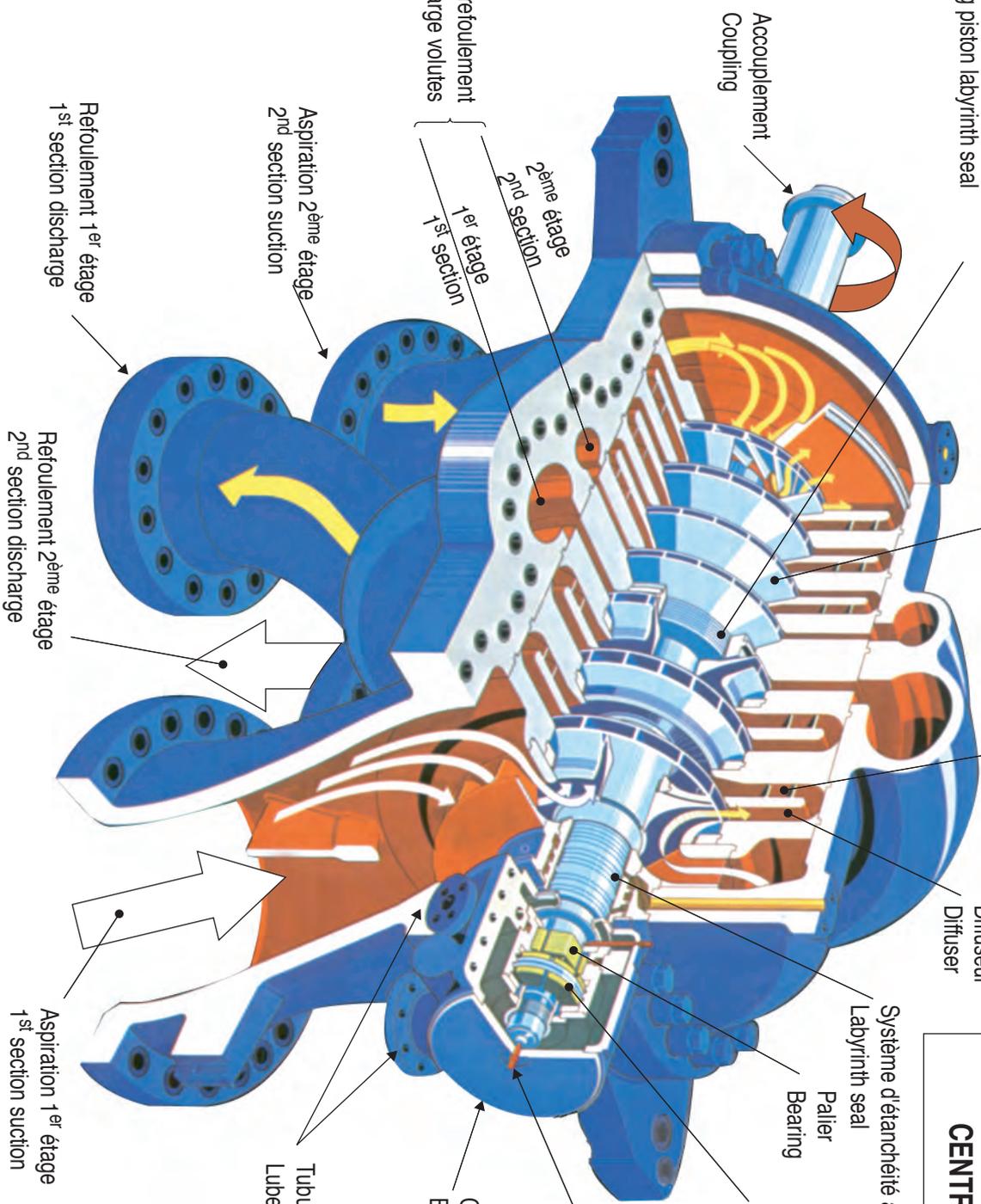
Accouplement  
Coupling

2<sup>ème</sup> étage  
2<sup>nd</sup> section

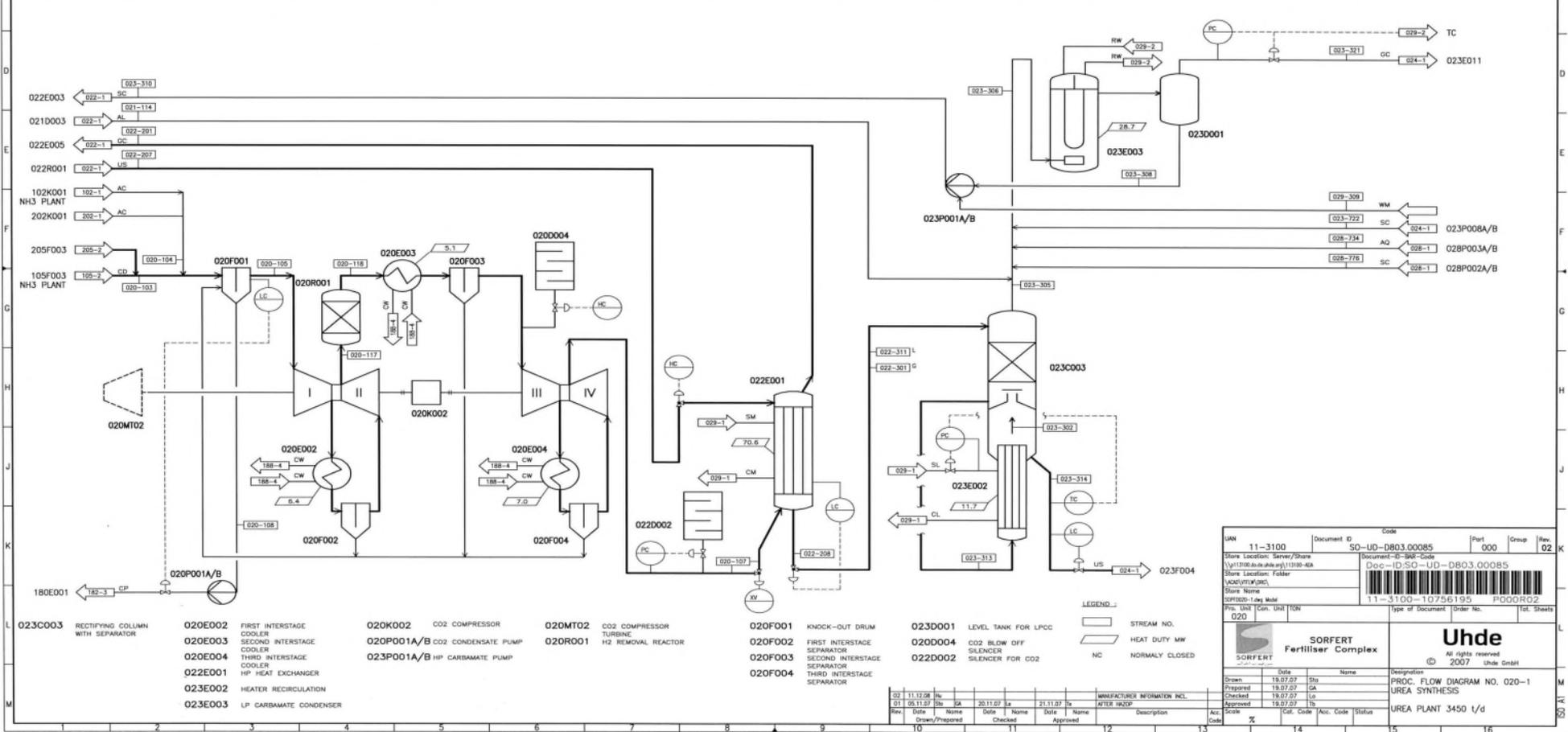
1<sup>er</sup> étage  
1<sup>st</sup> section

