

Production automatisée de ciment en utilisant la technologie des poudres

Julien A. Rajomalahy¹, Honoré Ranoarivony¹, Lala Andrianaivo¹, Bruno Rakotovao¹ et Voahanginirina J. Ramasiarinoro²

¹ Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar

² Université d'Antananarivo, Faculté des sciences, BP 906, Antananarivo 101, Madagascar

Résumé

L'idée générale de cet article est d'utiliser les logiciels informatiques pour l'optimisation, la simulation et la production virtuelle dans un procédé industriel afin d'améliorer le fonctionnement de production de ciment. L'objectif principal concerne le dosage et l'automatisation de la production de ciment. Il faudra ainsi maîtriser la robotique, bien choisir les logiciels appropriés pour les procédés industriels et obtenir le maximum d'informations sur l'industrie du ciment et les procédés technologiques. Nous avons utilisé la méthode de l'automatique, le principe de la régulation et les théories des fluides. On a pu obtenir le modèle du système pour faciliter ainsi la recherche du correcteur adapté. La rapidité, la précision du système après correction a été satisfaisante.

Mots clés : Ciment, technologie des poudres, dosage numérique, automatique, simulation

1. INTRODUCTION

L'interprétation des bases des données qui sont exécutées par les logiciels nous permettent de mieux comprendre le fonctionnement du procédé industriel. Grâce à cette action on peut trouver la solution adaptée aux différents retards causées par les perturbations dans les procédés et d'améliorer la production.

Dans notre cas, on se limite à l'étude du procédé de dosage de ciment par la technologie des poudres. L'objectif principal est le dosage et l'automatisation de la production de ciment. Les autres objectifs concernent l'obtention de maximum d'informations sur l'industrie du ciment et les procédés technologiques, la maîtrise de la robotique ainsi que le choix des logiciels appropriés pour les procédés industriels.

Le procédé des poudres est plus rentable que les autres procédés de fabrication de ciment. De plus l'utilisation des logiciels de simulation nous permet de savoir le fonctionnement du système dans le temps, cela grâce à la modélisation du procédé.

2. METHODOLOGIE

Notre usine se compose de quatorze citernes, de vingt et huit vannes, de sept tubes de venturi, de cinq régulateurs PI et d'une moto compresseur (Figure 1). Le dosage s'effectue en deux étapes :

- Première étape :

On introduit de la poudre de calcaire dans la citerne de stockage J et de la poudre d'argile dans la citerne de stockage K, ces poudres sont ensuite aspirées par venturi et dosées dans deux citernes de dosage L et M avant d'être mélangées ; et stockées dans une citerne N. Le dosage est de l'ordre de 20 % pour l'argile et 80% pour le calcaire.

Le mélange dans la citerne N passe dans un atelier de cuisson pour obtenir du clinker.

- Deuxième étape :

Le clinker en poudre est maintenant stocké dans la citerne A. Tandis que dans la citerne B on y stocke du gypse, et dans la citerne C des éléments additifs pour chaque différent type de ciment (soit de la pouzzolane, du filet ou des cendres volants).

Ces éléments passent dans trois citernes de dosage G, H et I ; et ensuite sont mélangés selon le type de ciment pour être stockés dans la citerne F pour le ciment CPJ et dans la citerne E pour le ciment CPA. Le dosage est de l'ordre de 96% de clinker et 4% de gypse pour la fabrication de CPJ, 60% de clinker avec 30% d'éléments additifs.

Tableau 1 : Liste des acronymes

	Désignation	Citerne
Vannes de régulation Q	v	L
	w	M
	x	G
	y	H
	z	I
Vannes injecteur T	l_1	L
	l_2	M
	l_3	G
	l_4	H
	l_5	I
Vannes de vidage S	J	J
	K	K
	L	L
	M	M
	A	A
	B	B
	C	C
	G	G
	H	H
	I	I
	E	E
	F	F
	Vanne de choix de chemin U	H'
G		CPJ
Vanne indicateur de pression P		P_1
		P_2
		P_3

