

Modélisation et simulation du comportement de l'écoulement de la pulpe de phosphate à travers le pipeline

Modeling and simulation of the flow behavior of the phosphate slurry through the pipeline

Hamza BELBSIR¹, Khalil EL-HAMI¹, Aziz SOUFI²

¹ Université Hassan 1er, Faculté Polydisciplinaire de Khouribga, Laboratoire des Nanosciences et Modélisations, Khouribga, Maroc, belbssirhamza@gmail.com, khalil.elhami@uhp.ac.ma

² Université Hassan 1er, ENSA de Khouribga, Laboratoire des Nanosciences et Modélisations, Khouribga, Maroc, az_sfi@yahoo.fr

RÉSUMÉ. Le pipeline était essentiellement perçu comme un moyen de transport de différents matériaux. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'écoulement de la pulpe de phosphate dans le pipeline liant le pôle mine de Khouribga (Maroc) et la plateforme industrielle d'Eljorf-lasfar à El Jadida (Maroc). Nous avons effectué une modélisation mathématique sur un nombre de paramètres influençant le processus de conduite de phosphate à travers le pipeline. C'est ainsi, nous nous sommes intéressés à la modélisation sur les pertes de charges linéique ou régulière, le gradient hydraulique, le facteur de frottement, la rugosité de la conduite et la mécanique de fluide de la pulpe de phosphate. Le résultat est regroupé dans un programme sur Matlab qui peut nous fournir la pression dans n'importe quel point du pipeline et le comportement des pertes de charge. Ce programme nous permet, en plus, un tracé géographique suivi par la conduite et le comportement de la ligne piézométrique le long du pipeline.

ABSTRACT. The pipeline was primarily perceived as a means of transporting different materials. In this study, we looked at the flow of phosphate pulp in the pipeline linking the Khouribga mine pole (Morocco) and the Eljorf-Lasfar industrial platform in El Jadida (Morocco). We carried out a mathematical modeling on a number of parameters influencing the process of conducting phosphate through the pipeline. In this way, we have been interested in modeling the linear or regular load losses, the hydraulic gradient, the friction factor, the roughness of the pipe and the fluid mechanics of the phosphate pulp. The result is grouped into a program on Matlab that can provide us with the pressure in any point of the pipeline and the behavior of the pressure drops. In addition, this program allows us to follow a geographical route followed by the behavior and behavior of the piezometric line along the pipeline.

MOTS-CLÉS. Modélisation, Simulation, pipeline, pertes de charge, profil géographique, pression.

KEYWORDS. Modeling, simulation, pipeline, load losses, geographic profile, pressure.

1. Introduction

Le mode de transport de pulpe de phosphate via le pipeline de Khouribga à Jorf lasfar rentre dans le cadre des axes stratégiques du groupe OCP qui vise l'optimisation sur les coûts de transport et l'augmentation de la capacité de production. Ce mode de transport de pulpe dépend essentiellement des deux contraintes suivantes : Le profil géographique du tracé (Khouribga- Jorf), et les propriétés physiques de la pulpe de phosphate. Le projet «Slurry pipeline» est constitué d'une conduite principale de **187 km** de longueur et de **90 cm** de diamètre, liant la station de tête (station de pompage) à la station terminale, et de 4 pipelines secondaires alimentant la station de tête en pulpe à partir des laveries de phosphates [1-3]. Le fluide étudié est sous forme d'une pulpe de phosphate, qui est un mélange entre des grains très fins de phosphate et de l'eau, le mélange est constitué de **60%** en phosphate et de **40%** en eau. Dans cette étude nous considérons que la pulpe de phosphate se comporte comme un fluide homogène caractérisé d'une certaine masse volumique ρ et d'une certaine viscosité μ ,

le régime d'écoulement de la pulpe est toujours turbulent pour éviter la sédimentation des granules solide vers le bas de la conduite.