**COMPRESSEUR CENTRIFUGE À 2 ÉTAGES**  
— À plan de joint horizontal —  
**2 SECTIONS HORIZONTALLY SPLIT**  
**CENTRIFUGAL COMPRESSOR**

— Planche n°1 —

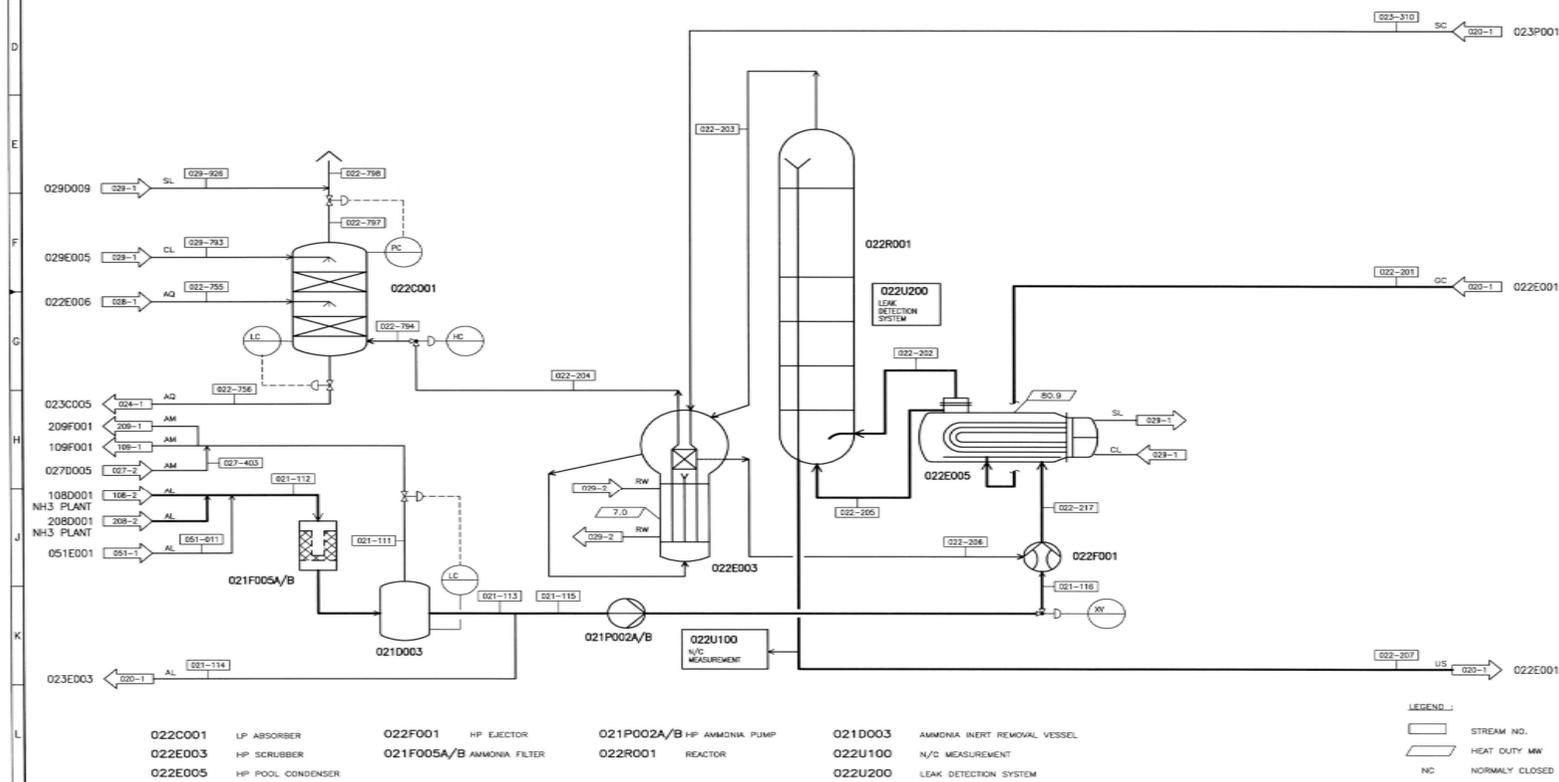


| Stream no.                    | 020-103            | 020-104   | 020-105        | 020-107        | 020-108   | 020-117        | 020-118        | 021-114        | 022-201       | 022-207       | 022-208       | 022-301       | 022-311       | 023-302       | 023-305       | 023-306       | 023-308            | 023-310            | 023-313       | 023-314       | 023-321       | 023-722            | 028-734       | 028-776            | 029-309    |        |       |
|-------------------------------|--------------------|-----------|----------------|----------------|-----------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|------------|--------|-------|
| <b>Stream designation</b>     | CARBON DIOXIDE     | AR        | CARBON DIOXIDE | CARBON DIOXIDE | WATER     | CARBON DIOXIDE | CARBON DIOXIDE | AMMONIA LIQUID | CARBAMATE GAS | UREA SOLUTION | UREA SOLUTION | CARBAMATE GAS | UREA SOLUTION | CARBAMATE GAS | CARBAMATE GAS | CARBAMATE GAS | CARBAMATE SOLUTION | CARBAMATE SOLUTION | UREA SOLUTION | UREA SOLUTION | CARBAMATE GAS | CARBAMATE SOLUTION | AMMONIA WATER | CARBAMATE SOLUTION | SEAL WATER |        |       |
| <b>Component Molar weight</b> |                    |           |                |                |           |                |                |                |               |               |               |               |               |               |               |               |                    |                    |               |               |               |                    |               |                    |            |        |       |
| Urea                          | 60.06              |           |                |                |           |                |                |                |               | 33.41         | 54.16         |               |               | 63.04         |               |               | 0.07               | 0.08               | 0.07          | 62.90         | 67.64         |                    | 0.20          | 0.71               | 0.09       |        |       |
| Buret                         | 153.08             |           |                |                |           |                |                |                | 0.11          | 0.23          |               |               |               | 0.26          |               |               |                    |                    |               | 0.28          | 0.32          |                    |               |                    |            |        |       |
| CO2                           | 44.01              |           | 0.04           | 95.98          | 98.68     | 97.95          | 97.95          |                | 53.76         | 17.11         | 10.93         | 52.81         | 4.07          | 27.75         | 49.88         | 39.14         | 38.30              | 37.82              | 3.08          | 1.20          | 61.05         | 19.99              | 3.09          | 23.04              |            |        |       |
| NH3                           | 17.03              |           |                |                |           | 6.71           | 3.77           | 0.12           | 100.00        | 0.78          | 0.86          | 99.72         | 41.61         | 31.00         | 8.66          | 31.66         | 4.89               | 36.13              | 34.08         | 30.48         | 30.08         | 4.71               | 2.30          | 30.88              | 21.57      | 27.97  |       |
| H2O                           | 18.02              |           | 2.72           | 6.71           | 3.77      | 0.12           | 100.00         |                | 0.78          | 0.86          | 99.72         | 41.61         | 31.00         | 8.66          | 31.66         | 4.89          | 36.13              | 34.08              | 30.48         | 30.08         | 4.71          | 2.30               | 30.88         | 21.57              | 27.97      |        |       |
| N2                            | 28.01              |           | 124            | 71.57          | 0.95      | 0.98           |                |                | 0.97          | 0.97          | 0.06          | 0.33          | 18.36         | 25.99         | 15.35         | 27.74         | 36.13              | 15.82              | 30.24         | 31.16         | 32.63         | 28.68              | 28.53         | 6.07               | 58.24      | 90.89  |       |
