

Travail pratique de diplôme

Fabian Arnold
Diplômant GM
EPFL
1015 Lausanne

18. février 2005

Résumé

Dans le cadre de mon travail pratique de diplôme, je me suis intéressé à une unité de séparation d'air produisant de l'azote et de l'oxygène pur utilisé par la Lonza AG à Viège.

La séparation se fait par rectification à l'intérieur d'une double colonne cryogénique. Après compression, déshumidification et liquéfaction partielle, l'air entre dans une colonne haute-pression, produisant un distillat d'azote pur. Le résiduaire, enrichi d'oxygène, est détendu dans la colonne basse-pression afin d'en dégager de l'oxygène pur.

L'unité de séparation d'air est équipée d'un système de contrôle mesurant la qualité des produits en-ligne. Tous les paramètres importants de l'unité peuvent ainsi être supervisés. A ce jour, l'unité est opérée manuellement depuis le système de contrôle.

Le but de ce projet est de concevoir une stratégie de réglage qui permet de contrôler la qualité des produits de manière automatique. L'opérateur réglant actuellement les qualités pourra ainsi s'occuper d'autres travaux et s'éloigner de son poste pour des temps plus étendus.

Une courte description de l'installation est présentée. Après une analyse du système à régler et le choix des grandeurs de réglage, il est montré en simulation qu'un réglage automatique des qualités par multiboucle est possible. Des mesures à prendre pour une amélioration du comportement sont décrites par la suite et les paramètres pour l'implantation sont calculés.

La possibilité d'étendre le système en réglant aussi le niveau du gazomètre est discutée. Finalement des propositions pour diminuer les perturbations sur le système sont données.

Le résultat final du travail est qu'une automatisation n'est pas requise et même indésirable.

Table des matières

1 Description de l'installation	5
1.1 Principe de base	5
1.2 Description du processus	6
1.2.1 Le produit de base	7
1.2.2 La compression	7
1.2.3 Épuration	8
1.2.4 Refroidissement	9
1.2.5 Rectification	9
1.3 Interface en-ligne	11
2 Définition du problème	13
2.1 Le système à régler	13
2.2 Le système réduit	14
2.3 Simulation de l'installation	16
3 Identification du système	18
3.1 Description de l'essai	18
3.2 Résultats de l'identification	19
4 Stratégie de réglage	24
4.1 Réglage par multiboucle	24
4.1.1 Conditions-cadre	25
4.2 Dimensionnement du régulateur	25
4.2.1 Méthode de Ziegler-Nichols	26
4.2.2 Méthode de Cohen-Coon	26
4.2.3 Par imposition du modèle en boucle fermée	27
4.3 Comparaison des méthodes	27
4.4 Prédicteur de Smith	28
4.5 Robustesse	31
4.6 Faisabilité	31
4.7 Compensation de perturbation	31

5 Réglage de niveau du gazomètre	36
5.1 Le système	36
5.2 Identification	37
5.3 Réglage par multiboucle	38
5.3.1 RGA	39
5.3.2 RGA statique	39
5.4 Adaptation du régulateur	40
5.4.1 Simulation	41
6 Implantation	43
6.1 Réglage par multiboucle	43
6.2 Amélioration des performances	44
6.2.1 Prédicteur de Smith	44
6.2.2 Compensation de perturbation	44
6.3 Réglage du niveau du gazomètre	45
7 Réduction de la perturbation	46
7.1 Cause de la perturbation	46
7.2 Propositions	47
8 Réalisation	49

Liste des symboles

a	paramètre intervenant dans la première méthode de Ziegler-Nichols
a_1	coefficient du polynôme au dénominateur d'une transformée en z rationnelle
\hat{a}_1	estimation de a_1
A	gain statique
\hat{A}	estimation du gain statique
b_1	coefficient du polynôme au dénominateur d'une transformée en z rationnelle
\hat{b}_1	estimation de b_1
C_h	capacité hydraulique
$e(t)$	écart entre la grandeur de consigne et la grandeur à régler
$G(s)$	matrice de transfert analogique du système à régler
$G'(s)$	matrice de transfert analogique du système à régler sans les retards purs
$G_F(s)$	fonction de transfert de la compensation de perturbation
$G_P(s)$	fonction de transfert de la perturbation
$G_S(s)$	fonction de transfert du prédicteur de Smith
h	période d'échantillonnage
$H(z)$	fonction de transfert échantillonnée
$h - p$	haute-pression
IAE	intégrale de l'erreur en valeur absolue
$ITAE$	intégrale de l'erreur en valeur absolue pondérée par le temps
k	paramètre intervenant dans la méthode de Cohen-Coon
$K(s)$	fonction de transfert du régulateur
K_p	gain d'un régulateur P , PD , PI ou PID
n	niveau du gazomètre
n_c	consigne du niveau du gazomètre
N	Niederlinski index
$p(t)$	pression
P_0	pression initiale
P_∞	pression finale
pr	pré-rotation des turbocompresseurs

P	régulateur proportionnel
PD	régulateur proportionnel dérivateur
PI	régulateur proportionnel intégral
PID	régulateur proportionnel intégral dérivateur
q_{N_2}	qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression
q_{O_2}	qualité de l'oxygène pur
$q_{N_{2c}}$	consigne de la qualité d'azote impur de la colonne haute-pression
$q_{O_{2c}}$	consigne de la qualité de l'oxygène pur
Q	débit
RGA	matrice des gains relatifs
R_h	résistance hydraulique
s	variable de la transformée de Laplace
SV_{N_2}	servovanne de prélèvement d'azote impur de la colonne haute-pression
SV_{O_2}	servovanne de prélèvement d'oxygène pur
t	temps
T	temps final
T_i	constante d'intégration d'un régulateur PI ou PID
T_d	constante de dérivation d'un régulateur PD ou PID
$u(k)$	entrée d'un système discrète
$U(z)$	transformée en z de $u(k)$
$y(k)$	mesure au temps $t = kh$
Y	vecteur des mesures
$Y(z)$	transformée en z de $y(k)$
z	variable de la transformée en z
ϵ	erreur de prédiction
ϕ	matrice d'observations
θ	valeur du retard pur
Θ	vecteur des paramètres
$\hat{\Theta}$	vecteur des paramètres estimé
τ	constante de temps
τ_{BF}	constante de temps en boucle fermée
$\hat{\tau}$	constante de temps estimé
ω_c	pulsion de coupure

Chapitre 1

Description de l'installation

1.1 Principe de base

Le principe de base du fonctionnement de cette unité de séparation d'air est la liquéfaction de l'air, suivie d'une rectification et d'une séparation de l'oxygène et de l'azote. Le schéma fonctionnel de cette unité est présenté au moyen de la figure 1.1. Il est possible de séparer l'unité en quatre parties fonctionnelles : Compression, séchage, refroidissement et rectification.

Compression : Le produit de base est l'air ambiant, aspiré directement au-dessus du Rhône. Au moyen de deux turbocompresseurs qui travaillent en parallèle, l'air est comprimé à environ 6 bar¹. L'air passe à travers un filtre de poussière ainsi que par des échangeurs de chaleur qui le refroidissent à environ 15°C.

Épuration : L'air refroidi et comprimé est déshydraté dans les tamis moléculaires. Etant donné que l'humidité et le dioxyde de carbone conduiraient à la formation de glace dans la partie cryogène de l'unité, il est impératif que ces composantes soient retenues. Les hydrocarbures, surtout l'acétylène, sont également enlevés. La température de fonctionnement est de 10°C et les tamis moléculaires sont disposés par paire - l'un est en adsorption, l'autre est régénéré.

Refroidissement : L'air est refroidi dans les échangeurs de chaleur qui précèdent la coldbox. Les produits sortant refroidissent l'air entrant à environ -173°C tout en se chauffant eux-mêmes approximativement à température ambiante.

Rectification : La rectification se fait dans les colonnes de rectification qui sont installées à l'intérieur de la coldbox. L'air partiellement liquide

¹La pression est toujours indiquée en bar absolu

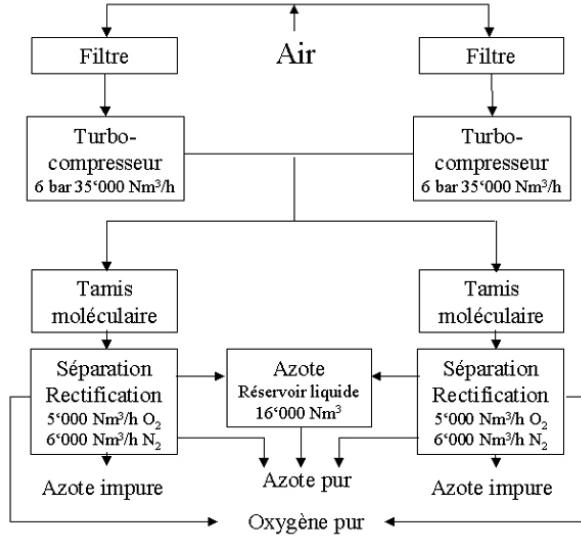


FIG. 1.1 – Schéma fonctionnel LTA. Une esquisse de principe du processus de la séparation d'air plus détaillé est donnée en annexe.

entre dans la colonne haute-pression (env. 6 bar) à l'intérieur de laquelle une séparation entre azote pur et un mélange contenant environ 38 Vol.% d'oxygène a lieu. Ce mélange est détendu sous forme liquide vers le milieu dans la colonne basse-pression qui se trouve immédiatement au-dessus de la colonne haute-pression. La colonne basse-pression travaille avec une pression d'environ 1.5 bar. Le condenseur de la colonne haute-pression, qui relie les deux colonnes, sert en même temps d'évaporateur pour la colonne basse-pression.

Environ la moitié de l'azote condensé dans la colonne haute-pression est détendue sur la tête de la colonne basse-pression pour gagner encore une fois en pureté. La partie restante représente le reflux de la colonne haute-pression.

C'est dans la colonne basse-pression que la séparation finale a lieu et que de l'oxygène de la pureté désirée peut être obtenue.

1.2 Description du processus

Une esquisse de principe est donnée en annexe afin d'illustrer la présente section.

N_2	78.08 Vol.%
O_2	20.95 Vol.%
Ar	0.93 Vol.%
CO_2	0.03 Vol.%

TAB. 1.1 – Composition de l'air atmosphérique

1.2.1 Le produit de base

La composition de l'air : L'air atmosphérique est d'une composition constante, mis à part les changements de l'humidité. Ses composantes principales et leur fraction volumique sont représentées dans le tableau 1.1. L'air est composé à 99.03 Vol.% d'azote et d'oxygène. Cette fraction est approximativement constante au monde entier. Il en est de même pour les gaz inertes qui représentent 0.93 Vol.%. Les autres composantes varient dans leur fraction selon les circonstances locales. La teneur en vapeur d'eau dépend principalement des conditions météorologiques.

Propriétés des composantes de l'air : Le dioxyde de carbone va, comme l'eau, se solidifier. En se formant, la neige carbonique risque d'obstruer les circuits. Les hydrocarbures menacent, de leur côté, de provoquer des explosions à l'intérieur de l'installation en présence de l'oxygène produit. La concentration de l'acétylène dans l'oxygène liquide ne doit pas dépasser 0.1 ppm. Ces produits doivent être éliminés avant la séparation de l'air. Les différents points d'ébullition des composantes principales permettent une séparation de l'air par rectification. Sur le tableau 1.2 sont représentées les propriétés des composantes. L'air est aspiré immédiatement au-dessus du Rhône, car il y est le plus propre.

1.2.2 La compression

Deux turbocompresseurs travaillent en parallèle pour comprimer l'air dans la même conduite qui alimente par la suite les tamis moléculaires. Il s'agit de turbocompresseurs isothermes à cinq étages avec quatre refroidisseurs latéraux. Ils disposent d'une pré-rotation réglable permettant d'adapter le volume d'air comprimé selon la demande des produits.

Les données techniques pour un turbocompresseur sont mentionnées dans le tableau 1.3. L'air comprimé se chauffe à environ $75^\circ C$ et est refroidi par la suite dans un échangeur de chaleur avec de l'eau du Rhône à environ $15^\circ C$. Durant ce processus de refroidissement, l'air perd déjà une partie de l'eau qu'il contient.

