

## Partie B : Techniques de séparation de flux

19 décembre 2018

### 1 Technique de séparation de matière par colonne d'absorption pour la production d'hydrogène par SMR et ATR

#### 1.1 Principe

Le traitement des gaz par une molécule dérivée de l'ammoniac en solution aqueuse (amine) telle que la N-méthyl-diéthanolamine, connue sous le nom MDEA, permet de retirer les gaz acides comme le  $CO_2$ , de mélanges gazeux<sup>1</sup>. Dans la colonne d'absorption, le flux descendant d'eau chargée en MDEA rencontre le flux ascendant de gaz, et se combine avec les gaz acides qu'il contient, ici le  $CO_2$ . Le mélange gazeux "adouci" sort au sommet de la colonne débarrassé de ses acides, tandis que l'amine "riche" coule en emportant avec elle le gaz acide qu'elle a fixé. Dans le régénérateur, l'amine riche est chauffée pour que s'en évacuent des vapeurs riches en acides, et devient au lieu une amine "pauvre" en acides qui peut alors retourner dans l'absorbeur afin de laver le gaz. Cela permet une récupération du MDEA.

Les colonnes d'absorption à plateaux sont utilisées pour mettre en contact une phase gazeuse et une phase liquide afin d'atteindre un état d'équilibre entre ces phases. On considère que tout le  $CO_2$  est absorbé par la colonne. Le but est d'extraire du gaz les substances dont on n'a pas l'utilité pour garder le produit recherché.

#### 1.2 Dimensionnement

La modélisation de la colonne d'absorption est nécessaire afin de la dimensionner correctement. La colonne d'absorption est une unité effectuant un transfert de matière entre une phase gazeuse et une phase liquide au moyen de flux opposés en contact. Dans l'application de vaporeformage, il est nécessaire d'extraire le  $CO_2$  du gaz produit afin de préserver uniquement le  $H_2$ . Afin de modéliser la colonne d'absorption nous émettons l'hypothèse suivante :

- A chaque étage de la colonne d'absorption l'équilibre de phase est atteint. Cela veut dire que les concentrations molaires en  $CO_2$  du flux gazeux et du flux liquide en sortie de chaque plateau sont les concentrations à l'équilibre de phase.

La colonne d'absorption fonctionne de la manière suivante : le flux liquide et le flux gazeux évoluent à contre sens. Ce croisement de flux favorise une réaction d'absorption la plus complète possible. Au plus les concentrations dans les flux opposés sont différenciées, au plus le potentiel d'absorption est élevé. Le liquide en entrée de la colonne qui ne contient pas ou peu de  $CO_2$ , a un potentiel d'absorption de  $CO_2$  encore très élevé, et tendra à rapidement se charger en  $CO_2$ , même si celui-ci provient de gaz déjà appauvris. En ce qui concerne le bas de la colonne, le liquide est déjà bien chargé en  $CO_2$  suite à sa percolation et son contact avec le gaz ascendant ; il peut cependant encore s'approcher du point de saturation grâce à un échange avec un gaz très riche en  $CO_2$ . Dans les calculs nous noterons,  $X_n$  la fraction molaire en  $CO_2$  du gaz au plateau  $n$  et  $Y_n$  celle du liquide au plateau  $n$ . Le nombre  $n$  équivaut à l'indice du plateau, qui débute à 1 au sommet de la colonne.

##### 1.2.1 Variables et données pour le dimensionnement

---

1. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement\\_des\\_gaz\\_par\\_les\\_amines](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_des_gaz_par_les_amines)

Ce principe de colonne d'absorption permet de fixer deux paramètres : le débit molaire de MDEA (liquide) à introduire dans la colonne, ainsi que le nombre de plateaux nécessaires ; ces variables sont illustrées en Figure 1.