| O2                            | 32.00              |           | 89             | 21.98          | 0.28      | 0.22           |                |                | 0.29          | 0.22          |               | 0.07          | 59            | 0.02          | 0.13          |               |                    |                    |               |               |               |                    |               |                    |            | 100.00 |       |
| CH4                           | 16.04              |           | 0.01           |                |           |                |                |                | 90            | 0.01          |               |               |               |               |               |               |                    |                    |               |               |               |                    |               |                    |            |        |       |
| Water flow                    | km <sup>3</sup> /h | 2544.8    | 51.4           | 2518.0         | 2428.4    | 165.5          | 2448.0         | 2444.5         |               | 13.8          | 11754.9       | 17375.5       | 8215.7        | 1499.1        | 6754.6        | 766.5         | 2126.7             | 3541.5             | 3433.2        | 3488.7        | 6853.5        | 6087.0             | 87            | 87                 | 87         |        |       |
| Mass flow                     | kg/h               | 107565.90 | 1426.80        | 108992.80      | 106010.60 | 2982.30        | 106802.30      | 106802.30      | 235.00        | 300358.20     | 458889.60     | 284542.00     | 37244.50      | 227297.40     | 16112.70      | 52869.60      | 81206.98           | 78203.50           | 79203.50      | 227784.90     | 211672.20     | 3003.80            | 5327.10       | 284.1              | 245.6      | 891.4  | 55.3  |
| Volume flow                   | m <sup>3</sup> /h  | 44550.80  | 822.40         | 46576.00       | 417.50    | 3.06           | 5636.70        | 3921.10        | 0.40          | 2286.80       | 472.80        | 234.20        | 11240.40      | 202.90        | 8205.40       | 16393.10      | 16812.84           | 64.20              | 64.40         | 205.60        | 191.90        | 948.60             | 4.90          | 4.20               | 16.70      | 1.04   |       |
| Molar weight                  | kg/kmol            | 42.30     | 27.10          | 43.32          | 43.70     | 18.00          | 43.31          | 43.69          | 17.00         | 59.60         | 26.40         | 30.70         | 21.00         | 24.80         | 27.70         | 22.80         | 22.70              | 33.20              | 34.80         | 34.80         | 34.80         | 34.80              | 34.80         | 34.80              | 34.80      | 34.80  |       |
| Opening temperature           | °C                 | 40.0      | 47.0           | 40.0           | 116.0     | 49.0           | 179.0          | 189.0          | 22.0          | 188.0         | 173.0         | 114.0         | 114.0         | 114.0         | 114.0         | 114.0         | 114.0              | 114.0              | 114.0         | 114.0         | 114.0         | 114.0              | 114.0         | 114.0              | 114.0      | 114.0  | 114.0 |
| Operating pressure            | bar a              | 1.5       | 2.2            | 1.4            | 146.9     | 1.0            | 33.4           | 33.4           | 17.0          | 146.9         | 144.0         | 146.9         | 4.1           | 4.1           | 4.1           | 4.1           | 4.1                | 4.1                | 4.1           | 4.1           | 4.1           | 4.1                | 4.1           | 4.1                | 4.1        | 4.1    |       |
| Total density                 | kg/m <sup>3</sup>  | 2.41      | 2.28           | 2.34           | 253.90    | 989.00         | 27.84          | 27.23          | 608.60        | 131.30        | 970.60        | 1129.00       | 3.31          | 1120.00       | 2.80          | 3.23          | 4.83               | 1218.00            | 1221.00       | 1108.00       | 1103.00       | 3.17               | 1092.00       | 994.70             | 1093.00    | 998.37 |       |



PFD (Process Flow Diagram) de L'unité de compression (système O20).