En été, il est possible de compenser les pertes en puissance provenant de la

Matière	Poids moléculaire	Phase liquide	
		Point d'ébullition (760Torr)°C	Chaleur spécifique kcal/Nm³
Hélium <i>He</i>	4.003	-268.9	0.191
Néon <i>Ne</i>	20.183	-246.1	0.401
Argon <i>Ar</i>	39.944	-185.9	0.449
Hydrogène <i>H₂</i>	2.016	-254.8	0.2006
Azote <i>N₂</i>	28.016	-185.8	0.616
Oxygène <i>O₂</i>	32.000	-183.0	0.577
Air	28.960	-194.5	—
Vapeur d'eau <i>H₂O</i>	18.016	100.0	0.806
Dioxyde de carbone <i>CO₂</i>	44.011	-78.5	0.850
Méthane <i>CH₄</i>	16.043	-161.5	0.588
Ethane <i>C₂H₆</i>	30.070	-88.6	0.774
Ethylén <i>C₂H₄</i>	28.054	-103.9	0.837
Acétylène <i>C₂H₂</i>	26.038	-83.6	—

Matière	Point critique			Phase vapeur	
	Température °C	Pression kg/cm²	Poids spécifique kg/l	Poids spécifique kg/cm³	Chaleur spécifique (15°C)kcal/Nm·³C
<i>He</i>	-268.0	2.335	0.0693	0.1785	0.2232
<i>Ne</i>	-228.7	28.130	0.484	0.8999	0.2234
<i>Ar</i>	-122.5	49.600	0.531	1.7839	0.2234
<i>H₂</i>	-239.9	13.400	0.030	0.08987	0.3070
<i>N₂</i>	-147.1	34.600	0.311	1.2505	0.3100
<i>O₂</i>	-118.9	51.340	0.430	1.42895	0.3134
Air	-140.7	38.450	0.310	1.2928	0.3112
<i>H₂O</i>	374.2	225.700	0.329	0.7680	0.3600
<i>CO₂</i>	31.0	75.300	0.468	1.9768	0.3920
<i>CH₄</i>	-82.5	47.120	0.162	0.7170	0.3770
<i>C₂H₆</i>	32.1	49.800	0.213	1.3560	0.5450
<i>C₂H₄</i>	9.6	52.600	0.216	1.2605	0.4520
<i>C₂H₂</i>	36.0	64.000	0.231	1.1709	0.4630

TAB. 1.2 – Propriétés des composantes de l'air.

Volume aspiré	36540m³/h
Température d'entrée	15°C
Température de sortie	75°C
<i>rpm</i>	8716
Puissance	2520kW
Liquide de refroidissement	180m³/h

TAB. 1.3 – Données techniques des turbocompresseurs

densité inférieure de l'air en utilisant, en plus des compresseurs, les ventilateurs d'augmentation de pression.

1.2.3 Épuration

Pour l'épuration de l'air, chaque unité de séparation dispose de deux tamis moléculaires pour enlever avant tout l'humidité, le dioxyde de carbone ainsi que les hydrocarbures. Pendant que l'un est en adsorption, l'autre est régénéré. Toutes les deux heures, le tamis est changé de manière automatique. De l'azote impur chaud est utilisé pour la régénération, puis le tamis doit être refroidi à 10°C avant utilisation. Quelques données techniques sont mentionnées sur le tableau 1.4.

Eau dans l'air sortant	$< 0.1 \text{ ppm}$
CO_2 dans l'air sortant	$< 0.5 \text{ ppm}$
Température de sortie	$75^\circ C$
Flux	$35000 Nm^3/h$
Pression	6.7 bar
Gaz de régénération	$7200 Nm^3/h N_2$ impur
Température du gaz de régénération	$7200 Nm^3/h N_2$ impur

TAB. 1.4 – Données techniques des tamis moléculaires

1.2.4 Refroidissement

Dans un échangeur de chaleur, les produits sortant sont chauffés environ à température ambiante tout en refroidissant simultanément l'air entrant à environ $-172^\circ C$. Vers le milieu de l'échangeur de chaleur, une partie de l'air est prise à approximativement $-110^\circ C$, pour alimenter une turbine de détente. Lors de la détente, du courant électrique est produit et introduit au réseau. Par effet Joule-Thompson le gaz, par son travail, se refroidit à $-150^\circ C$. Cet air alimente la colonne basse-pression. Le volume d'air qui est détendu par la turbine dépend du niveau d'oxygène liquide contenu dans le condenseur principal, et donc de la température. Finalement, la turbine est utilisée pour produire le froid nécessaire et pour compenser les pertes thermiques qui subsistent malgré l'isolation de la coldbox.

Lors de la mise en marche de l'unité de séparation d'air, l'isolation ainsi que tous les éléments de la coldbox doivent être refroidis. Pour ce faire, on dispose d'une deuxième turbine de détente qui est arrêtée une fois l'équilibre de l'unité atteint.

1.2.5 Rectification

Colonne haute-pression : L'air entrant dans la colonne haute-pression est partiellement liquide, à une température de $-172^\circ C$ et une pression de 5.8 bar . Il est par la suite séparé en un mélange liquide enrichi d'oxygène (vers 40 Vol.% O_2) et en de l'azote presque pur.

Au-dessus de la colonne haute-pression se trouve le condenseur principal. L'azote de la colonne haute-pression parcourt des petits tuyaux qui sont refroidis par l'oxygène liquide de la colonne basse-pression et s'y condense en vaporisant une quantité équivalente d'oxygène de la colonne basse-pression. Ceci est rendu possible grâce à la différence de pression entre les colonnes et le fait que le point d'ébullition augmente avec la pression. L'azote condensé forme un reflux dans la colonne dont environ la moitié est prise sous cette phase liquide, refroidie dans un échangeur de chaleur par l'azote pur sortant, et par la suite détendue sur la tête de la colonne basse-pression.

Au milieu de la colonne, deux flux sont pris sous forme liquide et vapeur. Le flux sous forme vapeur est condensé dans le condenseur secondaire en vaporisant de l'oxygène et par la suite détendu de paire avec le flux liquide en dessous de la tête de la colonne basse-pression.

Le résiduaire enrichi d'oxygène est refroidi dans un échangeur de chaleur par l'azote impur, avant d'être détendu à environ la même hauteur que l'azote sous la tête de la colonne.

Pour garantir un niveau de liquide suffisant au bas de la colonne haute-pression, une partie de l'oxygène est pris en permanence sous forme vapeur et liquéfié par l'azote impur.

Colonne basse-pression : La colonne basse-pression travaille à une pression d'environ 1.3 bar. Le résiduaire de la colonne haute-pression et l'air provenant de la turbine de détente y sont séparés en de l'azote et de l'oxygène purs.

Le liquide de la colonne basse-pression s'est enrichi d'oxygène jusqu'à la pureté désirée. Une partie de l'oxygène évaporé dans le condenseur principal est prise et quitte l'installation à travers le grand échangeur de chaleur qui refroidit l'air entrant.

Une autre partie de l'oxygène est prise sous forme liquide et est évaporé dans le condenseur secondaire comme mentionné plus haut. De même la manière, la vapeur est évacuée à travers l'échangeur de chaleur.

De l'azote pur à -192°C est obtenu comme distillat de la colonne basse-pression. Cet azote s'évacue comme indiqué, à travers un échangeur de chaleur qui sert à refroidir l'azote provenant de la colonne haute-pression et par la suite à travers l'échangeur de chaleur principal sur le réseau d'azote. L'azote excédentaire est réglé sur toit.

Par ailleurs, un grand flux d'azote impur est pris vers le milieu de la colonne. Il est utilisé en partie pour la régénération des tamis moléculaires. Le reste est réglé sur toit.

Condenseur secondaire : Les hydrocarbures contenus dans l'air sont en grande partie adsorbés dans les tamis moléculaires. En revanche, une petite fraction reste dans l'air et l'oxygène dans le condenseur principal peut ainsi s'enrichir d'acétylène - le plus dangereux des hydrocarbures - par évaporation continue de l'oxygène, jusqu'à une solidification et explosion de l'acétylène dans l'oxygène liquide.

Pour éviter ceci, une partie de l'oxygène est prise sous forme liquide à travers le condenseur secondaire où elle est évaporée.

La référence [3] explique plus en détail le principe de la distillation tandis que [4] traite les installations cryogènes et entre autre aussi la double colonne de distillation utilisée pour la séparation d'air.

1.3 Interface en-ligne

L'installation est contrôlée via une interface en-ligne. Elle permet à l'employé de superviser toutes les données importantes au bon fonctionnement de l'installation depuis son poste de travail. Pour chaque grandeur, des valeurs limites sont définies. Lorsque la grandeur sort des limites, un alarme avertit l'employé.

Un deuxième intervalle plus grand est défini. Lorsqu'une valeur sort de ce deuxième intervalle, le système agit de lui-même. S'il s'agit d'une qualité de l'un des produits, le produit est réglé sur toit car il est inutilisable et l'installation reste en marche. Par contre, si le niveau dans le condenseur passe par exemple sous la limite inférieure, l'installation est arrêtée par un arrêt de secours automatique.

En plus de la supervision, le travailleur a la possibilité d'agir sur les servovannes et les pré-rotations des turbocompresseurs. Ceci permet d'adapter tous les paramètres à la charge de l'installation pour le fonctionnement normal.

Lors de la mise en marche de l'unité ou lors de problèmes techniques, il est néanmoins nécessaire d'ouvrir ou de fermer des vannes sur place. Le logiciel utilisé est DeltaV, distribué par Emerson Process Management. Il permet en même temps de présenter au travailleur une interface facile et intuitive à utiliser et d'implanter des régulateurs. Sur le graphique 1.2, on voit l'aperçu de l'unité de séparation d'air. Le même graphique se trouve en annexe sous format A4.

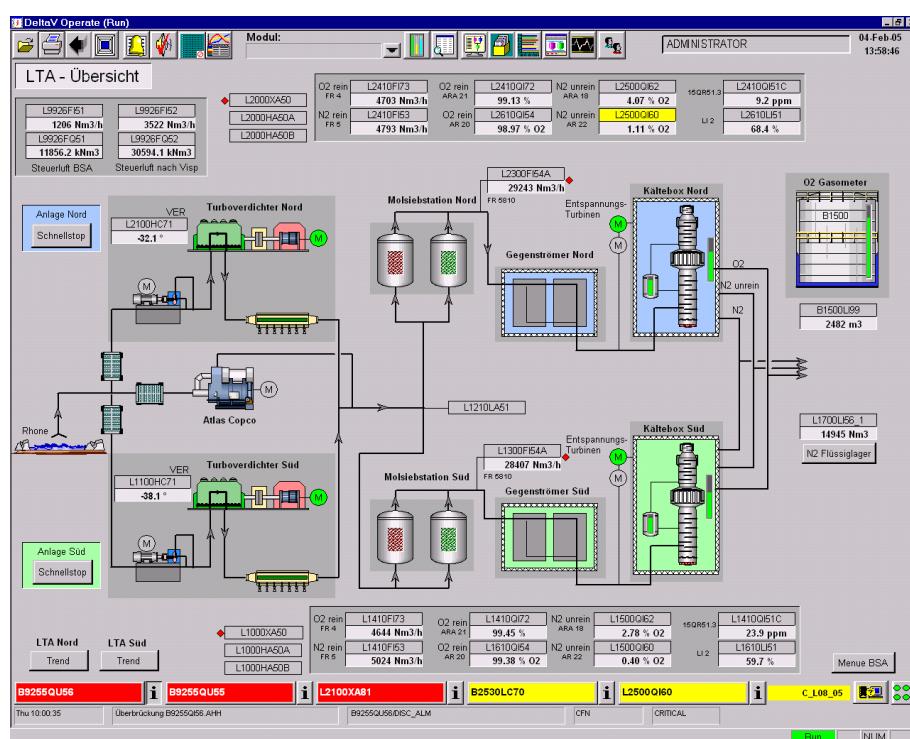


FIG. 1.2 – Screenshot de l’aperçu de l’unité de séparation d’air sous DeltaV.

Chapitre 2

Définition du problème

2.1 Le système à régler

Les grandeurs à régler : Les produits de l'unité de séparation d'air sont l'oxygène et l'azote. L'azote impur, étant utilisé seulement pour la régénération des tamis moléculaires, n'a qu'une importance secondaire en comparaison avec la qualité de ces deux produits, qui est, elle, centrale.

Pour l'oxygène, il faut que la teneur en N_2 ne dépasse pas la valeur de 80 ppm. En dépassant cette limite une formation trop importante de gaz NO_x a lieu lorsque l'oxygène est brûlé dans l'installation de crackage d'essence. Ceci peut mener à une explosion. Dans le régime stationnaire, il suffit de garder une qualité d'oxygène supérieure à 98.3 Vol.% afin de rester sous la limite de 80 ppm d'azote, tout en ne produisant pas d'oxygène trop pur. La raison pour laquelle on ne veut pas avoir de l'oxygène de pureté trop élevée est qu'en augmentant sa qualité il est nécessaire de diminuer sa quantité, et qu'en conséquence une partie de l'oxygène part avec l'azote impur, ce qui représente des pertes.

D'autre part, la qualité de l'azote doit être suffisante pour garantir son caractère inerte. C'est pour ça que la teneur en O_2 est limitant.

La teneur en argon n'est pas importante pour les deux produits et ne doit pas être contrôlée.

Les grandeurs de réglage : La servovanne au prélèvement d'oxygène peut être utilisée pour régler la qualité de l'oxygène. En outre, la position de la servovanne utilisée pour adapter la quantité d'azote impur prise de la colonne de haute-pression et détendue dans la colonne basse-pression peut être utilisée comme une deuxième grandeur de réglage. Elle permet de régler la quantité d'oxygène dans ce même flux. La qualité de l'azote pur suit la fraction d'oxygène dans l'azote impur de la colonne haute-pression. En même temps, on peut assurer un reflux suffisant et donc un niveau dans le condenseur principal avec une tendance à monter ou descendre monotone.