Les fractions molaires de  $CO_2$  dans le gaz et dans le liquide ( $Y_i$  et  $X_i$ ) sont stipulées dans le carnet de projet. Un changement de variable facilite l'application des équations de ce carnet :

$$— Y_a = \frac{y_a}{1 - y_a} = \frac{0.005}{1 - 0.005} = 0.005025$$

$$— X_a = \frac{x_a}{1 - x_a} = 0.0526$$

$$— X_n = \frac{x_n}{1 - x_n} = 0.0718$$

$$— Y_{n+1} = \frac{y_{n+1}}{1 - y_{n+1}} = 0.3333$$

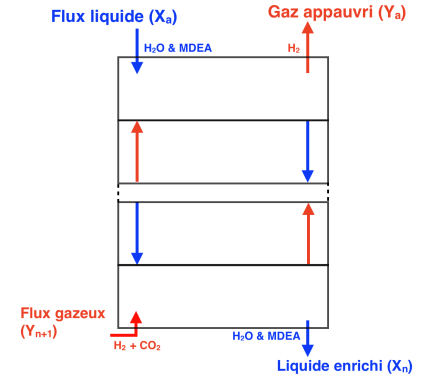


FIGURE 1 – Schéma colonnes d'absorption

### 1.2.2 Calcul du débit massique de l'air

La consigne du carnet pour le débit d'entrée quotidien est de 800 tonnes de gaz composé 25% de  $CO_2$  et 75% de  $H_2$ . Le dimensionnement se base sur ces données est le suivant :

Une conversion en mol/s s'impose afin de travailler dans un système d'unités conventionnelles.

$$— M_{Gaz} = 0.25 \cdot M_{H_2} + 0.75 \cdot M_{CO_2} = 0.0125 \left[ \frac{kg}{mol} \right]$$

$$— m\dot{G}_{az} = 8 \cdot 10^5 \left[ \frac{kg}{jour} \right]$$

$$— n\dot{G}_{az} = 64 \cdot 10^6 \left[ \frac{mol}{jour} \right]$$

$$— n\dot{G}_{az} = 740.74 \left[ \frac{mol}{sec} \right]$$

$$— n\dot{CO}_2 = 185.185 \left[ \frac{mol}{sec} \right]$$

$$— n_{H_2} = 555.556 \left[ \frac{mol}{sec} \right] = G'$$

Le débit molaire de  $H_2$  est maintenant connu et sera indispensable pour la suite des calculs.

### 1.2.3 Calcul du débit molaire de MDEA

Le carnet de projet émet la formule suivante :

$$Y_{N+1} = \frac{L'}{G'} \cdot X_N + \frac{G' \cdot Y_a - L' \cdot X_a}{G'}$$

Toutes les variables dans cette formule sont connues, hormis  $L'$ , le débit molaire de MDEA qui se résume à :

$$L' = \frac{Y_N + 1 \cdot G' - G' \cdot Y_1}{X_n - X_a}$$

$$L' = 9509.8 \left[ \frac{mol}{s} \right]$$

### 1.2.4 Détermination du nombre d'étages dans la colonne

Il est aisé de déterminer le nombre d'étages (plateaux) nécessaires à la colonne par le tracé d'un d'équilibre  $C_{eq}$  et d'une courbe de travail  $C_{tr}$  sur un graphe représentant la fraction molaire de  $CO_2$  dans le gaz par rapport à celle dans le liquide. Un trait horizontal allant du point  $(X_n, Y_n) \in C_{tr}$  intersecte la  $C_{eq}$ . Un trait vertical partant de cette intersection croise  $C_{tr}$ . Le processus de traçage est répété jusqu'à dépasser le point  $(X_a, Y_a)$  et permet de déterminer le nombre de plateaux nécessaires.

La courbe  $C_{eq}$  est la droite qui relie  $(X_a, Y_a)$  et  $(X_n, Y_{n+1})$  selon notre carnet de projet. Selon une autre source<sup>2</sup>, l'équation est :

$$Y - Y_a = \frac{L'}{G'} \cdot (X - X_a)$$

Nous avons travaillé avec la seconde équation. Le résultat est équivalent étant donné que la courbe obtenue passe par les deux points voulus.