| Stream no.            | 021-111       | 021-112        | 021-113        | 021-114        | 021-115        | 021-116        | 022-201       | 022-202       | 022-203       | 022-204 | 022-205       | 022-206            | 022-207       | 022-217            | 022-755       | 022-756       | 022-794 | 022-797 | 022-798 | 023-310            | 027-403     | 029-793          | 029-926 | 051-011        |
|-----------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------|---------|---------|--------------------|-------------|------------------|---------|----------------|
| Stream designation    | AMMONIA GAS   | AMMONIA LIQUID | CARBAMATE GAS | CARBAMATE GAS | CARBAMATE GAS | OFF-GAS | UREA SOLUTION | CARBAMATE SOLUTION | UREA SOLUTION | CARBAMATE SOLUTION | AMMONIA WATER | AMMONIA WATER | OFF-GAS | OFF-GAS | OFF-GAS | CARBAMATE SOLUTION | AMMONIA GAS | STEAM CONDENSATE | STEAM   | AMMONIA LIQUID |
| Component             | Molar weight  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Urea                  | 60.06 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Water                 | 103.08 Mass % |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| CO2                   | 44.01 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| AMMONIA               | 17.03 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| NH3                   | 17.03 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| H2O                   | 18.02 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| HCN                   | 28.01 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| O2                    | 32.00 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| CO                    | 28.01 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| CO2                   | 44.01 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| CH4                   | 16.04 Mass %  |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Molar flow            | kmol/h        |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Mass flow             | kg/h          |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Volume flow           | m3/h          |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Molar weight          | kg/kmol       |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Operating temperature | °C            |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Operating pressure    | bar a         |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |
| Total density         | kg/m3         |                |                |                |                |                |               |               |               |         |               |                    |               |                    |               |               |         |         |         |                    |             |                  |         |                |



- 022C001 LP ABSORBER
- 022E003 HP SCRUBBER
- 022E005 HP POOL CONDENSER
- 022F001 HP EJECTOR
- 021F005A/B AMMONIA FILTER
- 021P002A/B HP AMMONIA PUMP
- 022R001 REACTOR
- 021D003 AMMONIA INERT REMOVAL VESSEL
- 022U100 N/C MEASUREMENT
- 022U200 LEAK DETECTION SYSTEM

LEGEND:  
 □ STREAM NO.  
 ▭ HEAT DUTY MW  
 ○ NC NORMALLY CLOSED

JMW 11-3100 Document ID SO-UD-D803.00001 Part 000 Group Rev 02  
 Store Location: Server/Share Document-ID:BAR-Code  
 Store Location: Folder Dec-ID:SG-UD-D803.00001  
 Store Name (KAT/PT/MS/CS) 11-3100-10756116 POOR02  
 Store Path (KAT/PT/MS/CS) 11-3100-10756116 POOR02  
 File Unit Con. Unit NON  
 022 Type of Document Order No. Tot. Sheets

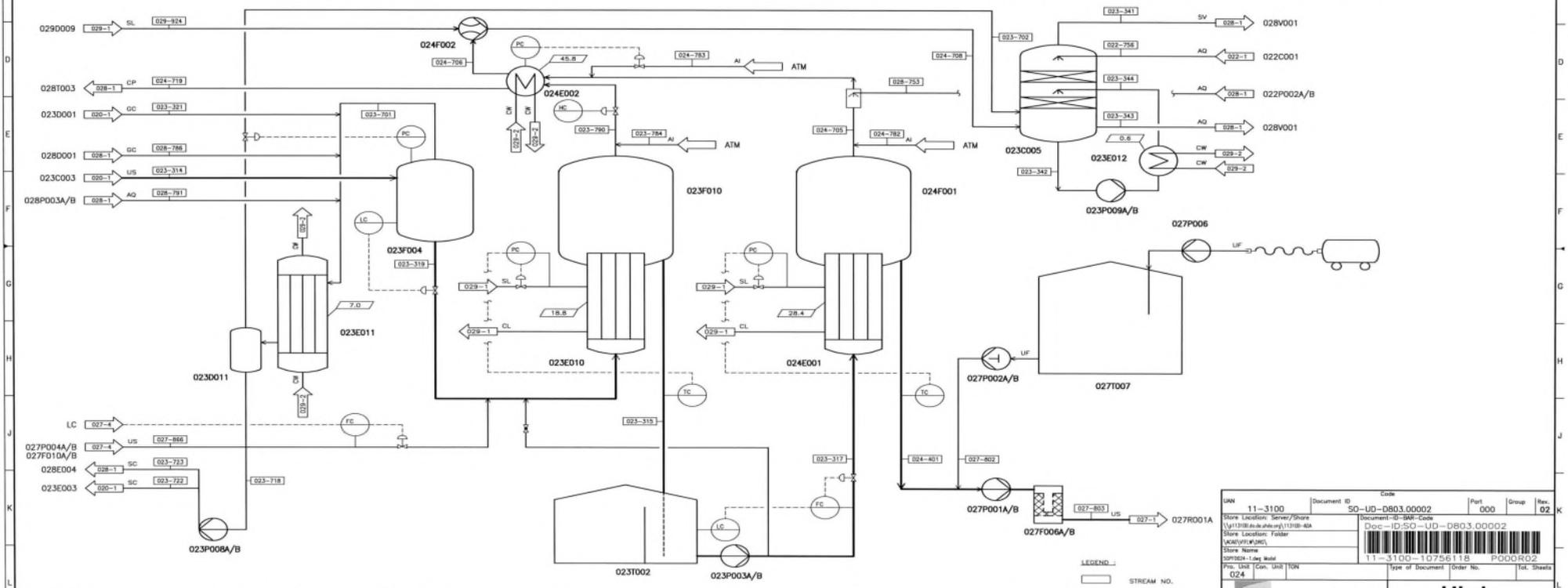
**SORFERT Fertiliser Complex**  
**Uhde**  
 All Rights reserved 2007 Uhde GmbH

Stream: 19.07.07 No. Designation  
 Prepared: 19.07.07 CA PROC. FLOW DIAGRAM NO. 022-1  
 Checked: 19.07.07 Lc UREA SYNTHESIS  
 Approved: 19.07.07 Lb UREA PLANT 3450 t/d

| Rev | Date     | Drawn/Prepared | None | Date     | Name | Checked  | None | Date | Name | Approved | None | MANUFACTURER INFORMATION INCL. | DATE INQUIRY | Description | Acc. Code | Scale | Doc. Code | Alt. Code | Status |
|-----|----------|----------------|------|----------|------|----------|------|------|------|----------|------|--------------------------------|--------------|-------------|-----------|-------|-----------|-----------|--------|
| 02  | 11.07.08 | hu             | SA   | 20.11.07 | ja   | 21.11.07 | ls   |      |      |          |      |                                |              |             |           |       |           |           |        |

PFD (Process Flow Diagram) de la synthèse de l'urée (Système 022).