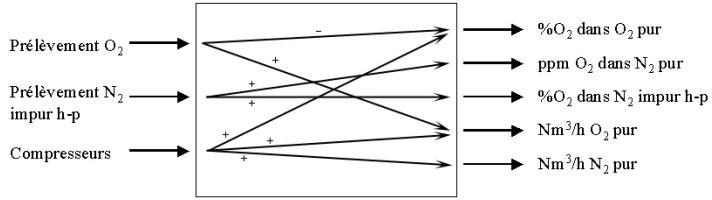


FIG. 2.1 – Interdépendances entrées-sorties.

En plus des servovannes, on dispose des turbocompresseurs qui servent principalement à adapter le flux d'air entrant selon les besoins en volume des produits. Malheureusement, ils ne peuvent être utilisés que sur une plage très limitée car il faut éviter le pompage.

Les interdépendances entrées-sorties sont représentées sur la figure 2.1.

Les perturbations agissant sur le système : Les variations de la demande d'oxygène constituent une perturbation importante. Elles rendent en effet nécessaire une augmentation du flux d'air entrant et par conséquent une adaptation des servovannes pour garantir la qualité des produits.

Une autre perturbation possible vient du fait que de l'oxygène est tiré périodiquement sous forme liquide du condenseur principal, provoquant une diminution du niveau du condenseur.

Les perturbations provenant des tamis moléculaires lors du changement de l'un sur l'autre sont les plus importantes. Avant le changement, une partie de l'air entrant est utilisé pour la mise sous pression du tamis qui n'est pas en utilisation. Ceci produit des fluctuations de la qualité des produits ainsi que de leur quantité et en conséquence du niveau du gazomètre. Cette perturbation est analysée plus en détail dans la section traitant l'identification. Les changements des conditions météorologiques par contre n'affectent que la limite de pompage des turbocompresseurs et n'ont pas d'influence sur la température du flux d'air entrant refroidi par l'eau du Rhône.

2.2 Le système réduit

Lors de la mise en marche après un arrêt complet de l'installation, comme c'est le cas tous les deux ans, toute une série de vannes doit être positionnée manuellement. Ceci rend une automatisation de la mise en marche intéressante d'un point de vue économique. La mise en marche nécessite une bonne compréhension de l'installation et de l'expérience.

Cette expérience et ce savoir-faire se révèlent particulièrement importants lors de problèmes ou de situations critiques avec l'installation. Une automatisation de la mise en marche provoquerait la disparition de ce savoir-faire

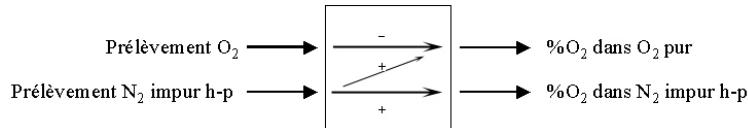


FIG. 2.2 – Interdépendances entrées-sorties du système réduit.

et ses conséquences exactes ne sont pas prévisibles.

Pour ces raisons, une automatisation du réglage des qualités ne serait souhaitable uniquement dans le cas où l'installation serait en état de marche stable. Ce système automatique pourrait alors avertir l'opérateur dès que les conditions de bord pour son fonctionnement ne seraient plus données, par exemple en raison d'un problème technique, permettant ainsi de garder la situation manuellement sous contrôle.

Les interdépendances représentées à la figure 2.2 définissent finalement le système réduit à régler. En garantissant un bon réglage de la qualité de l'oxygène, mesurée par le pourcentage en volume d'oxygène contenu dans l'oxygène pur, et de la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression, mesurée par le pourcentage en volume d'oxygène qu'il contient, l'unité de séparation d'air reste en équilibre et tous les produits restent dans les spécifications.

La qualité de l'azote pur est réglée indirectement à travers le réglage de l'azote impur de la colonne haute-pression. Ceci est rendu possible du fait que la qualité de l'azote pur est proportionnelle à la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression. L'avantage de régler l'azote impur à la place de l'azote pur est qu'on peut, en plus de la qualité de l'azote pur, garantir un reflux suffisant dans la colonne basse-pression, et assurer ainsi un régime stationnaire et stable.

Le choix du pourcentage d'oxygène dans l'oxygène comme grandeur à régler au lieu des *ppm* N_2 dans l'oxygène permet de minimiser les pertes d'oxygène à travers l'azote impur de la colonne basse-pression. En gardant la qualité de l'oxygène proche de la limite inférieure, en s'assurant évidemment de garder des réserves suffisantes, on peut augmenter la quantité produite en gardant le flux d'air entrant dans l'installation, et donc l'énergie consommée par les turbocompresseurs, constante.

La marge de manoeuvre nécessaire pour pouvoir se passer d'un réglage direct de l'azote pur nous est donnée par le dimensionnement de l'installation. La colonne basse-pression est dimensionnée de telle sorte qu'une production d'azote pur contenant moins de 10 *ppm* O_2 est possible. L'azote reste utilisable même avec plus de 80 *ppm* O_2 . Lorsqu'une telle quantité d'oxygène est contenue dans l'azote pur, il y a forcément un problème dans l'installation et la qualité de l'oxygène n'est plus dans les spécifications. Ainsi que nous l'avons vu, la qualité de l'oxygène est en effet d'une importance primordiale.

Une réserve supplémentaire est donnée par le fait que les produits des deux unités de séparation d'air sont évacués ensemble et qu'une mauvaise qualité de l'un des produits peut être compensée par une qualité supérieure du produit provenant de la deuxième installation, permettant ainsi de continuer la production des installations qui utilisent l'oxygène.

2.3 Simulation de l'installation

Le logiciel de simulation utilisé est ChemCAD, distribué par Chemstations inc. Il s'agit d'un logiciel de simulation de procédés qui sert principalement à calculer des bilans de masse et d'énergie de procédés complexes, qui ont pour but la séparation de produits. Il met à disposition une base de données contenant plus de 2000 fluides et environ 40 unités d'opération. Selon les besoins, différents modèles thermodynamiques peuvent être utilisés. ChemCAD était utilisé pour faire une simulation de l'installation afin d'estimer l'influence des différents paramètres, notamment la position des servovannes, sur les qualités des produits. La simulation permet par ailleurs d'analyser les interdépendances entrées-sorties.

Réponse indicelle de la servovanne du prélèvement O_2 : Lorsque la servovanne du prélèvement d'oxygène est fermée de quelque pourcentages, on s'attend à une amélioration de la qualité de l'oxygène. Par contre, il n'y a pas d'influence directe sur la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression.

On peut se persuader de la justesse de ces réflexions en regardant la figure 2.3. On voit la réponse des qualités sur une diminution brusque de la quantité d'oxygène pur prélevée au temps $t = 1h$.

Réponse indicelle de la servovanne du prélèvement N_2 impur de la colonne haute-pression : Une augmentation brusque du flux d'azote impur de la colonne haute-pression vers la colonne basse-pression a pour conséquence une augmentation du pourcentage d'oxygène. Un changement dans la qualité de l'oxygène, notamment à travers une amélioration, est aussi observé. La simulation donne les résultats présentés sur la figure 2.4 pour une augmentation du flux d'azote impur à $t = 1h$.

On observe d'une part la relation entre la fraction d'oxygène dans l'azote pur et celle dans l'azote impur de la colonne haute pression. D'autre part, on voit que l'influence sur la qualité de l'oxygène pur est d'un ordre de grandeur plus petit, vu que la plage admissible de l'azote pur est entre 0 et 80 ppm O_2 et celle de l'oxygène pur entre 98.3% et 100%.

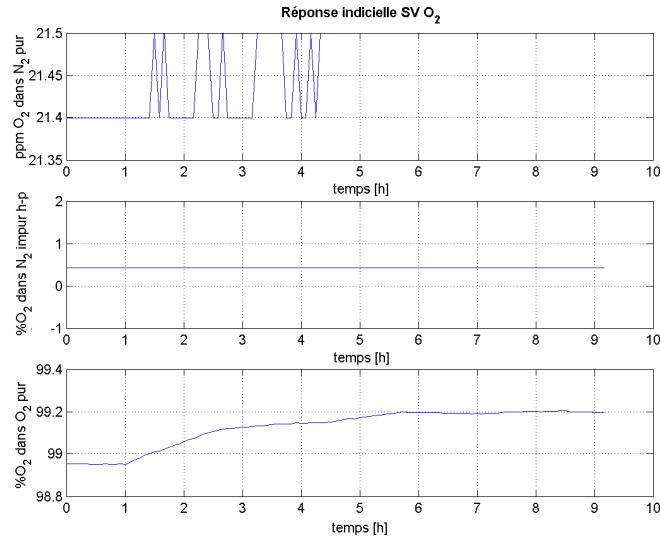


FIG. 2.3 – Réponse indicielle simulée de la servovanne de prélèvement d’oxygène. Saut à $t = 1h$.

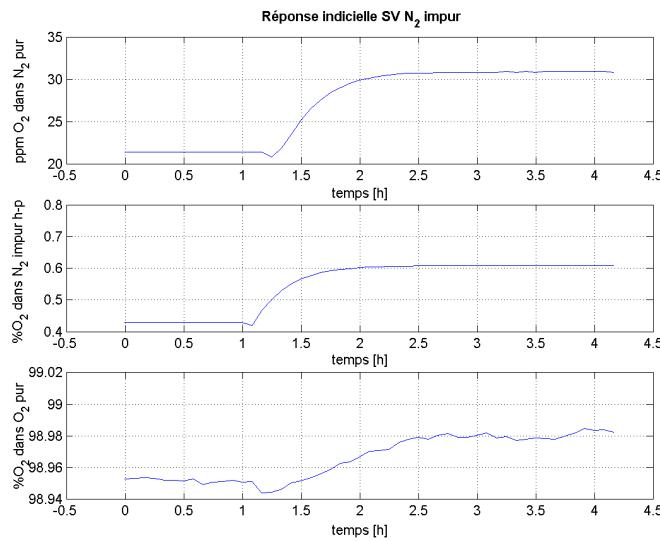


FIG. 2.4 – Réponse indicielle simulée de la servovanne de prélèvement d’azote impur de la colonne haute-pression. Saut à $t = 1h$.

Chapitre 3

Identification du système

Le système a été identifié par des réponses indicielles. Après identification du retard pur et prétraitement des donnés, les fonctions de transfert ont été approximées par des systèmes du premier ordre en utilisant la méthode des moindres carrés.

3.1 Description de l'essai

L'essai a été fait pendant la nuit, car c'est à ce moment-là qu'il y a le moins de perturbations. Les unités qui ont besoin d'oxygène produisent avec un débit plus constant pendant la nuit, étant donné qu'aucuns travaux de maintenance ne sont effectués à ce moment. En outre, aucune prise d'oxygène du condenseur principal a été effectuée pendant les essais.

L'effet du changement des tamis moléculaires par contre ne peut pas être éliminé pour l'essai. Il faut analyser cette perturbation et en tenir compte lors de l'identification du système. La période du changement des tamis moléculaires est fixe. La seule possibilité pour pouvoir quantifier l'effet est d'enregistrer la qualité des produits pendant que l'installation est en équilibre et aucune vanne n'est manipulée.

Pour les autres essais, l'importance principale était de pouvoir garantir les qualités tout au long de l'identification. Afin d'assurer que les spécifications soient respectées, une servovanne a été ouverte progressivement de quelques pourcentages en s'assurant toujours que les qualités soient bonnes. Après établissement d'un régime stationnaire avec la nouvelle position de la vanne, elle a été fermée brusquement à la position initiale.

Cet essai a été fait sur les deux servovannes. Le système de management du procédé enregistre tous les mesures de manière à ce que l'on dispose par la suite des réponses des grandeurs à régler sur une manipulation de chaque vanne.

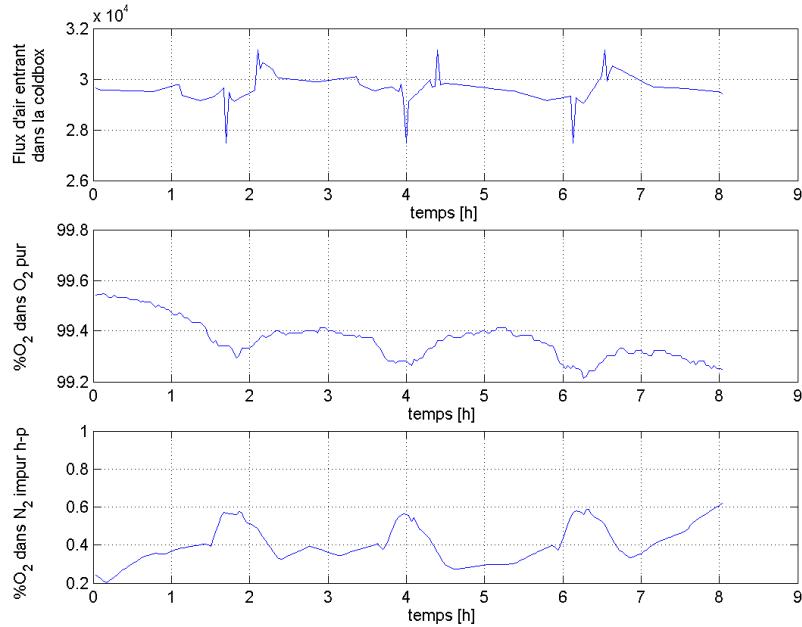


FIG. 3.1 – Effet du changement des tamis dans le régime stationnaire.