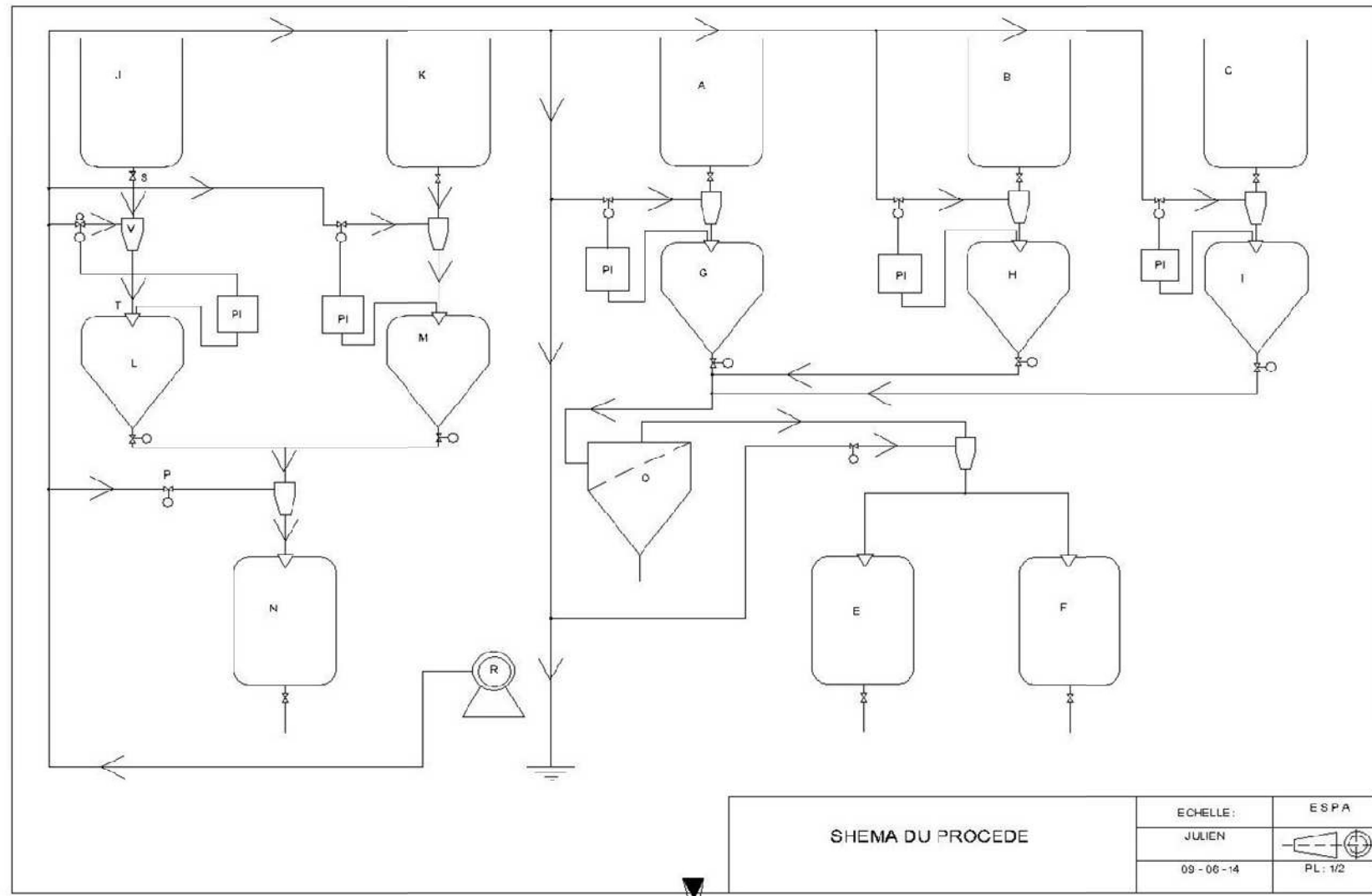


Figure 1 : Schéma de l'usine de cimenterie

La précaution à prendre est de s'assurer que l'usine fonctionne bien avant d'investir plus d'argent pour sa construction. Pour remédier à cela, il suffit de modéliser le système automatique puis passer à une simulation en utilisant le logiciel dénommé « avy-etsy » et une visualisation en trois dimensions du système de production de ciment.

2. MODELE D'AUTOMATISME UTILISE

L'automatisme est un ensemble formé de plusieurs organes. On y entre un ou plusieurs grandeurs d'entrée et on obtient une ou plusieurs grandeurs de sortie, selon des fonctions définies par le procédé à automatiser. On l'appelle partie commande (Figure 2).

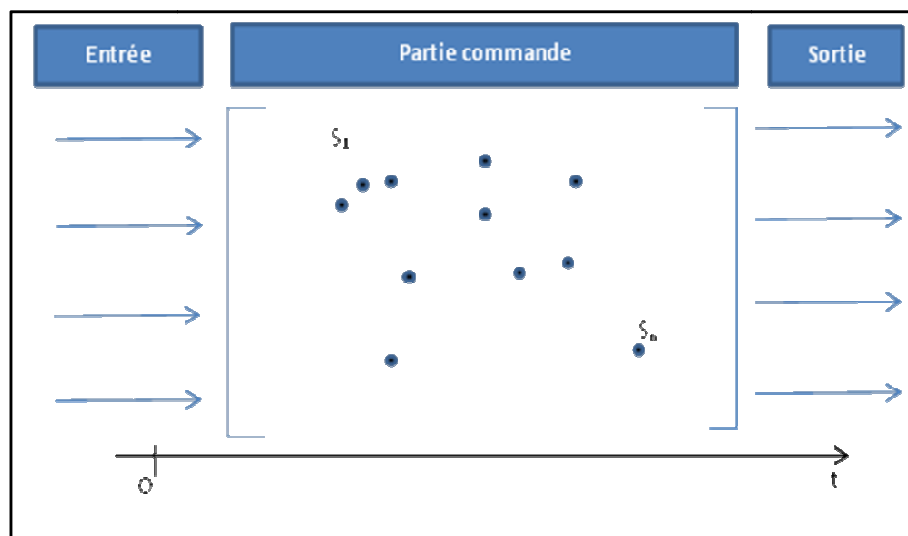


Figure 2 : Partie commande de l'automatisme

Soit G un ensemble formé de plusieurs organes, noté S et numéroté de 1 à n . Ces organes peuvent évoluer dans le temps et former un système automatisé. Chacun de ces organes procèdent leur propre propriété appelée fonction de transfert. Et pour que le système fonctionne normalement il faut que tous ces éléments soient stables dans le temps.

$$G = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_j, \dots, S_n\}$$

En fonction du temps, on a :

$$G(t) = \{S_1(t), S_2(t), S_3(t), \dots, S_j(t), \dots, S_n(t)\}$$

Pour structurer l'ensemble G on peut utiliser trois grandes méthodes qui y sont presque le même.

Méthode du Grafcet : Le grafcet du système (Figure 3) à automatiser est traduit en langage ladder et ensuite introduit dans l'automate. Ce dernier passe la commande aux effecteurs.

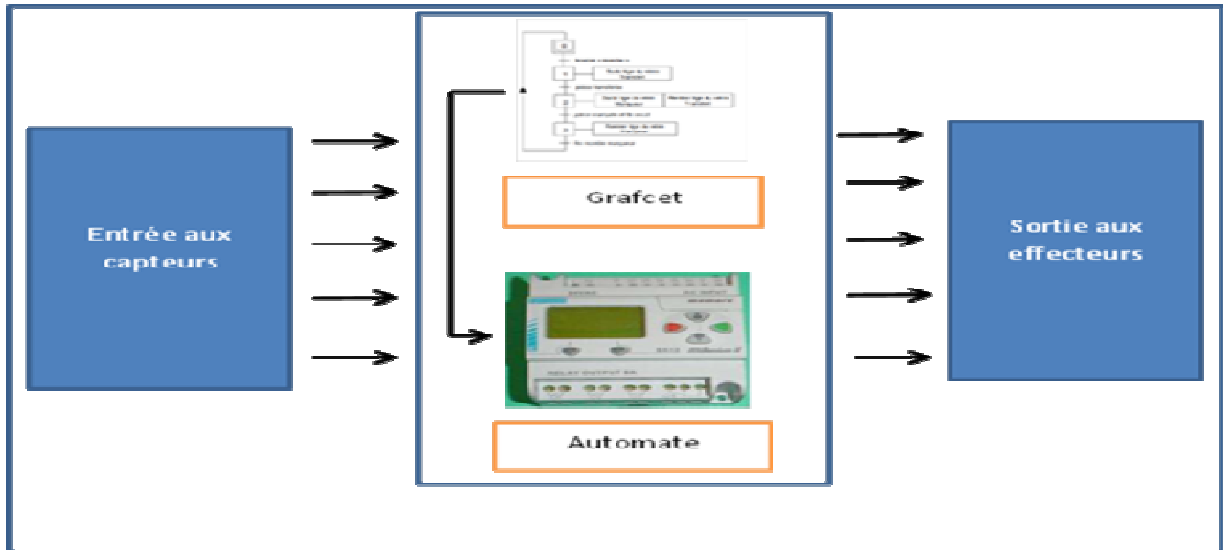


Figure 3 : Schéma du Grafcet

Méthode du logigramme : Pour cette méthode on rédige tout d’abord le logigramme du système, puis grâce aux différentes portes logiques (porte nande, porte xore, porte nor, etc.), on peut créer une armoire de commande du système (Figure 4), ou encore en utilisant des circuits intégrés.