| Stream no.            | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             | 8         | 9             | 10            | 11            | 12            | 13                 | 14                 | 15                 | 16                 |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------------|---------------|-----------|-----------|----------|--------------------|---------|----------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|---------|------|
| Stream designation    | AMMONIA WATER | UREA SOLUTION | UREA SOLUTION | UREA SOLUTION | UREA SOLUTION | CARBAMATE GAS | OFF-GAS   | AMMONIA WATER | AMMONIA WATER | AMMONIA WATER | CARBAMATE GAS | CARBAMATE SOLUTION | CARBAMATE SOLUTION | CARBAMATE SOLUTION | CARBAMATE SOLUTION | AIR     | CARBAMATE GAS | UREA SOLUTION | VAPOUR    | VAPOUR    | VAPOUR   | PROCESS CONDENSATE | AIR     | AIR      | UF80  | UREA SOLUTION | UREA SOLUTION | AMMONIA WATER | CARBAMATE GAS | AMMONIA WATER | AMMONIA WATER | STEAM   |         |      |
| Component             | Molar weight  |               |               |               |               |               |           |               |               |               |               |                    |                    |                    |                    |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| Urea                  | 60.08         | Mass %        | 0.74          | 87.64         | 79.42         | 79.42         | 70.78     |               |               |               |               |                    |                    |                    |                    |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       | 23.00         | 84.75         | 44.46         | 0.78          |               |               |         |         |      |
| Water                 | 18.02         | Mass %        | 99.26         | 12.36         | 20.58         | 20.58         | 29.22     |               |               |               |               |                    |                    |                    |                    |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       | 76.00         | 15.25         | 55.54         | 99.22         | 99.22         | 99.22         | 99.22   | 100.00  |      |
| CO2                   | 44.01         | Mass %        | 2.97          | 0.07          | 0.07          | 0.07          | 0.00      | 61.05         | 1.67          | 3.09          | 3.09          | 14.12              | 8.85               | 19.99              | 19.99              | 19.99   | 3.78          | 2.06          | 11.35     | 2.38      | 2.82     |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| NH3                   | 17.03         | Mass %        | 3.96          | 2.32          | 0.08          | 0.08          | 30.88     | 3.27          | 5.31          | 5.31          | 20.87         | 74.04              | 21.07              | 21.07              | 21.07              | 6.48    | 6.48          | 0.05          | 1.71      | 28.93     | 5.77     | 3.82               |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| H2O                   | 18.02         | Mass %        | 92.63         | 28.51         | 20.05         | 20.05         | 27.78     | 6.07          | 8.24          | 8.09          | 90.89         | 55.01              | 13.40              | 58.24              | 58.24              | 89.07   | 3.92          | 95.18         | 43.33     | 89.23     | 92.87    |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| CO                    | 28.01         | Mass %        |               |               |               |               |           | 1.56          | 68.59         |               |               |                    |                    |                    |                    |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| O2                    | 32.00         | Mass %        |               |               |               |               |           | 0.44          | 20.08         |               |               |                    |                    |                    |                    |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| CH4                   | 16.04         | Mass %        |               |               |               |               |           | 1.56          | 68.59         |               |               |                    |                    |                    |                    |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| C2H6                  | 30.07         | Mass %        |               |               |               |               |           | 0.44          | 20.08         |               |               |                    |                    |                    |                    |         |               |               |           |           |          |                    |         |          |       |               |               |               |               |               |               |         |         |      |
| Molar flow            | kmol/h        |               | 3509.8        | 6087.0        | 4601.9        | 4601.9        | 5098.6    | 198.3         | 4.8           | 1309.8        | 3656.8        | 1309.8             | 488.4              | 83.9               | 792.2              | 284.1   | 528.1         | 1.0           | 1540.4    | 2817.0    | 1798.3   | 13.3               | 71.7    | 3597.3   | 1.8   | 0.0           | 27.1          | 2824.3        | 542.7         | 272.0         | 33.7          | 245.8   | 88.4    |      |
| Mass flow             | kg/h          |               | 84488.70      | 217672.20     | 188153.30     | 188153.30     | 202255.40 | 3051.60       | 131.50        | 25000.00      | 67228.00      | 25000.00           | 8418.80            | 1546.50            | 15867.50           | 5327.10 | 10854.40      | 26.20         | 28400.80  | 150182.00 | 32999.30 | 278.80             | 1328.20 | 86124.00 | 28.20 | 0.00          | 1135.00       | 156321.00     | 14270.30      | 3000.00       | 583.00        | 4515.00 | 1022.40 |      |
| Volume flow           | m3/h          |               | 64.00         | 181.00        | 183.10        | 183.10        | 179.40    | 848.60        | 124.10        | 25.10         | 67.60         | 24.90              | 13329.10           | 2197.80            | 14.60              | 4.90    | 9.80          | 24.30         | 120299.00 | 1567.80   | 236.50   | 68.00              | 24.90   | 0.00     | 0.87  | 130.15        | 13.08         | 5.90          | 352.80        | 4.90          | 330.40        |         |         |      |
| Molar weight          | kg/kmol       |               | 18.40         | 34.80         | 40.90         | 40.90         | 36.10     | 27.70         | 27.30         | 18.40         | 18.40         | 18.40              | 19.30              | 18.40              | 20.20              | 20.20   | 20.20         | 28.90         | 18.40     | 35.10     | 18.40    | 30.70              | 18.50   | 18.40    | 28.90 | 28.90         | 0.00          | 54.80         | 28.30         | 18.40         | 17.80         | 18.40   | 17.80   |      |
| Operating temperature | °C            |               | 45.7          | 129.0         | 83.0          | 83.0          | 105.5     | 72.8          | 45.7          | 61.4          | 61.4          | 44.8               | 105.5              | 59.1               | 59.1               | 59.1    | 59.1          | 59.1          | 59.1      | 59.1      | 59.1     | 59.1               | 59.1    | 59.1     | 59.1  | 59.1          | 59.1          | 59.1          | 59.1          | 59.1          | 59.1          | 59.1    | 59.1    | 59.1 |
| Operating pressure    | bar g         |               | 3.9           | 4.1           | 0.4           | 0.3           | 1.2       | 3.2           | 1.0           | 1.0           | 1.0           | 1.2                | 1.1                | 1.1                | 1.1                | 1.1     | 1.1           | 1.1           | 1.1       | 1.1       | 1.1      | 1.1                | 1.1     | 1.1      | 1.1   | 1.1           | 1.1           | 1.1           | 1.1           | 1.1           | 1.1           | 1.1     | 1.1     | 1.1  |
| Density               | kg/m3         |               | 1007.00       | 1103.00       | 1153.00       | 1153.00       | 1128.00   | 3.17          | 1.08          | 994.00        | 994.00        | 1005.00            | 0.71               | 0.70               | 1092.00            | 1092.00 | 1092.00       | 1.18          | 0.24      | 1200.00   | 0.15     | 0.20               | 0.97    | 1002.00  | 1.18  | 1.18          | 1304.00       | 1201.00       | 1091.00       | 1003.00       | 1.68          | 994.70  | 4.97    |      |