3.2 Résultats de l'identification

La figure 3.1 montre l'effet du changement des tamis moléculaires. A noter est particulièrement la période constante due à l'intervalle de changement constant. On retrouve ces oscillations dans les courbes obtenues pour les deux sauts qui sont tracées sur les figures 3.2 et 3.3. Les pics du flux d'air sont de courte durée et peuvent être négligés. L'origine de ces pics est expliquée dans le chapitre 7. A partir de ces données on peut faire une approximation du système :

La première chose à remarquer est que le prélèvement d'oxygène pur n'influence pas la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression. Ceci se voit plus clairement à la figure 3.4.

On voit d'ailleurs à la figure 3.2 que le volume d'azote impur prélevé de la colonne haute-pression influence directement sa composition.

La figure 3.3 montre qu'il en est de même pour l'oxygène.

Le couplage entre la qualité de l'oxygène et le volume d'azote impur prélevé de la colonne haute-pression est trop faible pour être identifié et est négligé par la suite. Cette approximation est justifiée par le fait que le système réel possède une matrice de transfert triangulaire rendant le choix des paires de commande unique et une commande par multiboucle réalisable.

Afin d'obtenir une approximation par régression linéaire [5], les données

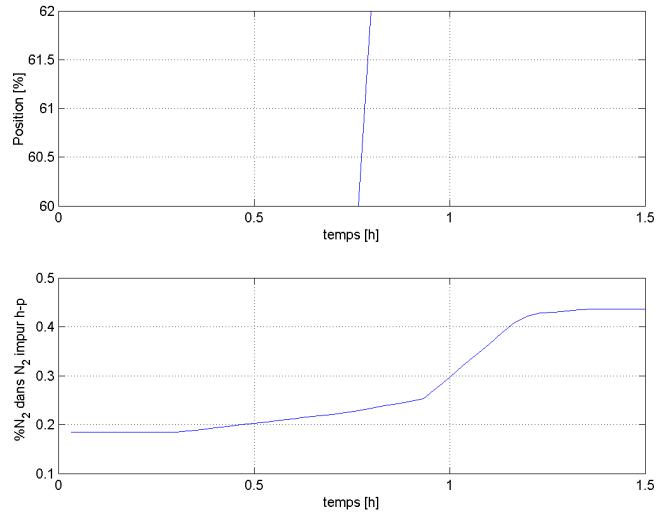


FIG. 3.2 – Réponse indicielle de la servovanne de prélèvement d'azote impur de la colonne haute-pression. L'effet des tamis moléculaires a été soustrait.

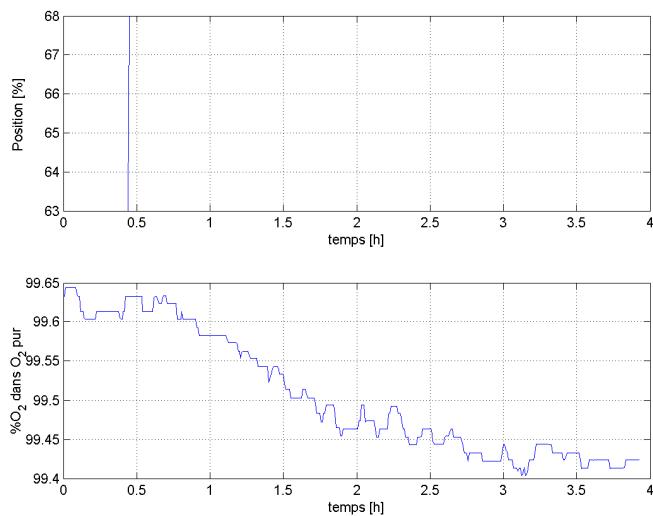


FIG. 3.3 – Réponse indicielle de la servovanne de prélèvement d'oxygène pur. L'effet des tamis moléculaires a été soustrait.

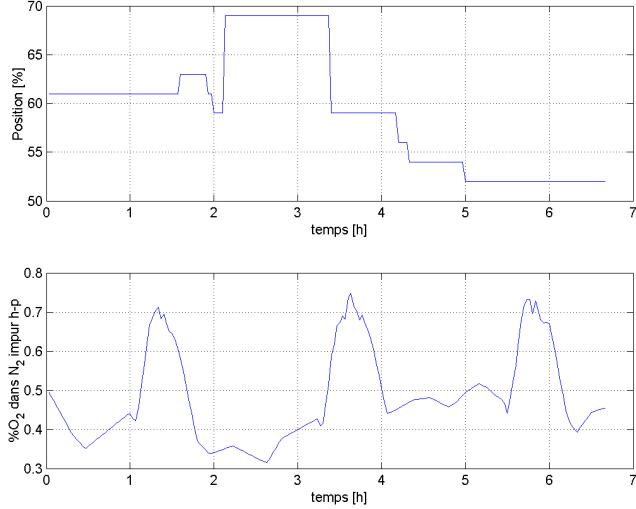


FIG. 3.4 – Aucun couplage entre la servovanne de prélèvement d’oxygène et la qualité de l’azote impur de la colonne haute-pression. Les fluctuations observées sont dues à la perturbation provenant des tamis moléculaires.

ont du subir un prétraitement :

- L’effet de la perturbation provenant des tamis moléculaires doit être soustraite des réponses. Une oscillation typique comme observée à la figure 3.1 est utilisée pour ce faire. Une réponse sans l’effet de la perturbation est obtenue.
- Les retards pur ont été identifiés graphiquement. Pour la réaction de l’oxygène, un retard pur de 20 min est observé. Le retard pur relevé de la réaction de l’azote est de 10 min.
- Pour pouvoir travailler avec des variables d’écart, la valeur initiale correspondante a été soustraite des réponses ainsi que des entrées.
- Les réponses ont par la suite été avancées dans le temps pour pouvoir déterminer la constante de temps et le gain par une régression linéaire, en approximant un système du premier ordre.

A partir de la fonction de transfert discrète d’un modèle du premier ordre, une identification des gains et des constantes de temps peut être faite :

$$H(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}$$

où sous forme d’équation aux différences :

$$y(k) + a_1 u(k-1) = b_1 u(k-1)$$

Comme le modèle ne représente qu'une approximation du premier ordre du système réel, un terme correctif est ajouté. La relation est finalement décrite par :

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + b_1 u(k-1) + \epsilon(k)$$

ou sous forme matricielle :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(n-1) \\ y(n) \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} -y(0) & u(0) \\ -y(1) & u(1) \\ \vdots & \vdots \\ -y(n-2) & u(n-2) \\ -y(n-1) & u(n-1) \end{bmatrix}}_{\Phi} \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}}_{\Theta} + \underbrace{\begin{bmatrix} \epsilon(1) \\ \epsilon(2) \\ \vdots \\ \epsilon(n-1) \\ \epsilon(n) \end{bmatrix}}_{\epsilon}$$

La solution des moindres carrés est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\hat{\Theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y = \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{b}_1 \end{bmatrix}$$

Les estimations des paramètres a_1 et b_1 permettent finalement d'obtenir les estimations de A et τ à travers les relations suivantes, où h représente la période d'échantillonnage, dans ce cas égale à 120s.

$$\hat{\tau} = -\frac{h}{\ln(-\hat{a}_1)} \text{ et } \hat{A} = \frac{\hat{b}_1}{1 + \hat{a}_1}$$

La regression fournit les résultats suivants :

	Oxygène	Azote impur
τ	2870	920
A	-0.0393	0.1135

La comparaison de l'approximation avec la réponse réelle est montrée à la figure 3.5.

Ceci fournit un système 2×2 avec une matrice de transfert $G(s)$ identifiée diagonale. q_{N_2} et q_{O_2} représentent le pourcentage d'oxygène dans l'azote impur de la colonne haute-pression et dans l'oxygène pur respectivement. SV_{N_2} et SV_{O_2} désignent la position de la servovanne de prélèvement d'azote impur de la colonne haute-pression et celle de l'oxygène pur respectivement. Le système s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} q_{N_2} \\ q_{O_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{0.1135}{1+920s} e^{-600s} & 0 \\ 0 & -\frac{0.0393}{1+2870s} e^{-1200s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SV_{N_2} \\ SV_{O_2} \end{pmatrix}$$

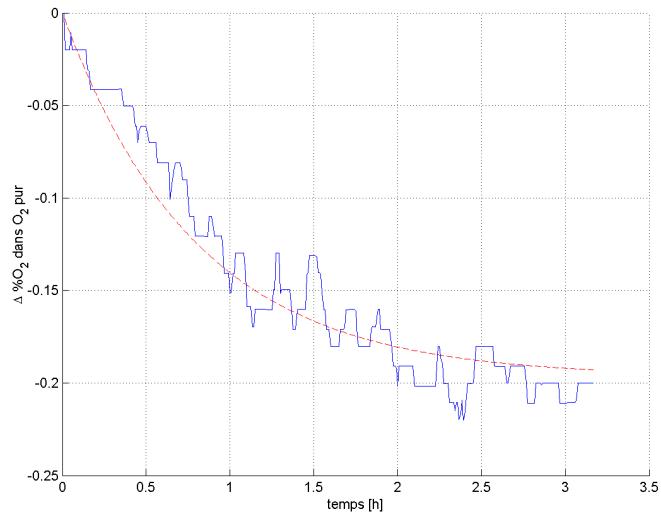


FIG. 3.5 – Comparaison de la réponse de la qualité d'oxygène à un saut de 5% sur la vanne de prélèvement avec son approximation du premier ordre.

Il est donc possible de commander le système avec deux boucles de réglage indépendantes, l'une réglant la qualité de l'oxygène pur et l'autre celle de l'azote impur de la colonne haute-pression.

Chapitre 4

Stratégie de réglage

La plus simple façon de régler un système multivariable est le réglage par multiboucle.

4.1 Réglage par multiboucle

En implantant un réglage par multiboucle sur un système qui n'est pas complètement découplé, on ignore le couplage existant entre les boucles de réglage. Il faut en conséquence que la deuxième boucle de réglage puisse compenser la perturbation provenant du couplage. En occurrence, cette approche est justifiée par le couplage négligeable entre la qualité de l'oxygène et la servovanne de prélèvement d'azote impur de la colonne basse-pression. Il n'y a pas de couplage entre la qualité de l'azote impur et le prélèvement d'oxygène. Dans ce cas, la stabilité et la robustesse du système se réduit à la stabilité et la robustesse de chaque boucle.

Le schéma fonctionnel de commande du système commandé par multiboucle est donné sur la figure 4.1.

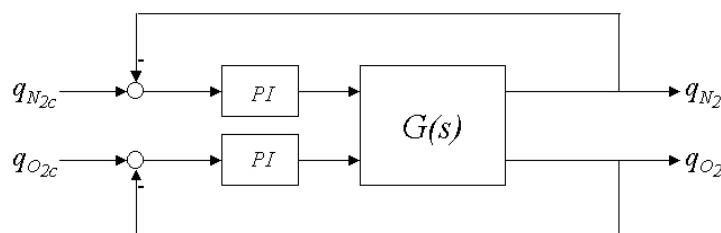


FIG. 4.1 – Schéma fonctionnel de commande.

4.1.1 Conditions-cadre

Lors de l'identification et la simulation de l'installation, l'hypothèse de linéarité autour du point de fonctionnement est faite. Pour qu'une commande linéaire puisse être utilisée, il est indispensable de vérifier que le système se trouve au point de fonctionnement lors de la mise en ligne du régulateur.

Les conditions pour une mise en marche sont les suivantes :

- L'installation doit être en équilibre et la qualité des produits doit être dans les spécifications.
- Le niveau du condenseur principal doit être suffisant, garantissant ainsi que l'installation soit suffisamment refroidie.
- Le niveau du condenseur principal doit constamment augmenter, permettant ainsi une prise de gaz de purge régulière.

Lorsque le régulateur est en ligne, il doit changer sur manuel dès que les conditions pour son fonctionnement ne sont plus données. Une raison pour arrêter le régulateur serait :

- Une qualité qui sort du domaine admissible.
- Le niveau du condenseur principal qui descend en dessous de la limite inférieure.
- Aucune prise de gaz de purge pendant un temps trop élevé.