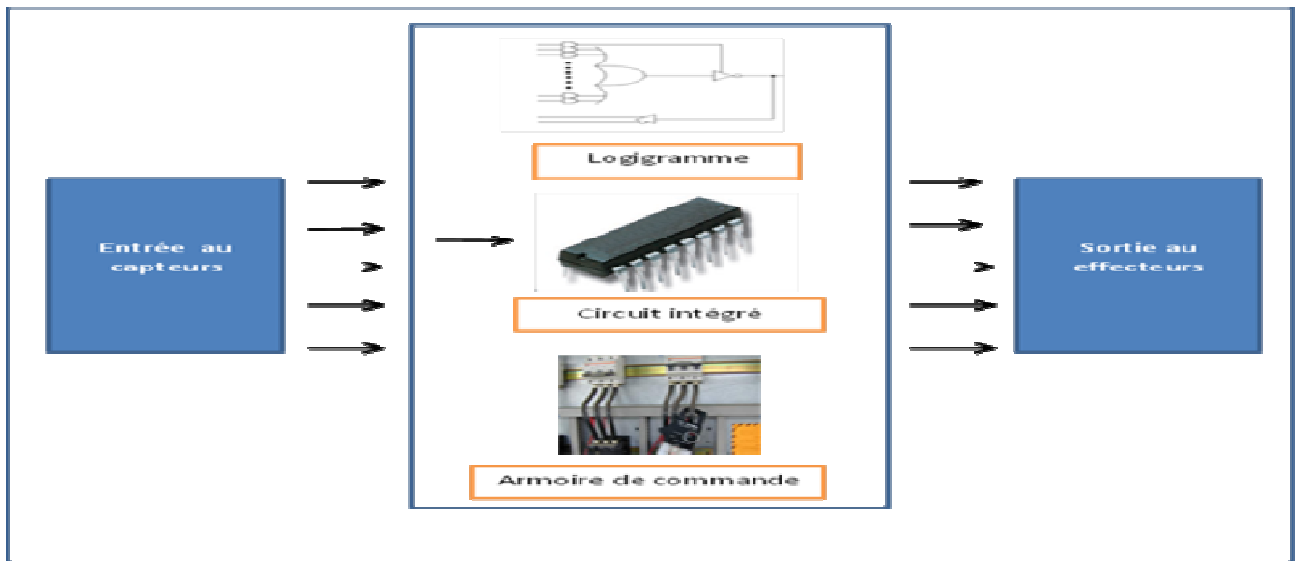


Figure 4 : Schéma du logigramme

Méthode de l’informatique numérique : Dans ce cas, on rédige l’algorithme de commande du système (Figure 5), c’est l’ordinateur qui commande le système à l’aide du microprocesseur et d’un langage de programmation comme par exemple (Java, C++, ...).

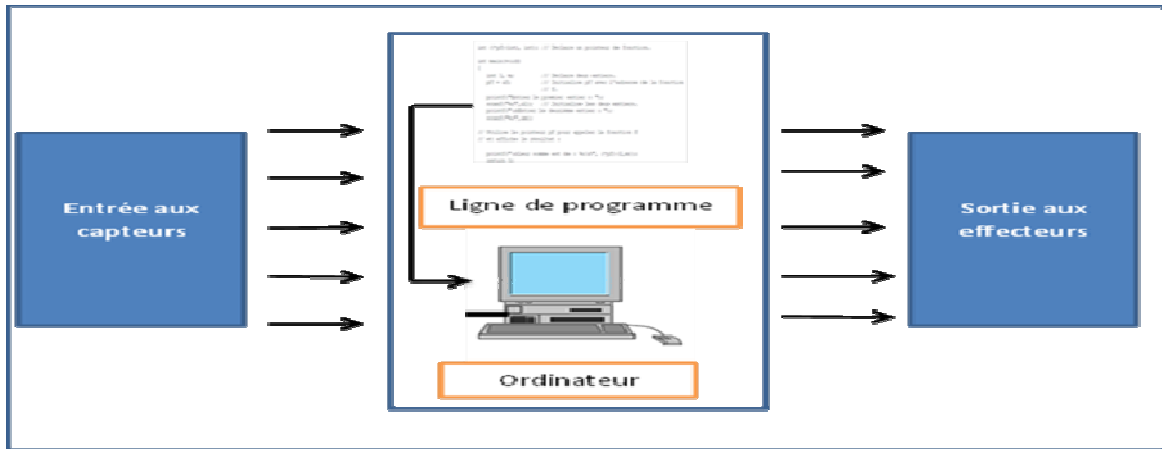


Figure 5 : Commande du système

En même temps que le système automatisé G. Les organes S sont parfois déstabilisés à cause des perturbations, des retards dus au procédé et au composant de conception. Comme solution on utilisera le modèle de l'organe S pour corriger ces problèmes.

$$[S] = \mathfrak{L}(\{e(t)\}, \{s(t)\})$$

L'organe S peut être défini par l'ensemble de ces entrées et de ces sorties. On peut donc écrire S en fonction de e(t) et de s(t). Ici \mathfrak{L} exprime la relation de fonctionnalité.

Pour un système linéairement invariant noté SIL, l'entrée et la sortie sont des polynômes à coefficient réel et à une indéterminé fonctionnelle. On le représente par la relation.

$$a_1 e^1 + a_2 e^2 + \dots + a_j e^j + \dots + a_n e^n = b_1 s^1 + b_2 s^2 + \dots + b_j s^j + \dots + b_n s^n$$

$$\text{Avec } e^n = \frac{d^n e(t)}{d t^n}$$

$$s^n = \frac{d^n s(t)}{d t^n}$$

Ici le e^n désigne le dérivé n-ième de l'entrée e (t) par rapport au temps t et de même pour la sortie s.

La résolution de cette relation différentielle est plutôt difficile et demande beaucoup de temps. C'est pourquoi on utilise la transformation de Laplace qui dit que :

$$\frac{d^n e(t)}{d t^n} = p^n S(p)$$

p : Variable de Laplace

En appliquant cette transformation, on a

$$a_1 p^1 E(p) + a_2 p^2 E(p) + \dots + a_j p^j E(p) + \dots + a_n p^n E(p) \\ = b_1 p^1 S(p) + b_2 p^2 S(p) + \dots + b_j p^j S(p) + \dots + b_n p^n S(p)$$

$$\frac{S(p)}{E(p)} = \frac{a_1 p^1 + a_2 p^2 + \dots + a_j p^j + \dots + a_n p^n}{b_1 p^1 + b_2 p^2 + \dots + b_j p^j + \dots + b_n p^n}$$

Le modèle simplifié d'un organe S est donc défini par H (p),

$$H(p) = \frac{a_1 p^1 + a_2 p^2 + \dots + a_j p^j + \dots + a_n p^n}{b_1 p^1 + b_2 p^2 + \dots + b_j p^j + \dots + b_n p^n}$$

3. MODELISATION DU SYSTEME A ETUDIER

L'usine comporte cinq citernes doseuses dont deux pour le premier dosage et trois pour le second. Elles sont presque toutes identiques. Les autres organes son en générale des organes tout ou rien, c'est à dire pas trop de retard. Le but est de garder constant le débit de l'injecteur quelle que soit la perturbation dans les conduites. L'unité à réguler est composé de plusieurs composants (Figure 6).