Par la résolution graphique illustrée en Figure 2, le nombre d'étages est de 5.

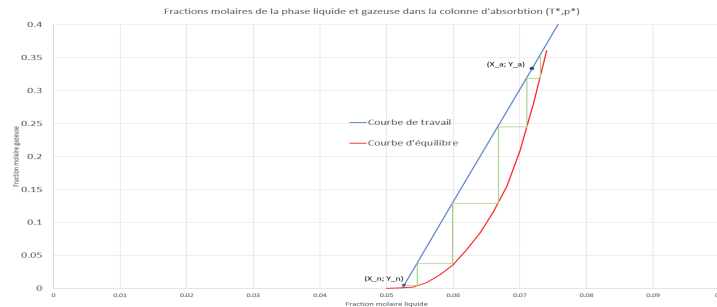


FIGURE 2 – Méthode graphique pour déterminer le nombre d'étages d'une colonne

## 2 Technique de séparation de matière par désalinisation pour la production d'eau pure

### 2.1 Principe

L'abondance de l'eau de mer en fait un choix idéal pour les procédés qui utilisent de l'eau. Mais, pour certains procédés, une eau suffisamment pauvre en sels est nécessaire. Deux principes de désalinisation sont considérés : l'évaporation-condensation et l'osmose inverse.

### 2.2 Hypothèses

Il est raisonnable de se baser sur une température d'eau de mer à 15°C. On suppose que sa capacité calorifique est constante entre 15°C et 100°C et vaut  $\frac{4186J}{(kg * K)}$ . Les pertes énergétiques dues au condensateur et au pompage sont négligées. L'efficacité de l'évaporateur est fixée à 100%. Le débit d'eau pure qui passe par la membrane d'osmose inverse est supposé égal au débit du rétentat. L'évaporateur est supposé rejeter la moitié de l'eau qui a été chauffée. Enfin, toutes les réactions se déroulent dans un système fermé, il n'y a donc aucun échange de matière avec l'extérieur.

### 2.3 Évaporation-condensation

Le procédé d'évaporation-condensation se base sur le fait que la température d'évaporation de l'eau est moins élevée que celles des sels qu'elle contient. Ce procédé consiste à faire évaporer de l'eau, à la transférer en phase gazeuse dans une autre cellule où elle sera condensée.

#### 2.3.1 Consommation de matières premières et d'énergie

L'enthalpie de vaporisation de l'eau est de 2257 kJ/kg<sup>3</sup>. L'énergie théorique pour obtenir 500 tonnes d'eau pure par vaporisation-condensation est donc l'énergie nécessaire pour chauffer 1000

2. [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/absorption\\_bilans.html](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/absorption_bilans.html)

3. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Enthalpie\\_de\\_changement\\_d'état](https://fr.wikipedia.org/wiki/Enthalpie_de_changement_d'état)

tonnes d'eau de 15°C à 100°C plus l'énergie nécessaire pour vaporiser les 500 tonnes d'eau. Cette méthode consomme donc  $(1\,000\,000 [\frac{kg}{j}] * 4.186 [\frac{kJ}{kg \cdot K}] * 85 [K]) + (500\,000 [\frac{kg}{j}] * 2257 [\frac{kJ}{kg}]) = 1\,490\,000\,000 [\frac{kJ}{j}]$ . La puissance moyenne nécessaire de 17 200[kW] avec un apport de 1000 tonnes d'eau de mer par jour (pour notre projet, cela correspond à 53.46 kJ/mol de  $H_2$ ; énergie de l'électrolyse de l'eau : 385 kJ/mol de  $H_2$ ).