Un problème technique a généralement une violation d'une de ces conditions comme conséquence. Il est par la suite possible de garder la situation manuellement sous contrôle et d'identifier le problème.

4.2 Dimensionnement du régulateur

La section suivante décrit le dimensionnement des régulateurs. Les valeurs numériques utilisés pour les simulations sont donnés dans le tableau 4.3 à la fin du chapitre 4. A la section 6 sont donnés les valeurs numériques des régulateurs pour l'implantation.

La boucle réglant la qualité de l'azote impur provenant de la colonne haute-pression présente un retard pur de dix minutes. Le réglage de cette boucle ne présente aucun problème majeur.

La deuxième boucle, utilisée pour régler la qualité de l'oxygène pur, est plus difficile à régler car elle comprend un retard pur 20 min. C'est à cette boucle que l'importance principale est attribuée.

Trois méthodes de dimensionnement standard sont présentées, ainsi que les performances respectives en simulation du modèle identifié.

Des informations plus détaillées peuvent être trouvées dans [5] pour la méthode de Ziegler-Nichols, [2] pour la méthode de Cohen-Coon et [7] pour la méthode d'imposition d'un modèle en boucle fermée.

Type	$K(s)$	K_p	T_i	T_d
P	K_p	$\frac{1}{a\theta}$		
PI	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$	$\frac{0.9}{a\theta}$	3.3θ	
PID	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + sT_d\right)$	$\frac{1.2}{a\theta}$	2θ	0.5θ

TAB. 4.1 – Paramètres des régulateurs P, PI, PID d'après la première méthode de Ziegler-Nichols.

$\frac{ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{k} \left(\frac{\tau}{\theta} + 0.35\right)$		
PI	$\frac{0.9}{k} \left(\frac{\tau}{\theta} + 0.92\right)$	$\frac{3.3\tau + 0.3\theta}{\tau + 2.2\theta} \theta$	
PI	$\frac{1.24}{k} \left(\frac{\tau}{\theta} + 0.13\right)$		$\frac{0.27\tau - 0.09\theta}{\tau + 0.13\theta} \theta$
PID	$\frac{1.35}{k} \left(\frac{\tau}{\theta} + 0.18\right)$	$\frac{2.5\tau + 0.5\theta}{\tau + 0.61\theta} \theta$	$\frac{0.37\tau}{\tau + 0.19\theta} \theta$

TAB. 4.2 – Paramètres des régulateurs P, PI, PD, PID d'après la méthode de Cohen-Coon.

4.2.1 Méthode de Ziegler-Nichols

Les méthodes de dimensionnement de Ziegler-Nichols sont les plus populaires pour déterminer les paramètres de régulateurs PID. Etablies dans les années 40, elles sont toujours très utilisées à l'heure actuelle.

La première méthode se fonde sur la réponse indicielle du système en boucle ouverte. Le système est approximé par un modèle du premier ordre comprenant un retard pur. Les paramètres nécessaires au dimensionnement du régulateur sont le retard pur θ et la pente a de l'approximation à $t = \theta$. Les paramètres sont calculés à partir du tableau 4.1.

Les résultats obtenus sont souvent trop oscillatoires, notamment lorsqu'on a affaire à un système comprenant un retard pur important.

4.2.2 Méthode de Cohen-Coon

Pour garantir un facteur d'amortissement de 0.25 en boucle fermée, Cohen-Coon a proposé les règles de dimensionnement représentées dans le tableau 4.2. Cette méthode mène parfois à des réponses oscillatoires, similaire à la méthode de Ziegler-Nichols. Les paramètres k , τ et θ sont le gain, la constante de temps et le retard pur de l'approximation du système à régler.

4.2.3 Par imposition du modèle en boucle fermée

En imposant un modèle en boucle fermée on peut définir le comportement du système réglé. Pour pouvoir appliquer cette méthode il faut disposer d'un modèle. L'approximation avec un modèle du premier ordre $G_{11}(s)$ est utilisée. Le même calcul est effectué pour la boucle d'oxygène en utilisant $G_{22}(s)$.

$$G_{11}(s) = \frac{Ae^{-\theta s}}{1 + \tau s}$$

Avec $G_{11}(s)$ fonction de transfert en boucle ouverte.

$$G_{BF}(s) = \frac{K(s)G_{11}(s)}{1 + K(s)G_{11}(s)}$$

Où $G_{BF}(s)$ est la fonction de transfert en boucle fermée et $K(s)$ le régulateur à déterminer. En imposant un comportement en boucle fermée avec une constante de temps choisie $\tau_{BF} = \tau/4$ et un gain statique égal à un on obtient :

$$G_{BF}(s) = \frac{e^{-\theta s}}{1 + \tau_{BF}s} = \frac{K(s)G_{11}(s)}{1 + K(s)G_{11}(s)}$$

$$K(s) = \frac{1}{G_{11}(s)} \left(\frac{G_{BF}(s)}{1 - G_{BF}(s)} \right) = \frac{1}{G_{11}(s)} \left(\frac{e^{-\theta s}}{1 + \tau_{BF}s - e^{-\theta s}} \right)$$

En substituant $G_{11}(s)$ et en approximant $e^{-\theta s}$ par $1 - \theta s$:

$$K(s) = \frac{1 + \tau s}{A(\tau_{BF} - \theta)s} = \frac{\tau_{BF}}{A(\tau + \theta)} \left(1 + \frac{1}{\tau_{BF}s} \right)$$

où $K_p = \frac{\tau_{BF}}{A(\theta + \tau)}$ et $T_i = \tau_{BF}$ sont les paramètres du régulateur recherchés.

4.3 Comparaison des méthodes

Le comportement du système réglé par chacun de ces régulateurs a été simulé à l'aide de Matlab Simulink. La figure 4.2 montre les réponses du système réglé par deux boucles à des sauts de consigne de 0.1% pour la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression et celle de l'oxygène pur.

Les trois régulateurs de la boucle d'azote montrent des performances suffisantes. La méthode du modèle imposé semble d'ailleurs le mieux fonctionner.

Deux critères de performance standard, IAE et $ITAE$, sont utilisés pour la comparaison des régulateurs de la boucle d'oxygène. IAE est l'intégrale

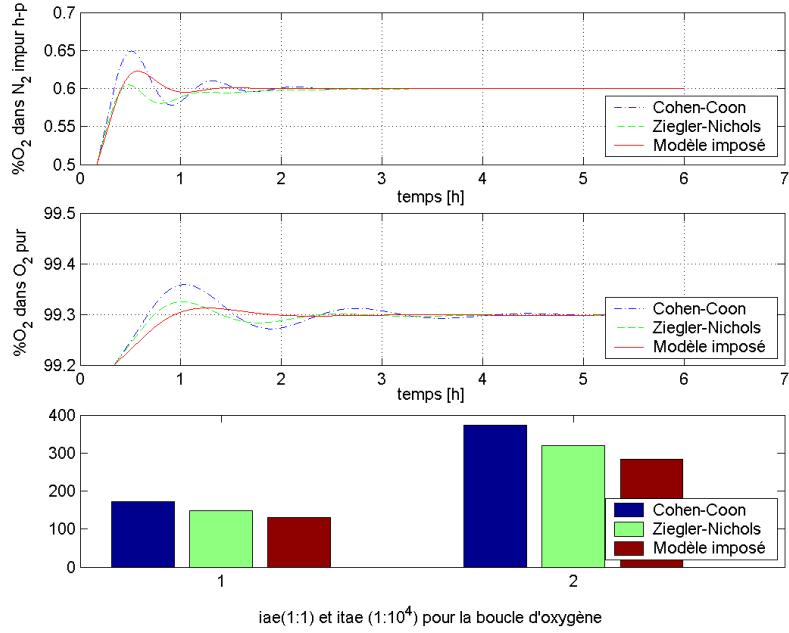


FIG. 4.2 – Performances du système réglé par deux régulateurs *PI*. Comparaison des méthodes de dimensionnement.

de l'erreur en valeur absolue (Integral Absolute Error) et *ITAE* dénote l'intégrale de l'erreur en valeur absolue pondérée par le temps (Integral of the Time-weighted Absolute Error). Ils sont définis comme suit :

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt$$

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt$$

Pour la boucle d'oxygène, on observe que le système réagit très lentement à cause du retard pur important. Pour rendre le système plus rapide, un prédicteur de Smith a été ajouté.

4.4 Prédicteur de Smith

Un prédicteur de Smith peut améliorer considérablement les performances lors de la présence d'un retard pur important. Le schéma fonctionnel du système réglé par deux régulateurs *PI* avec des prédicteurs de Smith est représenté à la figure 4.3. Les régulateurs *PI* sont dimensionnés par la méthode du modèle imposé comme décrit plus haut mais en considérant le système sans ses retards purs.

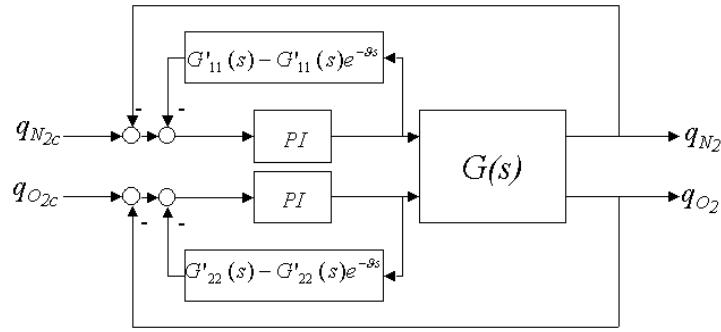


FIG. 4.3 – Schéma fonctionnel de commande avec prédicteur de Smith où G' est la fonction de transfert sans le retard pur.

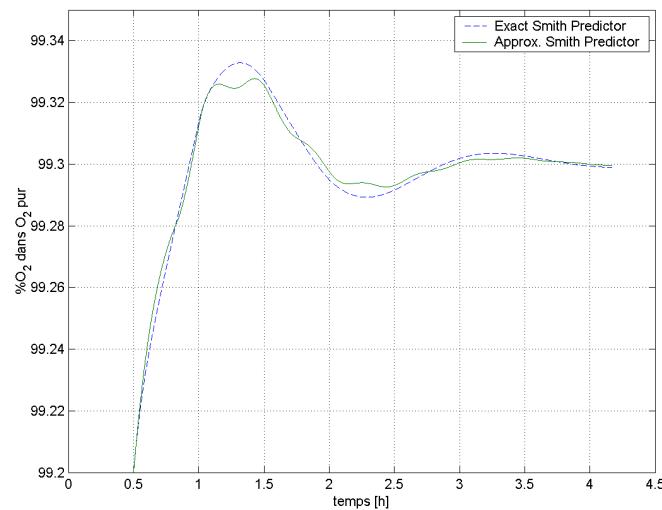


FIG. 4.4 – Robustesse du prédicteur de Smith à une sous-estimation de 50% du retard pur.

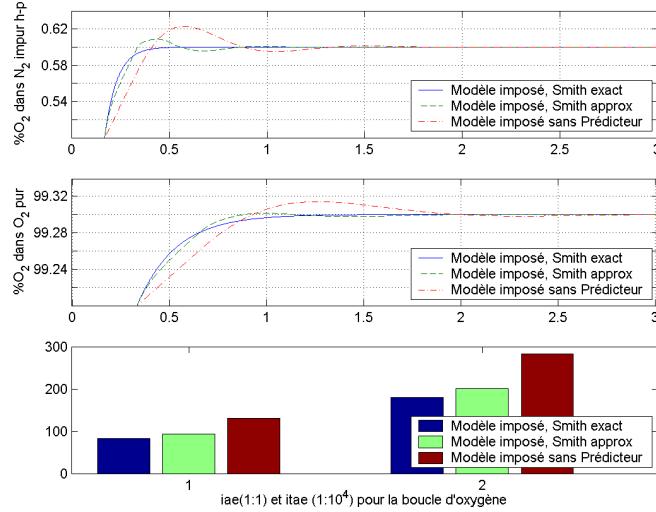


FIG. 4.5 – Comparaison du régulateur dimensionné par imposition du modèle sans et avec prédicteur de Smith.

La stabilité n'est pas affectée par l'ajout du prédicteur de Smith. L'inconvénient est qu'il se fonde explicitement sur le modèle du processus à régler. En particulier, la valeur θ du retard pur doit être précisément connue pour garantir la robustesse.

Un résultat intéressant est, que si l'approximation de Padé du retard pur, donnée par $e^{-\theta s} = \frac{2-\theta s}{2+\theta s}$, est utilisée au lieu du retard pur exact $e^{-\theta s}$ pour le prédicteur de Smith, la robustesse augmente considérablement. Un article concernant ce sujet est [8]. Cet effet est mis en évidence à la figure 4.4 où les performances du régulateur de la boucle d'oxygène avec prédicteur de Smith exact et approximé sont comparées lorsque le retard pur a été sous-estimé de 50%.

Finalement la figure 4.5 montre une comparaison des performances des régulateurs dimensionné par imposition du modèle en combinaison avec un prédicteur de Smith exact et approximé.