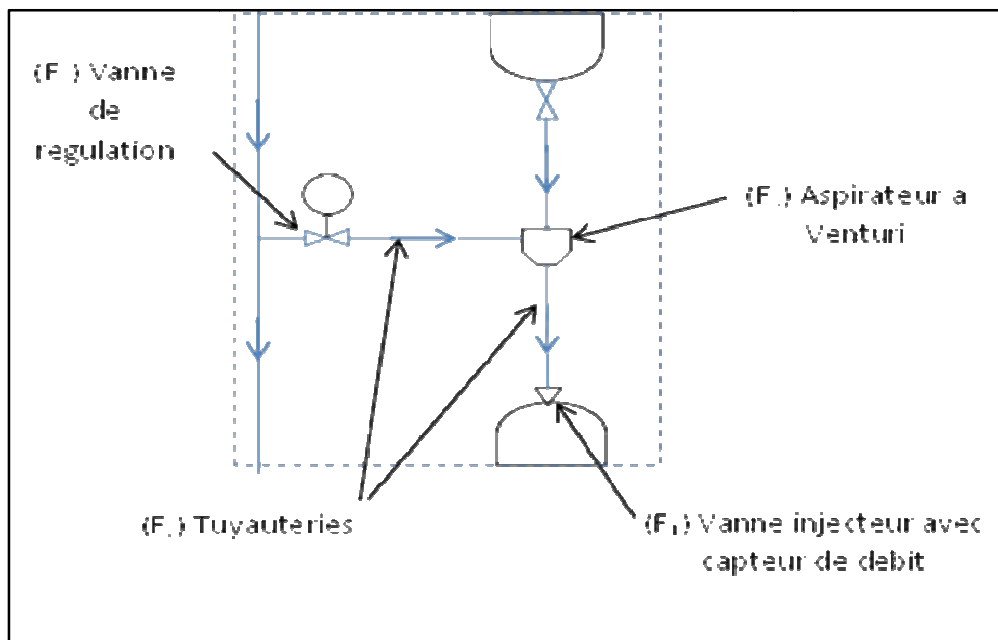


Figure 6 : Composants du système régulateur

Le tube de venturi F_4 sert pour aspirer la poudre de ciment. Le régulateur de débit F_3 est une vanne de précision de diamètre 10, la vanne F_1 est un simple injecteur pour diminuer l'effet de la dispersion des poudres de ciments.

La perturbation est donc due à la conduite F_2 qui est le siège de l'effet de frottement et celle des forces de masses.

Dans notre étude la tuyauterie est de diamètre 10, ce qui fait que l'effet de la gravité est peu percevable.

L'effet de frottement est caractérisé par :

- Le ciment lui-même
- La nature et la courbure des tuyaux.

Pour la modélisation on utilise trois grands théorèmes qui sont :

- Le théorème du bilan de la grandeur appliqué à la quantité de mouvement (1):

$$\frac{dQ_M}{dt} = \int_V \left(\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div } \bar{Q}_M \right) dV = \int_V p_{in} dV + \int_{\Omega} p_{\Omega} d\Omega$$

- Le théorème de dispersion des poudres (2):

$$\int_S \vec{n}_j(\vec{r}) d^2r + \int_V \Sigma_a(\vec{r}) \varphi(\vec{r}) d^3r = \int_V S(\vec{r}) d^3r$$

- Le théorème de la viscosité (3):

$$s = \xi \frac{d\gamma_{1,2}}{dt}$$

3.1. Application du théorème (1)

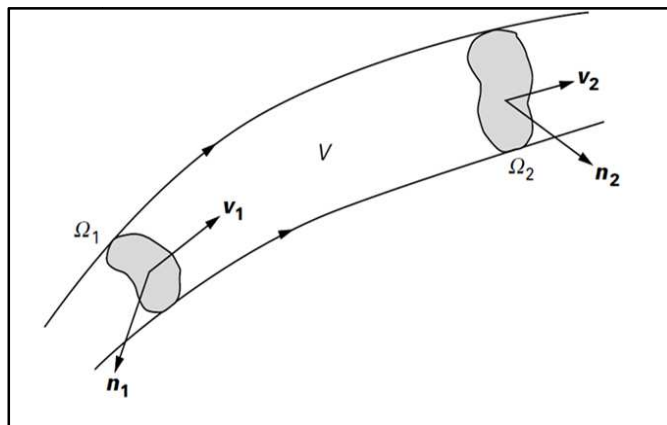


Figure 7 : Représentation schématique de l'écoulement

Soit un point P, qui se trouve à l'intérieur de la conduite, en appliquant le théorème de bilan des grandeurs. On désigne par :

Ω_i : Section quelconque

V : Volume

v_i : Vitesse

n_i : Normale extérieur au section quelconque

L'écriture de l'équation intégrale de la quantité de mouvement ne fait intervenir aucune différence entre les forces appliquées au système. Elle est obtenue par un régime permanent. On a donc :

$$R = \int_{\Omega} \rho v(nv)d\Omega$$

Ici R représente les forces

$$\int_{\Omega} \rho v(nv)d\Omega \text{ représente la variation de la quantité de mouvement}$$

$$\text{Soit } \rho v n d\Omega = d\dot{M}$$

\dot{M} Correspond au débit massique du fluide sur la surface $d\Omega$ compté positivement si le fluide sort du volume V .

Ainsi l'équation intégrale s'écrit :

$$\int_{\Omega} v d\dot{M} = R$$

Dans le volume V limité par Ω_1 et Ω_2 On a :

$$R = \int_{\Omega_2} v_2 d\dot{M}_2 - \int_{\Omega_1} v_1 d\dot{M}_1$$

Dans un courant de ciment de vitesse v_i et de section Ω constante, on a :

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$$

$$R = \dot{M}(v_2 - v_1)$$

Pour notre cas :

$$\sum_{F_{ext}} = R$$

$$\dot{M} = \frac{H}{\rho}$$

$$\sum_{F_{est}} = \frac{H}{\rho} (v_2 - v_1)$$

Avec v_1 : vitesse de départ venant de la vanne de régulation

v_2 : vitesse dans l'injecteur de débit

H : Débit massique de l'aspiration par venturi

ρ : Masse volumique du ciment

3.2. Application du théorème (2)

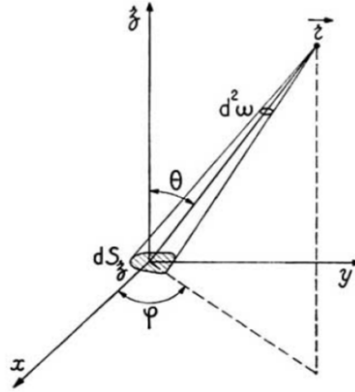


Figure 8 : Représentation géométrique des paramètres

De même, le ciment étant soumis à des phénomènes de dispersion, considérons l'équation (2). D'après la formule d'Ostrogradski, on a :

$$\int_S \vec{n} \cdot \vec{j}(\vec{r}) d^2r = \int_V \text{div} \vec{j}(\vec{r}) d^3r$$

Quel que soit le volume V, cette équation vérifie que :

$$\text{div} \vec{j}(\vec{r}) + \Sigma_a(\vec{r}) \varphi(\vec{r}) = S(\vec{r})$$

Cette équation définit la relation entre le flux et le courant qu'on peut transformer en une équation de flux seul en appliquant la loi de Fick :

$$\vec{j}(\vec{r}) = -D(\vec{r}) \text{grad} \varphi(\vec{r})$$

On a donc :

$$-\text{div}[D(\vec{r}) \text{grad} \varphi(\vec{r})] + \Sigma_a(\vec{r}) \varphi(\vec{r}) = S(\vec{r})$$

On suppose que le ciment est homogène, ce qui signifie que :

$$D(\vec{r}) = D = \text{Contante}$$

$$\Sigma_a(\vec{r}) = \Sigma_a = \text{Contante}$$

Elle s'écrit donc par :

$$-D \Delta \varphi(\vec{r}) + \Sigma_a \varphi(\vec{r}) = S(\vec{r})$$

C'est une équation aux dérivées partielles du second ordre, linéaire et, ici, à coefficients constants. Il faut préciser les conditions aux limites avant de chercher la forme des solutions dans différents cas simples.