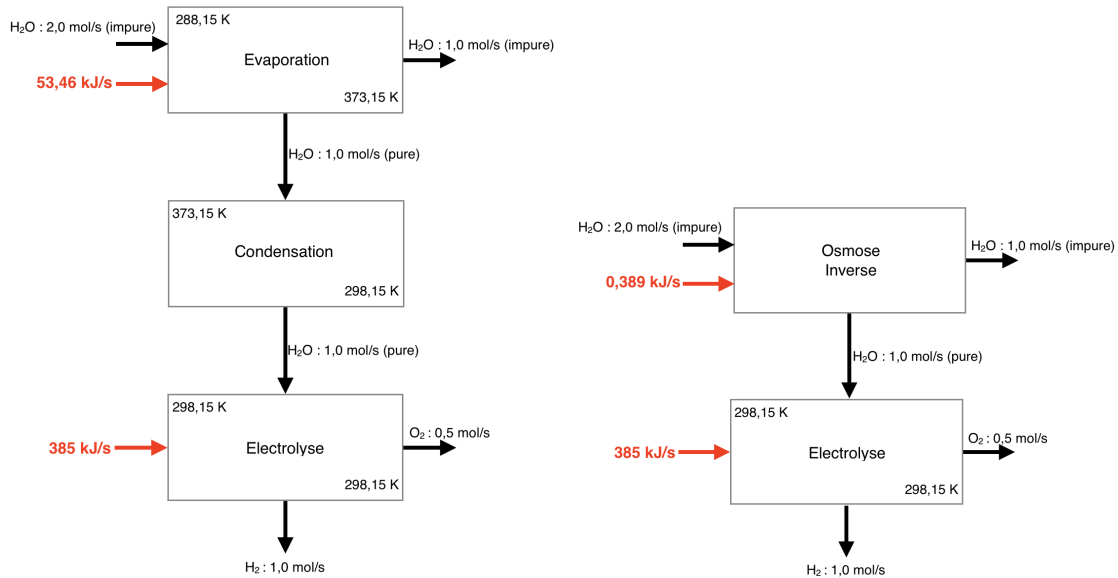


FIGURE 3 – Flow-sheet Evaporation-condensation Osmose inverse

## 2.4 Osmose inverse

L'osmose inverse utilise une membrane perméable à l'eau mais très peu perméable aux ions de sel. Le but est donc de filtrer de l'eau de mer par cette membrane. Comme ce passage concentre le sel d'un seul côté de la membrane, le principe d'osmose intervient et exerce une pression sur l'eau pure pour lui faire prendre le chemin inverse à celui désiré. Il faut donc utiliser un travail mécanique pour appliquer une pression sur l'eau de mer afin de combattre la pression osmotique, le but étant de concentrer le sel d'un côté de la membrane pour sa séparation.

### 2.4.1 Consommation de matières premières et d'énergie

Selon les données de l'annexe sur l'osmose inverse, une membrane d'une surface de  $2.6 [m^2]$  permet d'obtenir  $3.98 [\frac{m^3}{j}]$  d'eau pure, en consommant  $10798 [kJ]$  par mètre-cube d'eau en entrée. Nous devons produire 900 tonnes d'eau pure par jour. Il nous faudrait donc 227 de ces membranes. Le débit d'entrée valant deux fois le débit d'eau pure par hypothèse, le système d'osmose inverse consomme  $1800 [\frac{m^3}{j}] * 10\,798 [\frac{kJ}{m^3}] = 19\,436\,400 [\frac{kJ}{j}]$ . Cela correspond à une puissance moyenne de 225 [kW].

## 2.5 Comparaison des procédés

L'osmose inverse, s'appuyant sur des techniques mécaniques et non thermiques, est le procédé de désalinisation le plus intéressant en raison de sa beaucoup plus faible consommation énergétique. Elle consomme beaucoup fois moins que l'évaporation, alors même qu'on considère que l'évaporateur à un rendement de 100%.