Pour la boucle d'azote, les performances du régulateur sans prédicteur sont déjà suffisantes. L'ajout du prédicteur peut encore améliorer les performances mais nécessite un modèle exact du système. On se contentera donc d'implanter le simple régulateur *PI*.

Par contre pour la boucle d'oxygène, le prédicteur apporte une importante amélioration des performances et il vaut la peine de l'implanter. D'ailleurs il est justifié d'implanter le prédicteur approximé pour gagner en robustesse. L'ajout d'un prédicteur de Smith permet donc de gagner beaucoup en rapidité. En même temps, il faut faire attention de garder une robustesse

suffisante, et ceci est le sujet de la section suivante.

4.5 Robustesse

Le modèle identifié ne représentant qu'une approximation du système réel, il est crucial d'analyser la robustesse des régulateurs. La boucle réglant la qualité de l'azote de la colonne haute-pression contient un régulateur *PI*. Un calcul des marges de phase et de gain à l'aide de Matlab fournit les valeurs suivantes : La marge de gain vaut 6.7 dB , la marge de phase 48.4° . Ces résultats attestent une robustesse suffisante.

Pour la boucle d'oxygène sans le prédicteur de Smith, une marge de gain de 8 dB et une marge de phase de 54.1° sont obtenues. Lors de l'ajout du prédicteur de Smith, le retard pur peut être omis sous condition qu'il soit connu exactement. Le régulateur présenté montre une marge de gain infinie et une marge de phase de 90° . Pour une analyse de robustesse prenant en compte l'incertitude du retard pur identifié, les paramètres du modèle ont été altérés de 10%, la valeur du retard pur de 30%. Les résultats en simulation, montrés aux figures 4.6(a) à 4.6(b), affirment une robustesse suffisante du régulateur.

4.6 Faisabilité

Un réglage par deux boucles indépendantes sans prédicteur de Smith a été implanté sur la simulation ChemCAD. Des sauts de consigne de 0.1% pour la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression, ainsi que de 0.2% pour la qualité de l'oxygène pur ont été appliqués. Les réponses (figure 4.7) sont comparables à celles obtenues par la simulation du modèle identifié (figure 4.2). Ceci permet de vérifier l'identification et affirme que les couplages sont suffisamment faibles pour que le réglage par multiboucle soit stable. Les performances sont suffisantes et ont peut s'attendre à des très bonnes performances en implantant aussi le régulateur de Smith.

4.7 Compensation de perturbation

Comme mentionné plus haut, la perturbation périodique provenant du changement des tamis moléculaires(3.1) est importante. Pour la simulation, la perturbation agissant sur la qualité de l'oxygène a été approximé par la valeur absolue d'un sinus de période égale à la moitié de celle du changement des tamis moléculaires et une amplitude comme elle est observée en réalité.

L'effet sur la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression peut être modélisé. La fonction de transfert entre la fluctuation du flux d'air à travers le tamis moléculaire et la quantité d'oxygène contenue dans l'azote

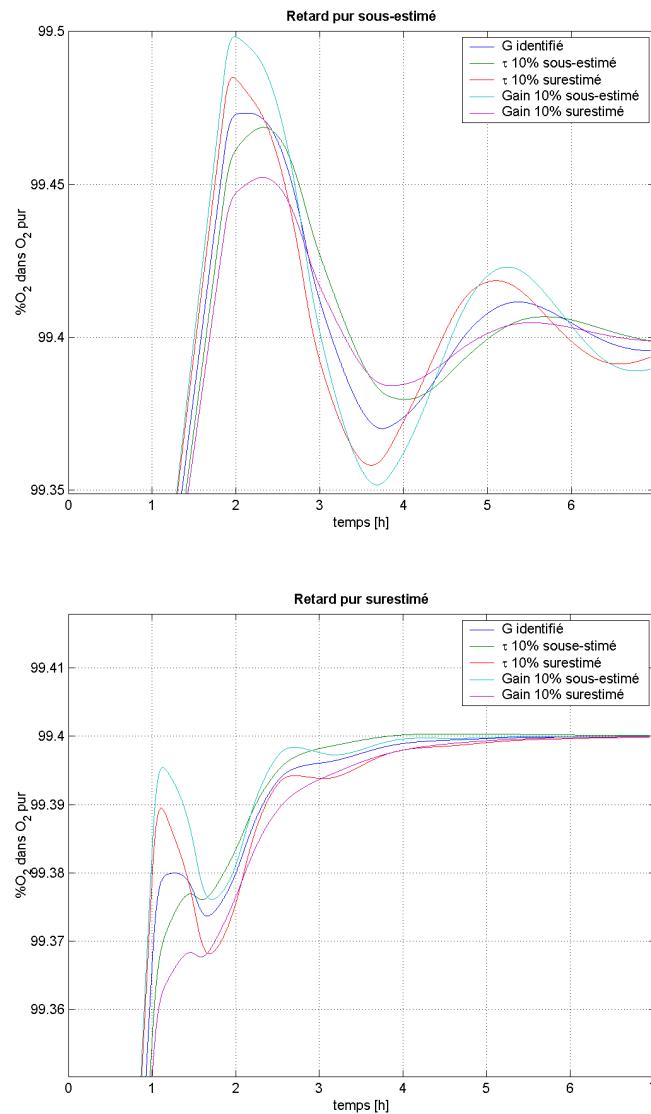


FIG. 4.6 – Performances du régulateur lors de variations des paramètres du modèle. Réponses à un saut de consigne de 99.2% vers 99.4% à $t = 0$.

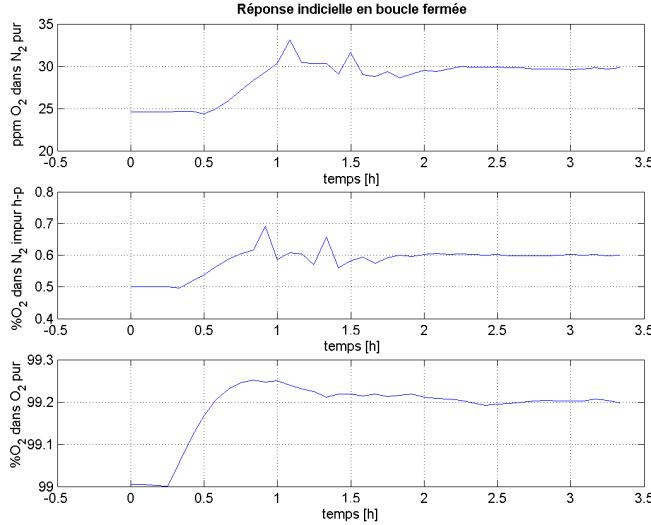


FIG. 4.7 – Résultats de la simulation avec ChemCad.

impur de la colonne haute-pression est identifiée de la façon suivante : Le retard pur est tout d'abord relevé graphiquement : il est de six minutes. Pour travailler en variables d'écart, la valeur initiale est soustraite des deux courbes. Par la suite on observe que les courbes sont proportionnelles entre elles avec une constante de temps négligeable vis-à-vis des autres constantes de temps auxquelles on a affaire. Une constante de temps d'une seconde est donc choisie et le gain est calculé par régression linéaire qui fournit un gain de -0.00332 . La fonction de transfert approximant cette perturbation s'écrit donc $G_P = \frac{-0.00332}{s+1} e^{-360s}$. La fluctuation étant mesurable, le compensateur G_F est calculé :

$$G_F = \frac{G_P}{G_{11}} = -0.002931 \frac{1 + 920s}{1 + s}$$

Il n'est par contre pas possible de compenser l'effet sur la qualité de l'oxygène de façon efficace car le retard pur de la servovanne servant de régler la qualité de l'oxygène est trop important.

La fluctuation de l'air entrant réelle et la perturbation affectant la qualité d'oxygène sont comparés avec leurs approximations, utilisées pour la simulation, à la figure 4.8. Il a été fait abstraction des pics observés pour le flux d'air car ils sont d'une durée de quelques secondes seulement et n'ont pas d'influence directe sur le système. L'origine de ces pics est expliquée dans le chapitre 7.

Le schéma fonctionnel de commande est donné à la figure 4.9 et la figure 4.10 montre une comparaison entre le régulateur PI et le régulateur comprenant la compensation de perturbation.

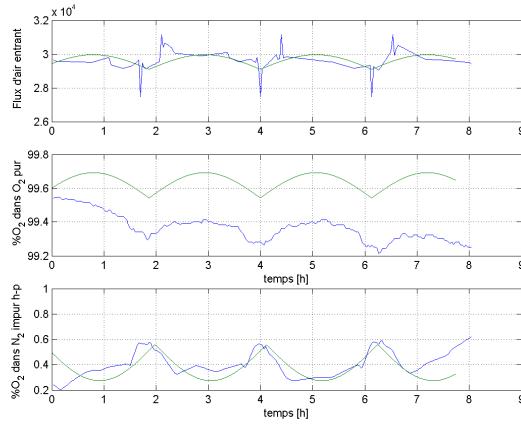


FIG. 4.8 – Effets du changement des tamis moléculaires et leurs approximations utilisées pour la simulation.

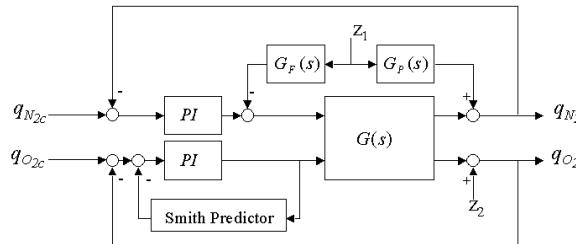


FIG. 4.9 – Schéma fonctionnel de commande.

Une proposition pour améliorer le comportement en boucle fermée est d'allonger la période du changement des tamis moléculaires de quelques minutes. Ce temps pourrait être utilisé pour une mise sous pression moins rapide du tamis régénéré. Ainsi il serait possible de réduire considérablement les perturbations sur la qualité de l'oxygène pur. De plus on pourrait probablement s'en passer de la compensation de perturbations pour la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression.

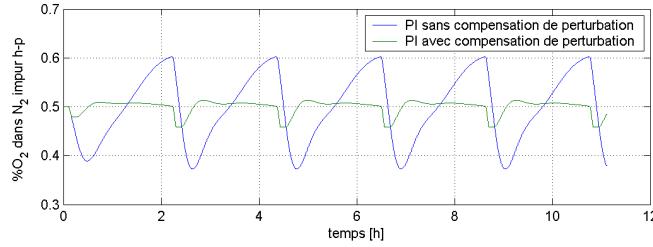


FIG. 4.10 – Compensation de perturbation.

	Boucle N_2		Boucle O_2	
Sans Smith Predictor	K_p	T_i	K_p	T_i
Ziegler Nichols	12.2	1980	-54.8	3960
Cohen-Coon	12.9	870	-56.9	2160
Modèle imposé	9.8	920	-38.1	2870
Avec Smith Predictor	K_p	T_i	K_p	T_i
Modèle imposé	35.2	920	-101.8	2870

TAB. 4.3 – Valeurs numériques des paramètres des régulateurs utilisés pour les simulations.

Chapitre 5

Réglage de niveau du gazomètre

En plus de la qualité des produits, un réglage de la quantité peut être intéressant. Sur la base des résultats obtenus, une proposition pour ce réglage est élaborée dans le chapitre présent.

5.1 Le système

Le système considéré jusqu'à maintenant peut être étendu en considérant le niveau du gazomètre d'oxygène comme grandeur à régler supplémentaire. La grandeur de réglage utilisée est la somme des pré-rotations des turbocompresseurs. Ainsi les turbocompresseurs sont également chargés. En agissant sur la pré-rotation, la quantité d'air entrant l'installation peut être modifiée et donc la quantité d'oxygène produite. La différence entre la quantité d'oxygène produite par l'unité de séparation d'air et la quantité d'oxygène consommée par les clients, est stocké à pression constante dans le gazomètre. Les interdépendances entrées-sorties du système étendu sont représentées à la figure 5.1.

Le gazomètre sert comme buffer entre l'unité de séparation d'air et ses clients. L'idée est de garder un niveau constant dans le gazomètre pour disposer de réserves lorsque la demande d'oxygène augmente. D'autre part,

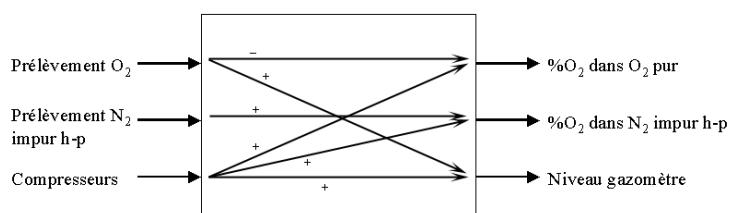


FIG. 5.1 – Interdépendances entrées-sorties.

l'oxygène est réglé manuellement sur toit lorsque le gazomètre risque de se remplir totalement, évitant ainsi une augmentation de pression sur le réseau d'oxygène. Dans ce cas la quantité d'oxygène produite doit être diminué afin de minimiser les pertes. Une diminution de la quantité est par contre limitée par le phénomène de pompage qui a lieu si les turbocompresseurs sont trop déchargés.