On choisit le plan source comme origine de coordonnées (Cas d'une seule dimension x). Le flux φ est solution de l'équation différentielle :

$$-D\Delta\varphi(x) + \Sigma_a\varphi(x) = 0$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} - \Delta^2 \varphi(x) = 0$$

$$\frac{1}{\Delta} = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}} \quad \text{Longueur de dispersion de la poudre de ciment}$$

3.3. Application du théorème (3)

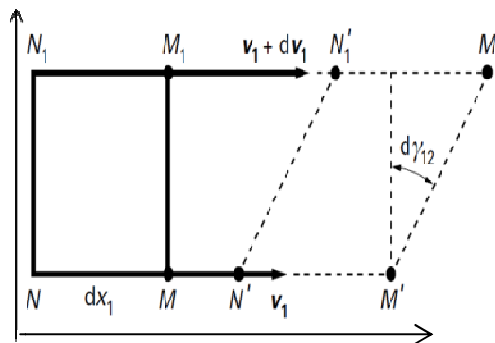


Figure 9 : Représentation de la contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement entre deux couches de fluides qui s'écoulent à des vitesses différentes est proportionnelle à la vitesse de déformation des particules de ciment (Figure 9).

En effet, soient deux points M et M_2 qui, à l'instant t ont la même abscisse x_1 . M se déplace à la vitesse $v = v_1 x_1$ et M_1 à la vitesse $v + dv = (v_1 + dv_1) x_1$. Au bout du temps dt , le point M sera déplacé de la quantité $v_1 dt x_1$.

Le résultat de cette différence de déplacement est une distorsion du carré MM_1N_1N à l'instant $t+dt$, la déformation angulaire est :

$$d\gamma_{1,2} = \frac{dv_1 dt}{dx_2}$$

Comme la vitesse de déformation angulaire et par définition $\frac{d\gamma_{1,2}}{dt}$, on voit que la contrainte de cisaillement s'écrit :

$$s = \xi \frac{d\gamma_{1,2}}{dt}$$

Les poudres de ciment obéissent à cette loi. On l'appelle loi de Newton.

On obtient de ce fait la formule :
$$s = \xi \frac{dv_1}{dx_2}$$

3.4. Combinaison des équations

D'après l'application (1), on a :
$$\sum_{Fest} = \frac{H}{\rho} (v_2 - v_1)$$

D'après l'application (2), on a :
$$\frac{1}{\Delta} = \sqrt{\frac{D}{\Sigma a}}$$

Cette longueur de dispersion s'oppose au déplacement du ciment dans la conduite,

$$\frac{1}{\Delta} = 0,610^{-2} \text{ m}$$

D'après l'application (3), on a :
$$S = \xi \frac{d\gamma_{1,2}}{dt}$$

Le coefficient de frottement ξ s'oppose à l'aspiration de la poudre de ciment,

$$\xi = 0,14 \text{ m/Kg s}^{-2}$$

D'où
$$\frac{1}{\Delta} \xi \frac{d\bar{v}_1}{dt} = \frac{H}{\rho} (v_2 - v_1)$$

En appliquant la transformation de Laplace, on a :

$$\frac{1}{\Delta} \xi pV(p) = \frac{H}{\rho} (V_2(p) - V_1(p))$$

Le model du système est donc une fonction $H(p)$ définie par:

$$H(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)}$$

4. CORRECTION DU SYSTEME A ETUDIER

Désormais on peut passer à la correction du système à étudier grâce au modèle obtenu. Le modèle de notre système est

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{1\rho}{\Delta H} \xi p}$$

Puis en faisant l'application numérique, on a

$$H(p) = \frac{1}{1 + 1,489 p}$$

Ici la relation $H = 0,94 \Omega_1 \Omega_2 \sqrt{p}$ est la formule empirique de l'aspiration par Venturi

Ω_1 : Petite section du tube de venturi (diametre D_1)

Ω_2 : Grande section du tube de venturie (diametre D_2)

P : Pression en amont du système

et ρ : la masse volumique du ciment

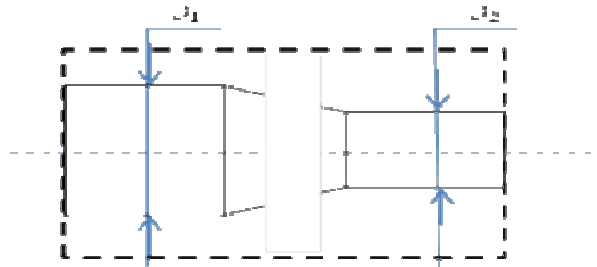


Figure 10 : Représentation schématique du système Venturi

4.1. Méthode de correction d'un système

Soit $G(p)$ la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système à corriger

$$H(p) = C(p)G(p)$$

$H(p)$: Fonction de Tranfert en Boucle Fermée FTBF

$C(p)$: Correcteur adapté

$G(p)$: Fonction de tranfert du processus

Avec retour unitaire, on a :

$$H(p) = \frac{C(p) G(p)}{1+C(p)G(p)}$$

De ce fait

$$C(p) = \frac{H(p)}{G(p)[1-H(p)]}$$

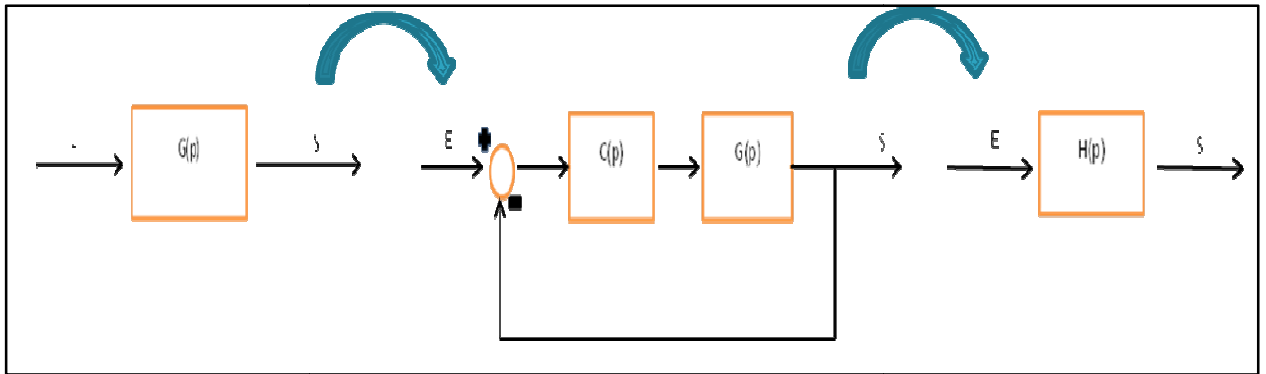


Figure 11 : Schéma du système

4.2. Choix du correcteur C(p)

Pour choisir le correcteur C(p), on a le choix entre deux méthodes, la méthode directe et la méthode du PID classique :

- Méthode directe

On choisit H(p) pour que le système fonctionne mieux. En règle générale on considère un FTBF du second ordre.