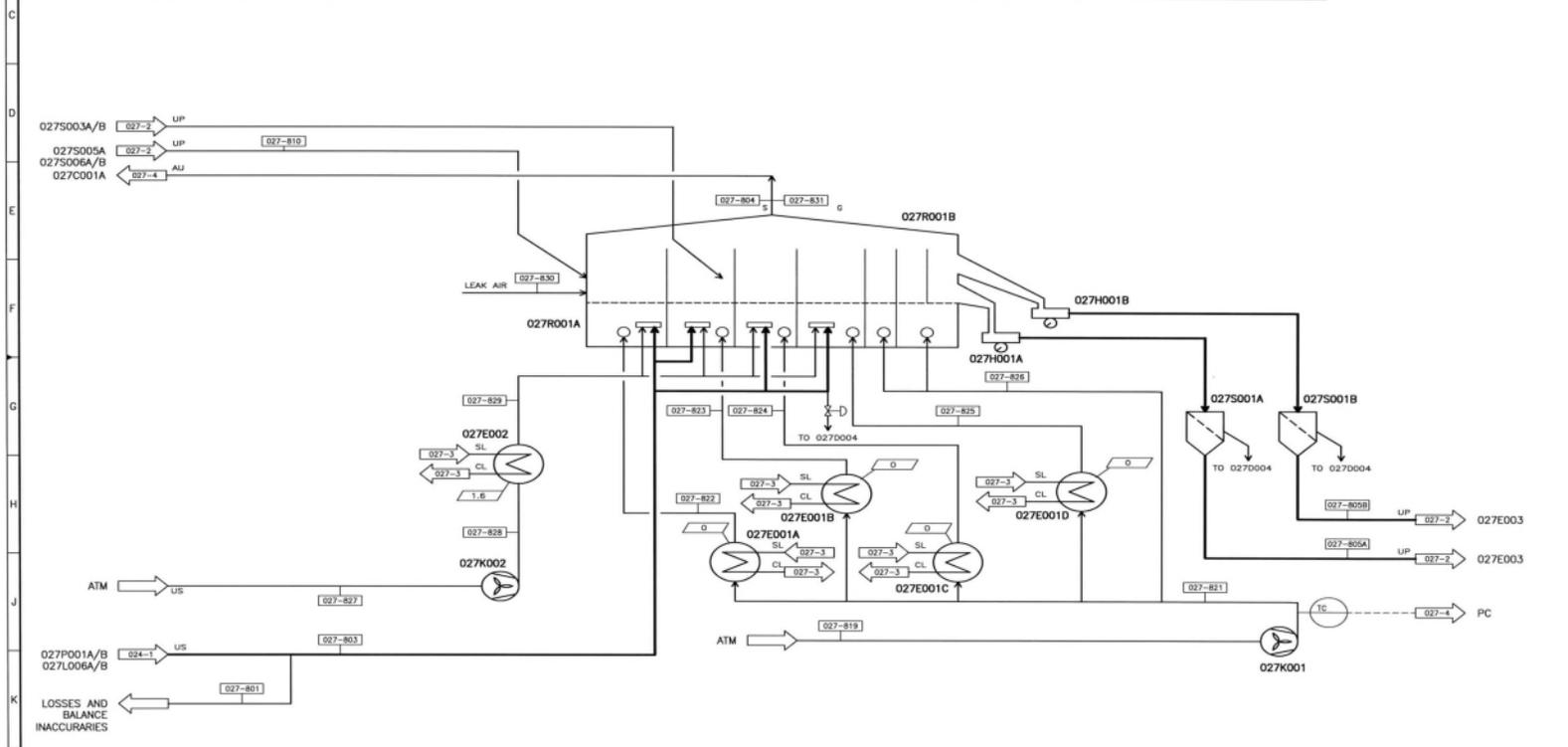


|  |                             |   |                            |                                 |   |
|--|-----------------------------|---|----------------------------|---------------------------------|---|
| 023C005 ATMOSPHERIC ABSORBER           | 024E001 EVAPORATOR          | 023P003A/B UREA SOLUTION PUMP           | 027P002A/B UF PUMP         | 023F010 SEPARATOR PREEVAPORATOR | 023D011 LEVEL TANK FOR FLASH TANK CONDENSER |
| 023E011 PREEVAPORATOR                  | 024E002 CONDENSER           | 023P008A/B LEAN CARBAMATE PUMP          | 023T002 UREA SOLUTION TANK | 024F001 SEPARATOR EVAPORATOR    |   |
| 023E011 FLASH TANK CONDENSER           | 024F002 EJECTOR             | 023P009A/B CIRC. PUMP FOR ATM. ABSORBER | 027T007 UF TANK            | 027P006 UF UNLOADING PUMP       |   |
| 023E012 CIRC. COOLER FOR ATM. ABSORBER | 027F006A/B UREA MELT FILTER | 027P001A/B UREA FEED PUMP               | 023F004 FLASH TANK         |                                 |   |

UAN 11-3100 Document ID 50-UD-D803.00002 Part 000 Group 02 Rev. 02  
 Store Location: Server/Store 1:\p11318\de\sh\er\11318-AM  
 Store Location: Folder Doc-ID:50-UD-D803.00002  
 Store Name 11-3100-10756118 P000R02  
 Pric. Unit [Cdn, USR, ION] Type of Document Order No. [Cdn, Suez] 024  
**SORFERT Fertilizer Complex**  
**Uhde**  
 All rights reserved 2007 Uhde GmbH  
 Drawn: 19.07.07 Shp Name Designation  
 Prepared: 19.07.07 CA Proc. Flow Diagram NO. 024-1  
 Checked: 19.07.07 Lu Evaporation  
 Approved: 19.07.07 In UREA PLANT 3450 t/d

PFD (Process Flow Diagram) de la section d'évaporation (Système 024).