5.2 Identification

Le système a été identifié à l'aide d'un saut de 5° sur la pré-rotation des deux turbocompresseurs. Pendant cet essai il fallait assurer que tout l'oxygène partait dans le réseau. Pour ce faire, le gazomètre a été vidé de quelques pourcentages avant l'essai.

Le système se comporte comme un intégrateur et en conséquence il suffit d'observer le retard pur ainsi que la pente de la réponse.

Le changement des tamis moléculaires provoque de courtes perturbations sur le niveau du gazomètre, desquels il faut tenir compte lors de l'identification.

Le couplage entre la pré-rotation et la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression est trop faible pour être identifié correctement et négligé par la suite.

Par contre il existe un couplage entre le prélèvement d'oxygène et le niveau du gazomètre ainsi qu'entre la pré-rotation des turbocompresseurs et la qualité de l'oxygène. Il y a donc finalement trois fonctions de transfert à identifier. Les retards purs ont pu être identifiés à partir des relevés graphiques. Pour l'identification des gains et des constantes de temps, il est seulement possible de faire des estimations grossières, car d'une part, les tamis moléculaires perturbent considérablement le système et d'autre part la consommation de l'oxygène des autres unités varie.

Pourtant les fonctions de transfert identifiées sont suffisantes pour pouvoir effectuer le choix des paires du réglage.

La figure 5.2 montre la position de la servovanne de prélèvement d'oxygène et le niveau du gazomètre. L'effet observé à $t = 0.3h$ est dû uniquement au changement de la position de la servovanne de prélèvement d'oxygène et permet ainsi d'identifier le retard pur et la pente. On procède de la même façon pour l'identification de la fonction de transfert liant la pré-rotation au niveau du gazomètre.

Le gain et le retard pur de la fonction de transfert entre la pré-rotation et la qualité de l'oxygène ont été identifiées de la manière décrite à la section 3.2.

Finalement on obtient la matrice de transfert $G(s)$. q_{N_2} et q_{O_2} représentent le pourcentage d'oxygène dans l'azote impur de la colonne haute-pression et dans l'oxygène pur respectivement. pr dénote la pré-rotation et n le ni-

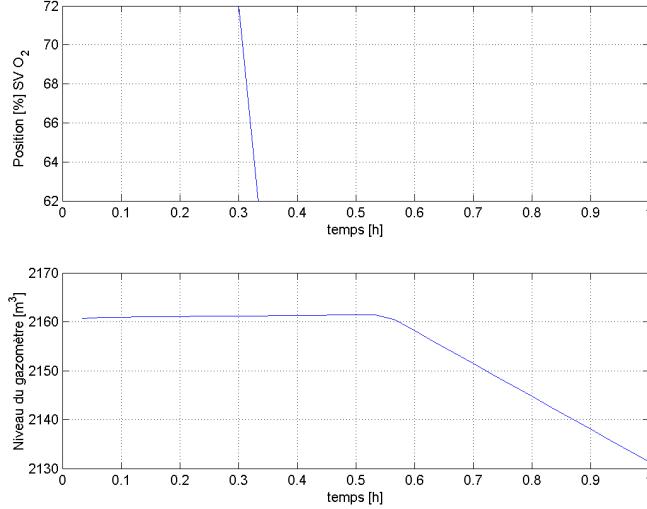


FIG. 5.2 – Couplage entre le prélèvement d'oxygène et le niveau du gazomètre.

veau du gazomètre. SV_{N_2} et SV_{O_2} désignent la position de la servovanne de prélèvement d'azote impur de la colonne haute-pression et celle de l'oxygène pur respectivement.

Le système s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} q_{N_2} \\ q_{O_2} \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{0.1135}{1+920s} e^{-600s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{0.0393}{1+2870s} e^{-1200s} & \frac{0.0088}{1+1087s} e^{-600s} \\ 0 & \frac{0.00189}{s} e^{-840s} & \frac{0.00456}{s} e^{-180s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SV_{N_2} \\ SV_{O_2} \\ pr \end{pmatrix}$$

5.3 Réglage par multiboucle

Pour commander le système étendu il faut trois boucles de réglage. Le choix des paires de réglage est la première tâche. Pour régler la qualité de l'azote impur de la colonne haute-pression, le seul choix possible est la servovanne de prélèvement d'azote impur de la colonne haute-pression. Comme il n'y a pas de couplage avec d'autres grandeurs, on peut considérer cette boucle indépendamment.

Le système restant est du type *MIMO* 2×2 . Intuitivement on choisirait la pré-rotation comme grandeur de réglage pour le niveau du gazomètre et

la servovanne de prélèvement d'oxygène comme grandeur de réglage pour la qualité de l'oxygène.

5.3.1 RGA

Un outil puissant pour le choix des paires de réglage est la matrice des gains relatifs, RGA. Un résumé est présenté par la suite, les développements peuvent être trouvés dans [1]. Pour une matrice de rang plein $G \in C^{m \times n}$, la matrice des gains relatifs est définie comme :

$$RGA(G) := G.* (G^{-1})^T$$

où ".*" dénote la multiplication élément par élément. Pour des matrices non-carrées, G^{-1} est remplacée par son pseudo inverse. Les propriétés de la matrice des gains relatives sont les suivantes :

- La somme de chaque colonne où ligne est égal à un.
- Les permutations sur une ligne ou colonne de G donnent les mêmes permutations dans $RGA(G)$.
- $RGA(G) = RGA(D_1 G D_2)$ si D_1 et D_2 sont diagonales.
- Si G est triangulaire, la matrice des gains relatifs se réduit à l'identité.

Les règles suivantes sont par la suite utilisées pour choisir les paires de réglage :

1. Trouver une permutation des entrées et sorties tel que $RGA(G(i\omega_c))$ soit le plus proche de l'identité, ω_c représentant la largeur de la bande passante du système en boucle fermée.
2. Eviter de choisir des paires menant à des éléments négatifs sur la diagonale du $RGA(G(0))$.

5.3.2 RGA statique

Pour le choix des paires de réglage, le calcul de la matrice des gains relatifs statique est suffisante. Comme le système comprend des intégrateurs purs, on redéfinit les sorties du système. On considère non plus le niveau du gazomètre mais sa dérivée. La matrice de transfert du sous-système s'écrit donc :

$$\begin{pmatrix} -\frac{0.0393}{1+2870s}e^{-1200s} & \frac{0.0088}{1+1087s}e^{-600s} \\ 0.00189e^{-840s} & 0.00456e^{-180s} \end{pmatrix}$$

ce qui fournit

$$RGA(G(0)) = \begin{pmatrix} 0.9151 & 0.0849 \\ 0.0849 & 0.9151 \end{pmatrix}$$

Le choix des paires de réglage est donc identique au choix intuitif et c'est aussi la façon de laquelle l'installation est conduite manuellement.
Un résultat utile pour le cas considéré est le théorème de stabilité en boucle fermée d'un système commandé en multiboucle. Le Niederlinski index, [6], défini dans le cas d'un système 2×2 par

$$N = \frac{\det(G(0))}{G_{11}(0)G_{22}(0)}$$

donne la condition de stabilité nécessaire et suffisante suivante :

Le système 2×2 stable en boucle ouverte, est stable, commandé en multiboucle, si et seulement si $N > 0$.

Dans le cas considéré $N = 1.0928$ et en conséquence le système commandé en multiboucle est stable.

5.4 Adaptation du régulateur

Comme le système est commandé en multiboucle, tous les régulateurs dimensionnés peuvent être utilisés sans changement, même après ajout d'une boucle supplémentaire. Le seul régulateur à dimensionner est celui de la boucle réglant le niveau du gazomètre. Le système se comportant comme un intégrateur pur, et vue que les spécifications ne sont pas trop sévères, un simple régulateur proportionnel est suffisant.

Une analyse des termes hors-diagonale de la matrice de transfert fait figurer les couplages existants. Le fait que le niveau du gazomètre soit perturbé par la régulation de la qualité de l'oxygène pur n'est pas dérangeant car il s'agit simplement d'un buffer. Par contre, des grandes manipulations sur la pré-rotation pour régler le niveau du gazomètre conduisent à des perturbations importantes de la qualité de l'oxygène pur.

Pour obtenir un système partiellement découpé, il faudrait compenser la perturbation de la qualité de l'oxygène, induite par la régulation du niveau du gazomètre, au moyen de la servovanne de régulation de prélèvement d'oxygène. Réagissant avec un retard pur de trois minutes à la pré-rotation (cf. 5.2), la qualité d'oxygène prend 20min pour réagir à la compensation.

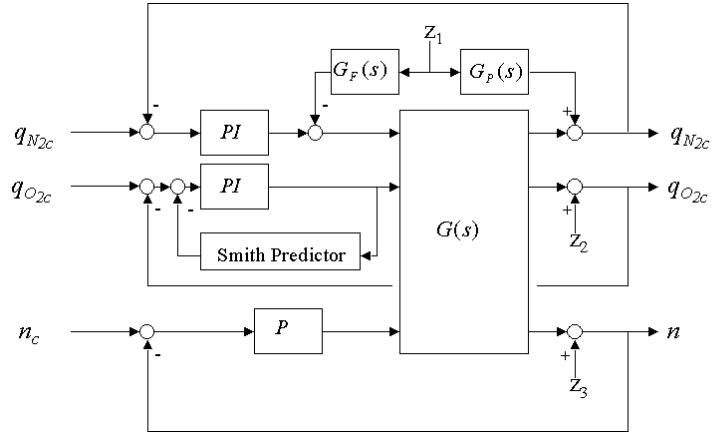


FIG. 5.3 – Schéma fonctionnel de commande.

Cette énorme différence des retards purs rend un découplage impossible. A la figure 5.3 est finalement représenté le schéma fonctionnel de commande du système réglé en multiboucle.

5.4.1 Simulation

Afin de visualiser le couplage, une simulation du système réglé par multiboucle a été effectuée. La figure 5.4 montre la réponse du système soumis à la perturbation du changement des tamis moléculaires à une diminution brusque de la consommation d'oxygène de 200 Nm^3 à $t = 2h$. Les oscillations régulières proviennent du changement des tamis moléculaires. A $t = 2h$ le niveau augmente vue que moins d'oxygène est consommé. Lorsque le régulateur du niveau du gazomètre réagit à l'augmentation du niveau, la qualité de l'oxygène est perturbée à travers le couplage existant.

Le système retrouve rapidement son équilibre affirmant la stabilité.

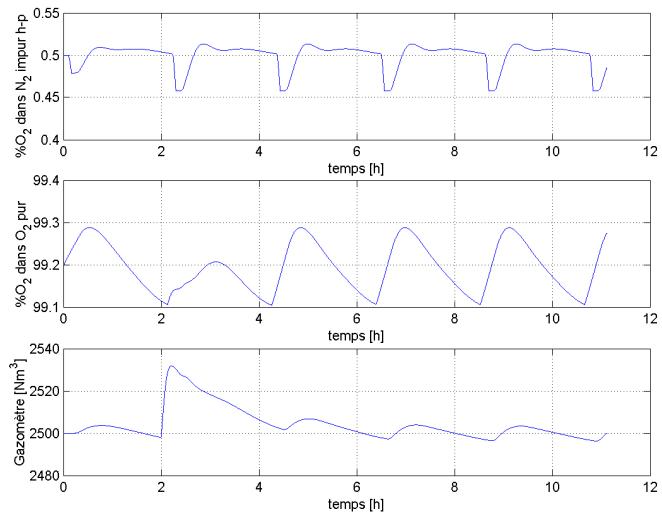


FIG. 5.4 – Réponses à une diminution brusque de la consommation d'oxygène.

Chapitre 6

Implantation

Le régulateur dimensionné travaille avec des variables d'écart autour du point de fonctionnement typique. Il mesure la qualité des produits et tend d'annuler l'erreur définie par la différence entre la qualité du produit actuel et la qualité au point de fonctionnement. Pour que le régulateur puisse fonctionner, il est important d'amener l'installation manuellement au point de fonctionnement. Ce sont les qualités au moment de l'enclenchement du régulateur qu'il prendra comme point de fonctionnement.

Les valeurs idéales pour la mise en ligne du régulateur sont 99.2% O_2 dans l'oxygène pur et 0.5% O_2 dans l'azote impur de la colonne de pression.

Les régulateurs présentés au tableau 4.3 fournissent comme sortie le nombre de pourcentages à ouvrir ou fermer la vanne correspondante. Il s'agit des vannes commandées par un courant de 4 – 20mA où 4mA correspond à la position fermée et 20mA à une vanne ouverte. En variables d'écart ceci donne 0.16mA par pourcentage. Les paramètres des régulateurs doivent être adaptés. Le gain K_p , déterminé sur la base du modèle identifié doit être multiplié avec le facteur 0.16.