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{2M}{\omega_n}p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$$

- D'amortissement assez élevé pour éviter les dépassements abusifs ($m = 0,7$),
- De pulsation propre ω_n aussi élevée que possible (bande passante large, donc tr meilleur),
- Du gain statique égal à l'unité, qui assure un écart de position nul en régime permanent.

- Méthode du PID classique

On corrige le système avec un correcteur PID réglé selon trois grands principes empiriques :

- Principe de Broida
- Principe de Ziegler Nichols
- Principe de Cheine et Horness

4.3. Application à notre système

On veut augmenter la rapidité et améliorer la précision du système ; soit k une grandeur proportionnelle à notre temps de réponse.

On utilisera la méthode directe, qui consiste à varier la valeur k qui est le rapport entre la vitesse voulu et la vitesse au début.

On trouve que pour $k= 10$ notre système est encore stable et très rapide. Après calcul, on a:

$$T(p) = \frac{4,8}{4,8r+p+0,106p^2}$$

5. SIMULATION DU FONCTIONNEMENT

La simulation consiste à faire évoluer le système dans le temps et de prévoir ce qui va se produire, afin d'obtenir des données sur le système.

Les données à récolter sont :

- L'écart de position
- La stabilité
- Les données générales qui sont : le temps de réponse, le temps de montée, le temps de π , le pseudo période, le dépassement et les pulsations de coupures

Nous avons conçu deux logiciels pour la simulation : le logiciel « hono » et le logiciel « avy etsy ».

5.1. Simulation sous le logiciel « hono »

- On introduit la fonction de transfert de l'organe, obtenue grâce à la modélisation dans le logiciel « hono ».
- On introduit ensuite la valeur du rapport de vitesse qui est égale à 10 pour notre cas.
- On clic sur GO

Le logiciel calcule automatiquement le correcteur adapté à notre organe pour un rapport de vitesse égale à 10, on utilisant la forme polaire. De même, elle corrige notre système en affichant la fonction de transfert corrigée selon le correcteur adapté.

Notre logiciel simule l'organe en représentant son évolution dans le temps : la première courbe est celle du FTBO (c'est-à-dire non corrigé), la deuxième courbe est celle du correcteur adapté et le troisième correspond à la comparaison des évolutions avant correction en bleu et après correction en vert (Figure 12).

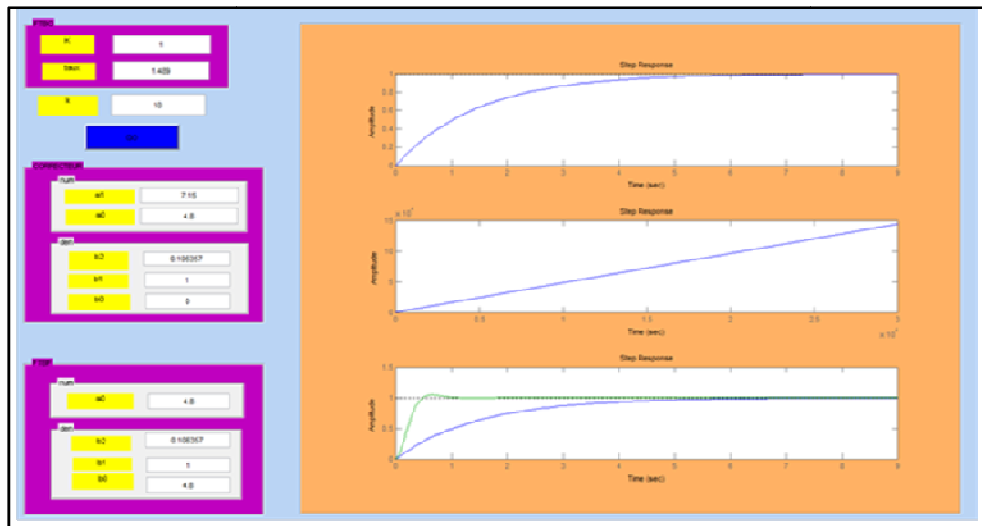


Figure 12 : Simulation sous le logiciel « hono »

5.2. Simulation sous le logiciel « avy etsy »

Pour le mode opératoire, on clic sur +1 pour introduire dans le logiciel la fonction de transfert à corriger.

Notre logiciel peut faire la simulation temporelle du système non corrigé, en lui imposant des signaux testes : la rampe, l'échelon et l'indiciel.

Une simulation harmonique est aussi possible en imposant à notre organe un signal sinusoïde de pulsation oméga : Représentation de Bode, représentation de black Nichols, représentation de Nyckiste.

On peut aussi simuler la correction en utilisant les principes empiriques de Brida ou de Zigler Nichols ou celle de Shene et Hones qui consistent à varier les valeurs des constantes de temps du PID Classique. Il est aussi possible de changer le retour $R(p)$ mais pour notre cas, on utilise le retour unitaire.

En même temps notre logiciel affiche la fonction de transfert corrigée de l'organe (Figure 13) en utilisant toujours la forme polaire.