| Stream no.            | 027-801                  | 027-803       | 027-804   | 027-805A | 027-805B  | 027-810   | 027-819    | 027-821    | 027-822    | 027-823    | 027-824    | 027-825    | 027-826    | 027-827     | 027-829     | 027-830     | 027-831  |             |
|-----------------------|--------------------------|---------------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|
| Stream designation    | CALCULATION INACCURACIES | UREA SOLUTION | DUST      | GRANULES | GRANULES  | RECYCLE   | FLUID. AIR | ATOMIZ. AIR | ATOMIZ. AIR | ATOMIZ. AIR | LEAK AIR | EXHAUST AIR |
| Component             | Mass %                   | Mass %        | Mass %    | Mass %   | Mass %    | Mass %    | Mass %     | Mass %     | Mass %     | Mass %     | Mass %     | Mass %     | Mass %     | Mass %      | Mass %      | Mass %      | Mass %   | Mass %      |
| UREA                  | 60.06                    | 12.00         | 94.79     | 99.54    | 98.59     | 98.59     | 98.60      |            |            |            |            |            |            |             |             |             |          |             |
| UREA-BALANCE          | 60.06                    |               |           |          |           |           |            |            |            |            |            |            |            |             |             |             |          |             |
| BIURET                | 103.08                   | -14.00        | 0.72      |          | 0.75      | 0.75      |            |            |            |            |            |            |            |             |             |             |          |             |
| AMMONIA               | 17.03                    | -0.15         | 0.06      | 50 ppm   | 50 ppm    | 50 ppm    | 50 ppm     |            |            |            |            |            |            |             |             |             |          | 0.01        |
| NO2                   | 18.02                    | 101.23        | 4.50      | 0.20     | 0.20      | 0.20      | 0.20       | 3.17       | 3.17       | 3.17       | 3.17       | 3.17       | 3.17       | 3.17        | 3.17        | 3.17        | 3.17     | 3.17        |
| DRY AIR               | 28.98                    |               |           |          |           |           |            | 96.83      | 96.83      | 96.83      | 96.83      | 96.83      | 96.83      | 96.83       | 96.83       | 96.83       | 96.83    | 96.83       |
| FORMALDEHYDE          | 32.03                    | 0.92          | 0.43      | 0.48     | 0.45      | 0.45      | 0.45       |            |            |            |            |            |            |             |             |             |          | 95.86       |
| Water flow            | kmol/h                   | 3.7           | 2850.4    | 84.5     | 1817.3    | 1817.3    | 1203.5     | 16710.3    | 2757.2     | 2757.2     | 2757.2     | 2757.2     | 2757.2     | 5681.5      | 3343.6      | 3343.6      | 3343.6   | 835.5       |
| Mass flow             | kg/h                     | 65.00         | 156251.00 | 5032.25  | 108531.43 | 108531.43 | 71875.00   | 474834.00  | 78347.00   | 78347.00   | 78347.00   | 78347.00   | 78347.00   | 161444.00   | 95011.00    | 95011.00    | 95011.00 | 23741.00    |
| Volume flow           | m <sup>3</sup> /h        | 130.10        | 6.71      | 144.71   | 144.71    | 144.71    | 95.83      | 420207.08  | 420401.89  | 420401.89  | 420401.89  | 420401.89  | 420401.89  | 126816.25   | 84831.25    | 84831.25    | 84831.25 | 599819.00   |
| Motor weight          | kg/atomol                | 34.80         |           |          |           |           |            | 28.48      | 28.48      | 28.48      | 28.48      | 28.48      | 28.48      | 28.48       | 28.48       | 28.48       | 28.48    | 28.48       |
| Operating temperature | °C                       | 133.0         | 133.0     | 107.0    | 94.0      | 94.0      | 80.0       | 36.0       | 46.7       | 46.7       | 46.7       | 46.7       | 46.7       | 46.7        | 36.0        | 87.9        | 135.0    | 36.0        |
| Operating pressure    | bar a                    | 3.0           | 1.0       | 1.0      | 1.0       | 1.0       | 1.0        | 1.0        | 1.1        | 1.1        | 1.1        | 1.1        | 1.1        | 1.1         | 1.1         | 1.5         | 1.0      | 1.0         |
| Initial density       | kg/m <sup>3</sup>        | 1291.00       | 750.00    | 750.00   | 750.00    | 750.00    | 750.00     | 1.13       | 1.18       | 1.18       | 1.18       | 1.18       | 1.18       | 1.18        | 1.12        | 1.45        | 1.24     | 1.13        |



|            |                         |            |                        |            |                          |
|------------|-------------------------|------------|------------------------|------------|--------------------------|
| 027E001A-D | GRAN. FLUID. AIR HEATER | 027H001A/B | GRANULATOR EXTRACTOR   | 027R001A   | GRANULATOR LOWER PART    |
| 027E002    | ATOMIZATION AIR HEATER  | 027K001    | GRANULATION FLUID. FAN | 027R001B   | GRANULATOR UPPER PART    |
|            |                         | 027K002    | GRANULATION ATOM. FAN  | 027S001A/B | GRANULATOR SAFETY SCREEN |