Les mêmes symboles pour les fonctions de transfert et les paramètres des régulateurs sont utilisés dans le chapitre présent afin d'éviter l'introduction de nouvelles variables. Il s'agit en effet des mêmes grandeurs, simplement mises à l'échelle pour l'implantation.

6.1 Réglage par multiboucle

La première chose à planter est le réglage par deux boucles indépendantes sans prédicteur de Smith. Les paramètres des régulateurs *PI* sont données dans le tableau 6.1.

Le régulateur de chaque boucle s'écrit :

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{is}}\right)$$

	K_p	T_i
Boucle d'oxygène	-6.09	2870
Boucle d'azote impur	1.56	920

TAB. 6.1 – Paramètres pour une commande par multiboucle.

	K_p	T_i
Boucle d'oxygène	-16.29	2870
Boucle d'azote impur	1.56	920

TAB. 6.2 – Paramètres pour une commande par multiboucle avec un prédicteur de Smith pour la boucle d'oxygène.

Lors de l'implantation, il faut introduire une saturation des valeurs d'écart afin d'éviter qu'une mauvaise mesure ouvre où ferme une vanne complètement, provoquant ainsi une déstabilisation rapide du système, difficile à rattraper.

6.2 Amélioration des performances

6.2.1 Prédicteur de Smith

Comme indiqué plus haut, il est possible d'augmenter considérablement la rapidité de la boucle réglant l'oxygène en rajoutant un prédicteur de smith. Comme il se base sur le modèle identifié, surtout sur le retard pur, il faut être prudent lors de son implantation. Si les performances du système sont suffisantes sans l'ajout du prédicteur, il doit être omis.

Lors qu'on ajoute le prédicteur de Smith, il faut adapter les paramètres du régulateur *PI*. Les nouvelles valeurs sont représentés dans le tableau 6.2. D'ailleurs on a besoin de la fonction de transfert de la boucle d'oxygène. Le gain doit être adapté lui aussi en multipliant par le facteur $\frac{1}{0.16}$. Le prédicteur de Smith s'écrit donc :

$$G_S(s) = G'_{22}(s) - G'_{22}(s)e^{-\theta s} = \frac{0.245}{1 + 2870s} - \frac{0.245}{1 + 2870s}e^{-1200s}$$

6.2.2 Compensation de perturbation

Comme pour le prédicteur de Smith, il est crucial de disposer d'un modèle suffisant pour l'implantation d'une compensation de perturbation. De même, si les performances montrées en réglage par multiboucle sont suffisantes, l'implantation de la compensation de perturbation peut être omise.

Le régulateur décrit plus haut peut être conservé. Il suffit d'ajouter la compensation de perturbation avec la fonction de transfert suivante :

$$G_F = -0.000469 \frac{1 + 920s}{1 + s}$$

Comme mentionné dans la section traitant le dimensionnement de la compensation de perturbation, un changement de la période du changement des tamis moléculaires peut réduire les perturbations permettant d'une part de s'en passer de la compensation de perturbation et d'autre part de réduire aussi les perturbations sur la qualité d'oxygène.

6.3 Réglage du niveau du gazomètre

Une fois que les qualités sont réglées, il est possible de simplement ajouter une boucle de réglage. La différence du niveau du gazomètre de la valeur désirée est prise comme entrée pour le régulateur proportionnel. Ce régulateur devra régler la pré-rotation des deux turbocompresseurs simultanément. Deux cas limites sont à traiter : Lorsque les turbocompresseurs travaillent sous pleine charge et le niveau du gazomètre continue à descendre, les ventilateurs d'augmentation de pression et le compresseur supplémentaire doivent être mises en marche manuellement.

La limite inférieure est donnée par le pompage qu'il faut éviter. La pré-rotation sature à cette valeur et le niveau dans le gazomètre continue à augmenter.

Chapitre 7

Réduction de la perturbation

Il a été observé jusqu'à maintenant, que la difficulté principale du réglage est de compenser les perturbations provenant du changement des tamis moléculaires, notamment sur la qualité de l'oxygène pur. Dans le chapitre présent la cause de cette perturbation est analysée.

7.1 Cause de la perturbation

Le tamis moléculaire qui est en régénération voit principalement quatre phases. Dans la première phase, la pression dans le tamis moléculaire est baissée jusqu'à la pression atmosphérique. Par la suite il est régénéré par l'azote impur de la colonne basse-pression chauffé. Une fois cette phase terminée, le tamis moléculaire doit être refroidi. Pendant la dernière phase, il est mis sous une pression de 6 bar. Quand le cycle de régénération est terminé, on change de tamis moléculaire. Pendant une courte durée, les deux tamis moléculaires sont en utilisation. Ceci réduit la résistance et augmente le flux à travers la station des tamis moléculaires concernée. Par contre la station des tamis moléculaires de l'autre unité de séparation d'air constitue pendant ce temps une résistance constante et voit donc une diminution du flux pendant ce temps car les deux stations sont alimentées par la même conduite d'air comprimé.

La figure 7.1 montre quatre changements de tamis moléculaire par unité de séparation d'air. Chaque pic vers le haut correspond au moment auquel les deux tamis d'une unité fonctionnent en parallèle. Il est à noter que la deuxième station de tamis moléculaires voit au même moment un pic vers le bas, due au manque d'air car la résistance de la première station est inférieur pendant ce temps.

Avant chaque pic vers le haut, le flux d'air diminue car une partie de l'air est utilisé pour la mise sous pression du tamis moléculaire régénéré. Cette diminution s'observe aussi sur la deuxième station.

Comme les stations changent de tamis moléculaire avec un délai d'un quart

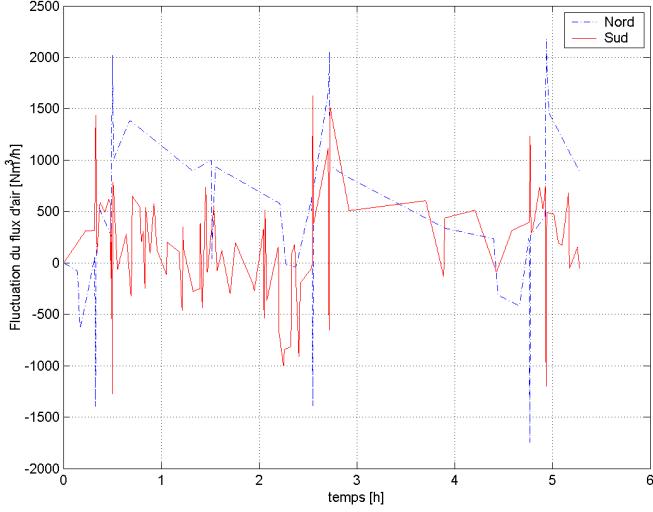


FIG. 7.1 – Fluctuations du flux d’air à travers les stations des tamis moléculaires de l’unité Nord et Sud respectivement.

d’heure, il se trouve que les effets des changements s’additionnent.

7.2 Propositions

Comme vu plus haut, les effets du changement des tamis moléculaires s’additionnent lorsque les changements sont effectués dans un délai trop court. Une amélioration considérable peut être obtenue en décalant l’un des tamis moléculaires afin d’éviter la superposition des deux perturbations.

Une autre manière de diminuer les perturbations et d’effectuer l’augmentation de pression sur un temps plus étendu en moins ouvrant la vanne à travers laquelle la mise sous pression se fait. L’augmentation de pression est une capacité hydraulique, C_h , qui se charge à travers la résistance hydraulique, R_h , représenté par la vanne. p représentant la pression, le flux Q est donné par :

$$Q = C_h \frac{dp}{dt} = \frac{P_0 - p(t)}{R_h}$$

et donc

$$p(t) = P_0 + (P_\infty - P_0)(1 - e^{-\frac{t}{R_h C_h}})$$

où $R_h \propto \frac{1}{S}$, S étant la section. Une diminution de 50% de la surface de l’ouverture de la vanne conduit donc à un temps de mise sous pression doublé.

En décalant les tamis moléculaires et en changeant la position de la vanne pour la mise sous pression on peut alors s'attendre dans le cas idéal à une réduction des perturbations de trois quarts.

Chapitre 8

Réalisation

Une réunion de toutes les personnes concernées a eu lieu pour discuter la réalisation. Lors de cette séance nous nous sommes rendus compte qu'un réglage des qualités n'est pas nécessaire :

Le changement des tamis moléculaires perturbe fortement la qualité de l'oxygène. Avant le changement, la qualité diminue et l'opérateur peu expérimenté observant ce changement tend à y remédier. Comme il y a un retard pur de 20 *min* entre la servovanne de prélèvement d'oxygène et la qualité d'oxygène, l'opérateur voit augmenter la qualité de l'oxygène avant que sa manipulation ait provoqué un effet. Ceci fait que beaucoup de manipulations inutiles sont faits.

L'opérateur expérimenté par contre sait que l'effet observé est dû au changement des tamis moléculaires et peut vérifier ceci en consultant le trend des derniers heures.

Les différences d'un opérateur à l'autre sont tels qu'il arrive qu'aucune des vannes n'est manipulée pendant plus que 10 heures. De l'autre côté on observe que la vanne de prélèvement est ouverte de quelques pourcentages pendant vingt minutes et refermée par la suite, avant qu'un effet ait pu être observé.

Finalement il n'est pas intéressant d'automatiser un système qui nécessite aussi peu de manipulations.

Au-delà on prend des risques non négligeables en automatisant l'installation :

L'opérateur ne touchera plus l'installation pendant qu'elle fonctionne normalement, dans le cas idéal pendant deux ans. Lors d'un problème technique il est par contre nécessaire de régler l'installation manuellement et l'opérateur manquera d'expérience pour pouvoir garder la situation sous

contrôle. De même, lors de l'arrêt d'une installation comme il a lieu tous les deux ans pour des travaux de maintenance, il manquera de savoir-faire pour la mise en marche.

Une commande qui peut gérer les situations comme par exemple le défaut d'un turbocompresseur ou la mise en marche de l'installation est loin d'être intéressante d'un point de vue économique car il faudrait changer toute une série de vannes manipulées manuellement jusqu'à ce jour, certains se trouvant dans la coldbox, n'étant donc que très difficilement accessibles. D'ailleurs, la réceptivité à des pannes techniques augmenterait.

La raison pour laquelle cette installation peut être conduite manuellement est finalement qu'elle date d'une époque à laquelle on ne disposait pas encore de moyens pour régler les qualités automatiquement. Elle a donc été dimensionnée très généreusement avec des grandes réserves.

Le décalage des tamis moléculaires a été réalisé et une réduction des perturbations d'environ 30% a pu être observée. Cette amélioration facilite à l'opérateur de conduire l'installation.

Au lieu d'implanter des régulateurs il vaut mieux de sensibiliser les opérateurs.

Conclusion

Après une analyse du système à régler et le choix des grandeurs de réglage, il a été montré en simulation qu'un réglage automatique des qualités par multiboucle est possible. Des mesures à prendre pour une amélioration du comportement ont été décrites par la suite et les paramètres pour l'implantation ont été calculés.

La possibilité d'étendre le système en réglant aussi le niveau du gazomètre a été discutée. Finalement des propositions pour diminuer les perturbations sur le système sont données.

Le résultat final du travail est qu'une automatisation n'est pas requise et même indésirable pour les différentes raisons décrites dans le dernier chapitre. Initialement, le but de l'automatisation était de permettre à l'opérateur de pouvoir quitter son poste de travail pour pouvoir effectuer d'autres travaux. Il a été montré que ceci est déjà possible à l'heure actuelle et ne nécessite aucune automatisation.

Annexe

- Esquisse de principe du processus de la séparation d'air
- Screenshot de l'aperçu de l'unité de séparation d'air sous DeltaV
- Schéma de la tuyauterie et des instruments :
 - Principe de base
 - Aspiration et compression de l'air
 - Coldbox avec échangeur de chaleur

Bibliographie

- [1] E.H. Bristol. On a new measure of interactions for multivariable process control. *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 11 :133–134, 1966.
- [2] G.H. Cohen and G.A. Coon. Theoretical considerations of retarded control. *Trans. ASME*, 75 :827–834, 1953.
- [3] Peter Grassmann, Fritz Widmer, and Hansjörg Sinn. *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*. de Gruyter, Berlin, 1997.
- [4] Heinz Jungnickel, Rainer Agsten, and Wolf Eberhard Kraus. *Grundlagen der Kältetechnik*. Verlag Technik, Berlin, 1990.
- [5] Roland Longchamp. *Commande numérique de systèmes dynamiques*. PPUR, Lausanne, 1995.
- [6] A. Niederlinski. A heuristic approach to the design of linear multivariable control systems. *Automatica*, 7 :691–701, 1971.
- [7] D.E. Rivera, M.Morari, and S. Skogestad. Internal model control. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 25 :252–265, 1986.
- [8] Shouli Wu, Keiji Watanabe, Eiichi Muramatsu, Yuuichi Ariga, and Shigeru Endo. Robust stability of approximate smith predictor control systems. *SICE*, pages 1522–1527, 2004.