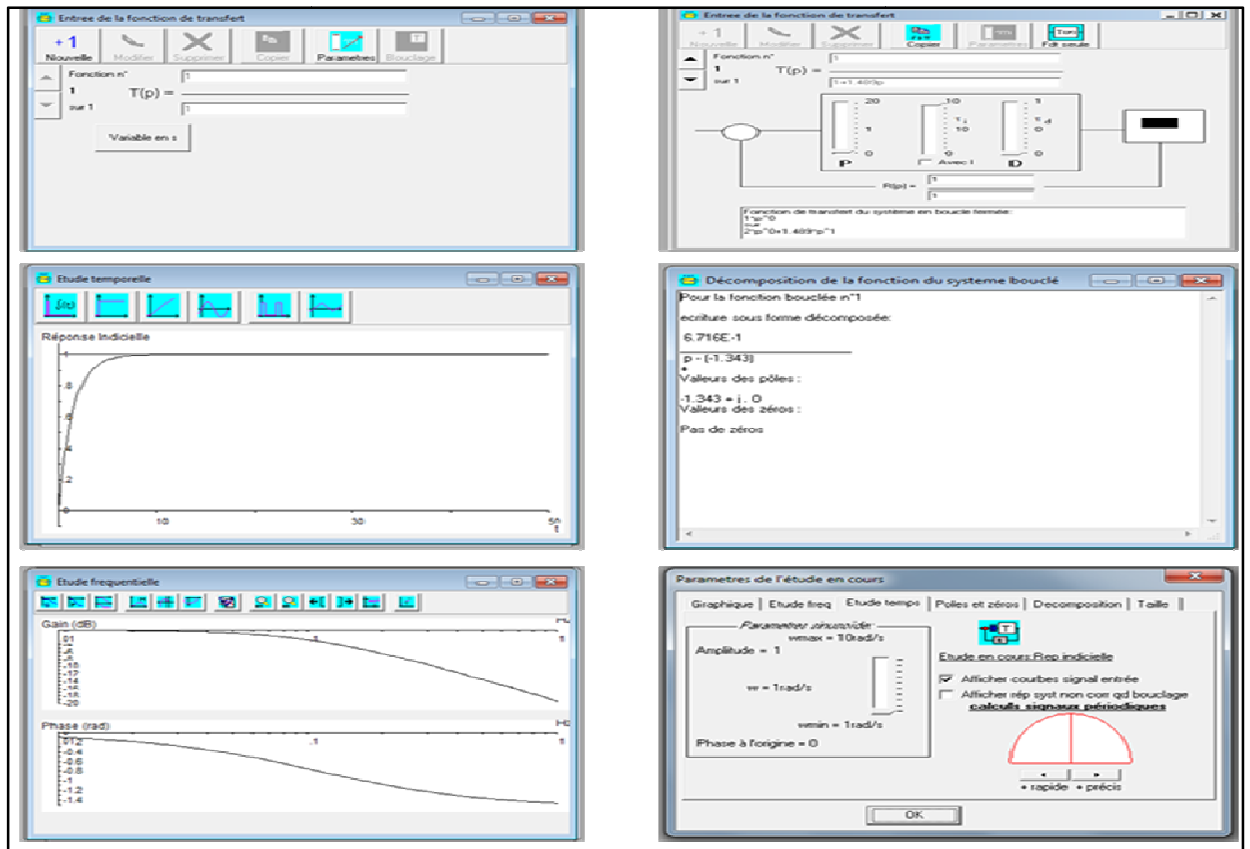


Figure 13 : Fonction de transfert corrigée de l'organe sous logiciel « avy etsy »

5.3. Résultats

Le premier résultat compare les erreurs statiques en régime permanent du système en boucle ouvert et en boucle fermé. Tandis que le deuxième nous montre la comparaison de la courbe de simulation. Les tableaux 2 et la figure 12 résumant les résultats.

Tableau 1 : Erreurs statiques en régime permanent

		Tableau 8	
		BO	BF
ϵ		0,5	0,17
t_r [s]		4,467	0,4467

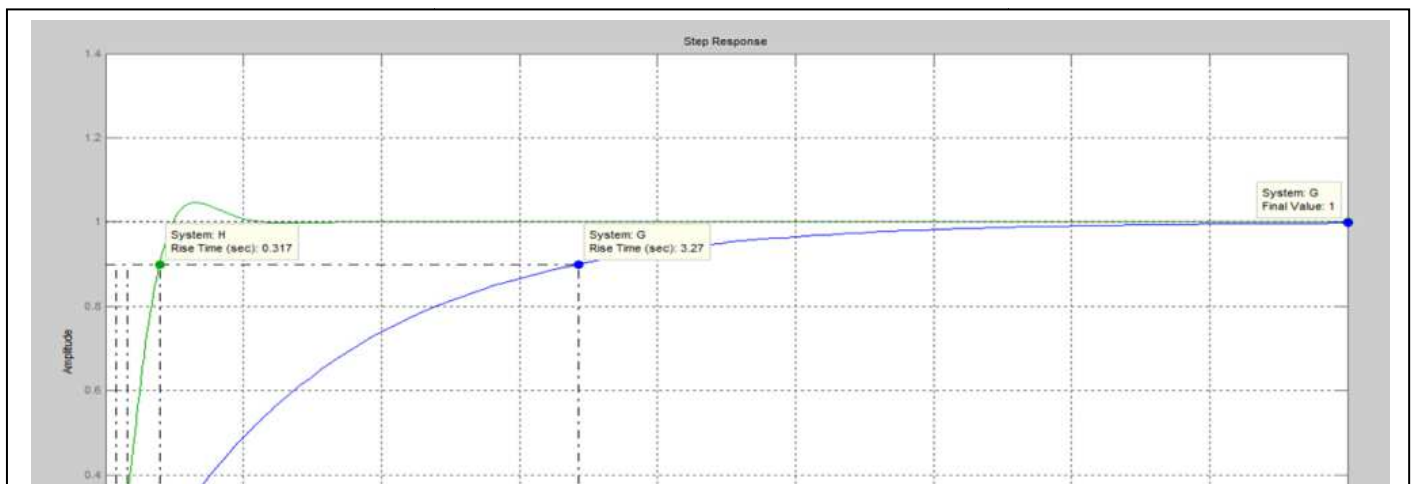


Figure 14 : Courbe de simulation

6. INTERPRETATION DES RESULTATS

On trouve que le système fonctionne avec le temps, mais pour être encore plus performant on la corrige avec un correcteur PI qui fait augmenter la rapidité et la précision du système.

De cette manière, il y a précision sur la quantité de poudre versée dans le système à étudier. Le système est aussi stable même avec correction.

Le système fonctionne mieux avec le correcteur PI, qui lui est adapté.

7. ANIMATION DU SYSTEME

L'animation consiste à créer une visualisation virtuelle à trois dimensions du système de production et une visualisation systématique (Figure 15).