LEGEND:  
 STREAM NO.  
 HEAT DUTY MW  
 NORMALLY CLOSED

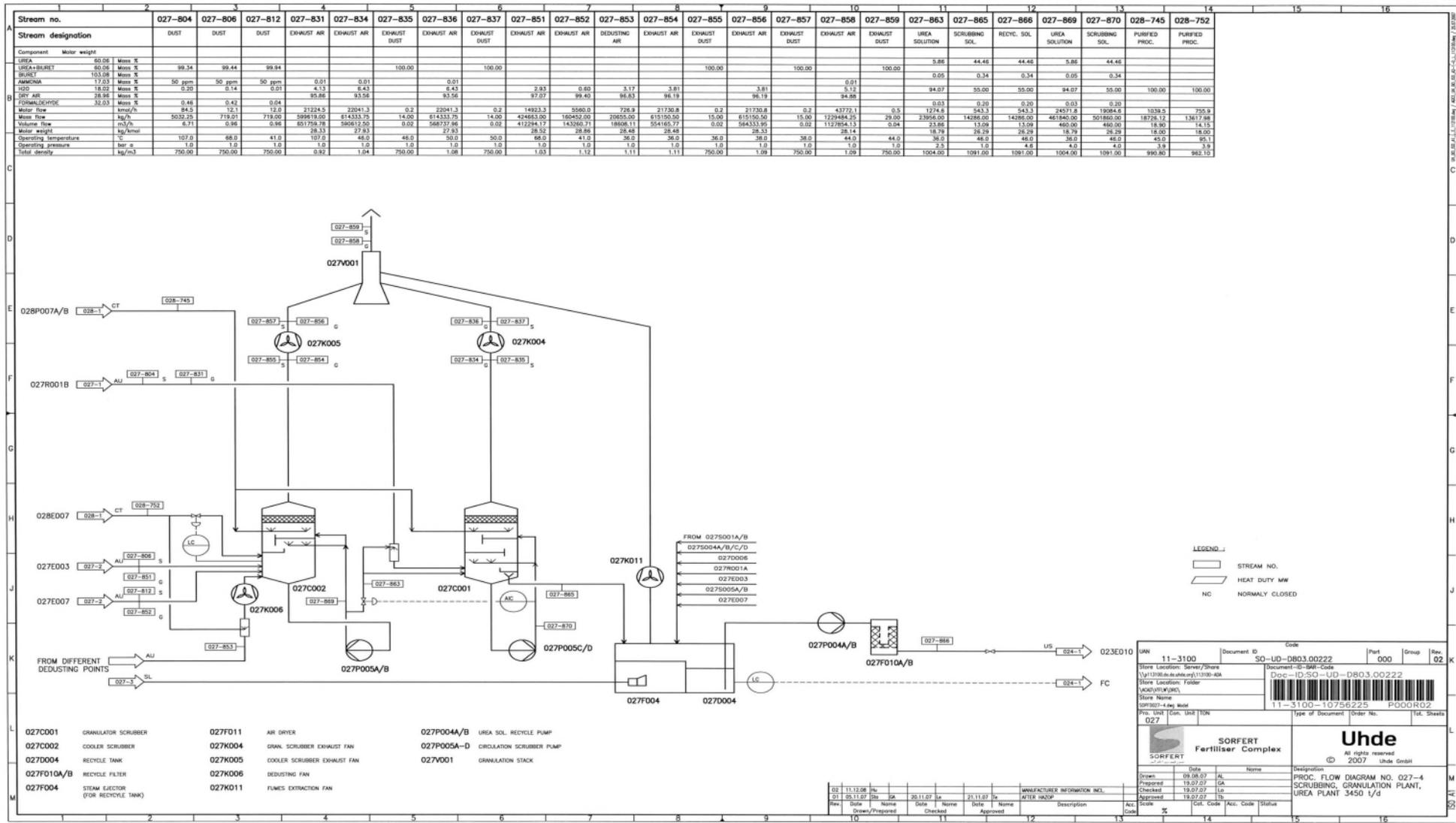
|                            |                               |             |                  |                     |                  |       |                              |          |           |
|----------------------------|-------------------------------|-------------|------------------|---------------------|------------------|-------|------------------------------|----------|-----------|
| UAN                        | 11-3100                       | Document ID | SO-UD-D803.00004 | Part                | 000              | Group |                              | Rev.     | 02        |
| Store Location             | Soretry/Share                 |             | Document ID      |                     | SRE-Code         |       |                              |          |           |
| Store Location             | V/P13100.de.utsa.org/13100-AG |             | Doc-ID           |                     | SO-UD-D803.00004 |       |                              |          |           |
| Store Location             | Folder                        |             | Folder           |                     | Folder           |       |                              |          |           |
| Store Location             | VACUUM/UREA                   |             | Store Name       |                     | 11-3100-10756120 |       | PO00R02                      |          |           |
| Store Name                 | SPP1007-1-ley Mode            |             | Proc. Unit       |                     | 027              |       | Type of Document             |          | Order No. |
| SOLFERT Fertiliser Complex |                               | Uhd         |                  | All rights reserved |                  | 2007  |                              | Uhd GmbH |           |
| Drawn                      | 09.08.07                      | AL          | Name             |                     | Designation      |       | PROC. FLOW DIAGRAM NO. 027-1 |          |           |
| Prepared                   | 19.07.07                      | GA          | Name             |                     | Designation      |       | GRANULATION                  |          |           |
| Checked                    | 19.07.07                      | LD          | Name             |                     | Designation      |       | UREA PLANT 3450 1/d          |          |           |
| Approved                   | 19.07.07                      | Th          | Name             |                     | Designation      |       |                              |          |           |

| Rev. | Date           | Name | Date     | Name | Date     | Name | Description                    | App. Code | Doc. Code | Acc. Code | Status |
|------|----------------|------|----------|------|----------|------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 02   | 11.12.08       | hu   |          |      |          |      | MANUFACTURER INFORMATION INCL. |           |           |           |        |
| 01   | 05.11.07       | ga   | 20.11.07 | ld   | 21.11.07 | th   | AFTER HADOP                    |           |           |           |        |
|      | Drawn/Prepared |      | Checked  |      | Approved |      |                                |           |           |           |        |

PFD (Process Flow Diagram) de L'unité de granulation (système 027-1).







PFD (Process Flow Diagram) de L'unité de granulation (système 027-4).



Tableau 1 : Valeurs pour les différents gaz des chaleurs spécifique  $C_p$  (en J/Kg.K) en fonction de la température.

|                            |                       |                                  | <b>Chaleurs spécifiques en fonction de la Température (C°).</b> |              |              |              |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| <b>Gaz</b>                 | <b>Symbole</b>        | <b>Masse molaire en (Kg/mol)</b> | <b>0</b>  | <b>15</b>    | <b>100</b>   | <b>200</b>   |
| <b>Azote</b>               | <b>N<sub>2</sub></b>  | <b>0.028</b>                     | <b>1037</b>   | <b>1037</b>  | <b>1046</b>  | <b>1052</b>  |
| <b>Dioxyde de carbone</b>  | <b>CO<sub>2</sub></b> | <b>0.044</b>                     | <b>820</b>  | <b>835</b>   | <b>920</b>   | <b>996</b>   |
| <b>Hydrogène</b>           | <b>H<sub>2</sub></b>  | <b>0.002</b>                     | <b>14229</b>  | <b>14279</b> | <b>14438</b> | <b>14521</b> |
| <b>Méthane</b>             | <b>CH<sub>4</sub></b> | <b>0.016</b>                     | <b>2155</b>   | <b>2190</b>  | <b>2452</b>  | <b>2795</b>  |
| <b>Monoxyde de carbone</b> | <b>CO</b>             | <b>0.028</b>                     | <b>1039</b>   | <b>1041</b>  | <b>1046</b>  | <b>1058</b>  |