7.1. Visualisation systématique

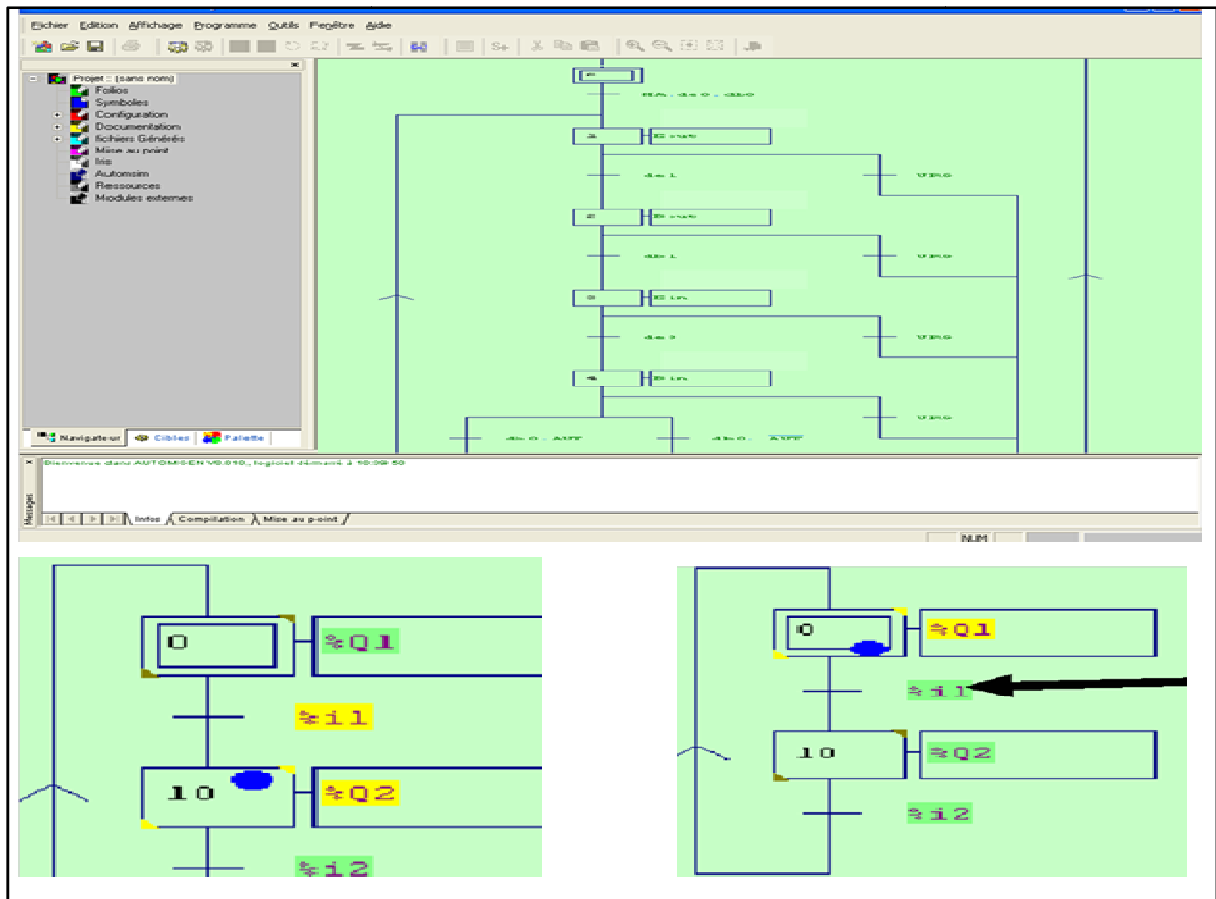


Figure 15 : Visualisation systématique

- On choisit tout d'abord la poste processeur cible, dans notre cas, il s'agit de l'ordinateur. On clic sur le PC.
- Puis on active la connexion
- Après on compile le Grafcet
- On exécute le programme

Avant le lancement, les états initiaux de notre usine doivent être activés

- L'opérateur doit choisir quel type de ciment il veut fabriquer. On appuie sur U pour le CPA et sur T pour le CPJ. A titre d'exemple on choisit CPA
- On démarre la visualisation (Figure 16) en activant le bouton marche
- Le point bleu indique l'évolution du système

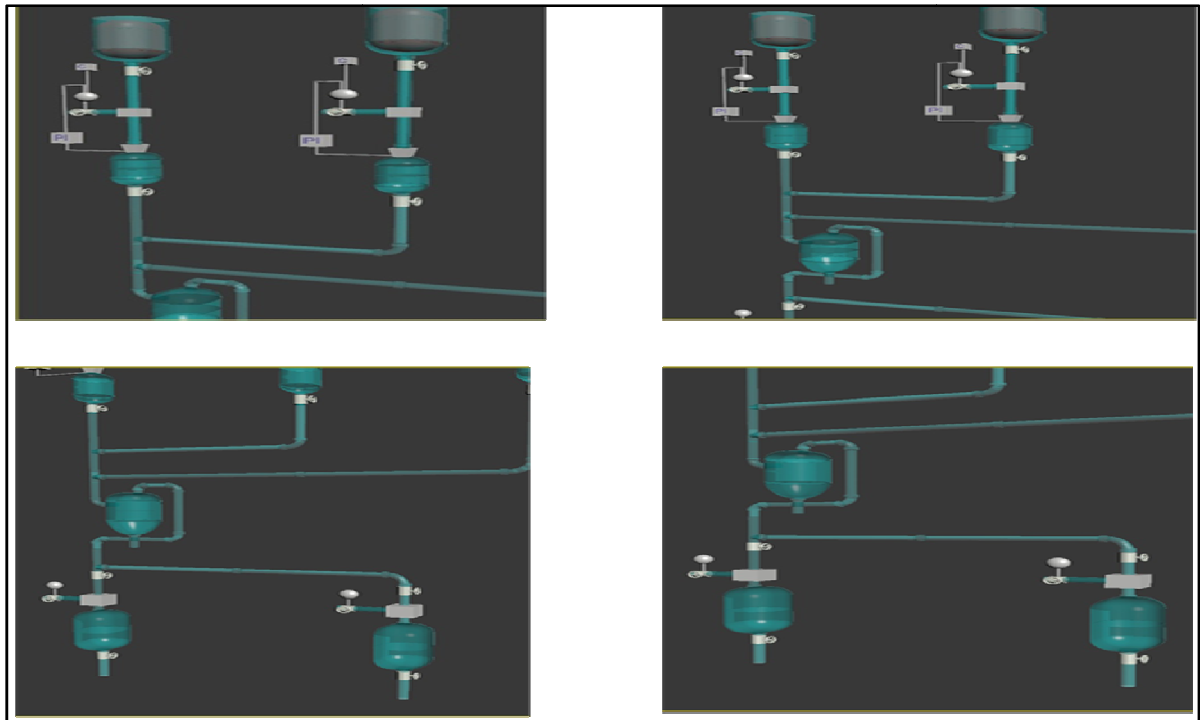


Figure 16 : Visualisation virtuelle en 3D

9. CONCLUSION

Notre travail a pour objectif de prévoir le fonctionnement de l'automatisme lors de la production du ciment en utilisant la technologie des poudres. On a fait appel à la robotique et à des logiciels pour simuler et virtualiser tout le système. Le dosage numérique a été mis en évidence à partir de ces techniques.

Grâce à la modélisation on a pu améliorer la performance des différents organes d'un système automatique par l'intermédiaire de la théorie de la boucle de retour. Les différents logiciels nous a permis de mettre en visualisation notre procédé dans le temps.

Dans notre recherche les théories des algèbres, les principes de l'automatisme et les théories des fluides sont nos principaux atouts dans l'étude de notre système.

L'utilisation de nouveaux logiciels plus performants reste bénéfique pour les industries des procédés de production. La simplification du modèle nous a permis aussi de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes.

L'étude approfondie de la poudre de ciment serait un sujet intéressant pour faciliter l'étude de la dispersion dans les conduites.

Références bibliographiques

CCI Formation (2013) : Catalogue des instrumentations en régulation

Schneider électrique industrie (2007) : Catalogue de plate-forme automatisme Modicon M340

Webographie

[http://pauillac.inria.fr/~lang/licence/Asservissement linéaire.pdf](http://pauillac.inria.fr/~lang/licence/Asservissement%20lin%C3%A9aire.pdf)

[www.automatisme, regulation.com](http://www.automatisme,regulation.com)

[www.automatisme et robotique.pdf](http://www.automatisme-et-robotique.pdf)

[www.presentation de logiciel de simulation.pdf](http://www.presentation-de-logiciel-de-simulation.pdf)

www.schneider-electric.com