L'objectif principal de l'étude contenue dans cet article est d'établir un modèle théorique qui simule le fonctionnement des paramètres de marche du pipeline, on se base dans cette étude sur des interpolations linéaires pour modéliser le profil géographique du pipeline, afin d'avoir une fonction $Z(x)$ qui gère le comportement du profil géographique, et on se base aussi sur les formules de 'Darcy' et 'Swamee and Jain' [4-7] pour modéliser les pertes de charges linéique afin d'avoir une fonction $H(x)$ qui gère les pertes de charges et le comportement de la ligne piézométrique durant l'écoulement.

Nous adoptons aussi une approche expérimentale pour comparer les résultats réels avec les résultats générés par le modèle théorique. Nous débutons d'abord par l'approche expérimentale pour décrire les composantes de l'installation pipeline et pour mentionner des valeurs expérimentales de pression et de gradient hydraulique dans le pipeline.

2. Approche expérimentale

2.1. Description de l'installation

2.1.1. L'installation hydraulique

Un système type de pipeline est composé de cuve, conduite d'aspiration avec vanne, pompe, conduite d'évacuation, cuve.

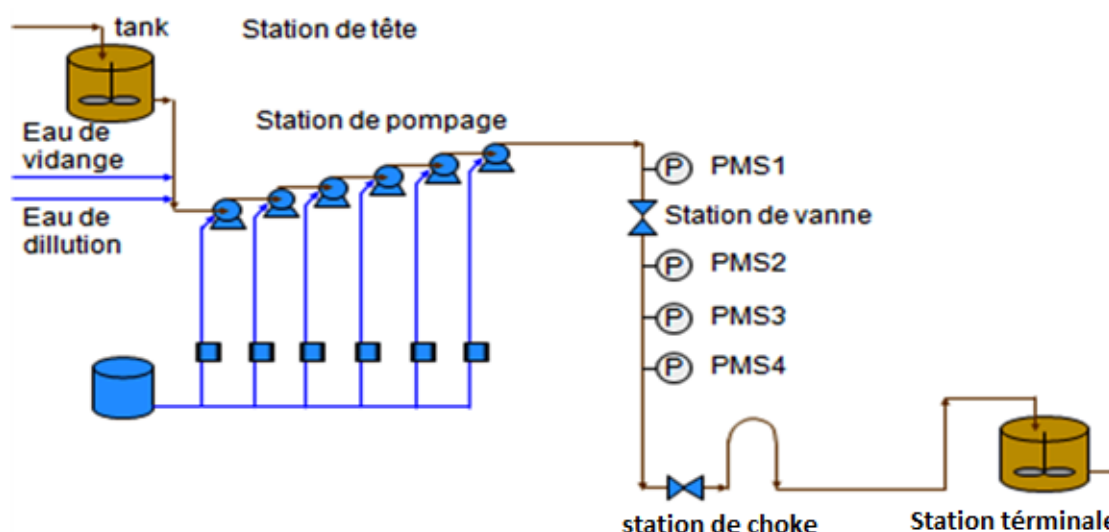


Figure 1. Schéma synoptique de l'installation hydraulique pipeline

La station de tête ou station de départ se compose de 4 réservoirs de stockage de pulpe et d'une station de pompage, cette station de pompage est dotée de 6 pompes centrifuges montées en série, pour augmenter la pression et garder le même débit. La station terminale est composée de 8 réservoirs de stockage de pulpe et d'une station d'étranglement (station de choke), le rôle de la station d'étranglement est de freiner le pipeline de son extrémité pour ajuster la pression et le débit, à cause de cet étranglement la charge hydraulique augmente dans la conduite.

Au long du trajet sont installées des stations de mesure et de contrôle de pression (pressure monitoring station), se sont les (PMS) marqué sur la figure (1). La PMS1 est située à 46 km de la station de tête, la PMS2 est située à 101 km de la station de tête.

La PMS3 est située à 129 km de la station de tête, la PMS4 est située à 161 km de la station de tête. Pour la station des vannes cette station est située à 68 km de la station de tête, elle contient aussi des capteurs de mesure de pression.

2.1.2. Le tracé géographique (profile du pipeline)

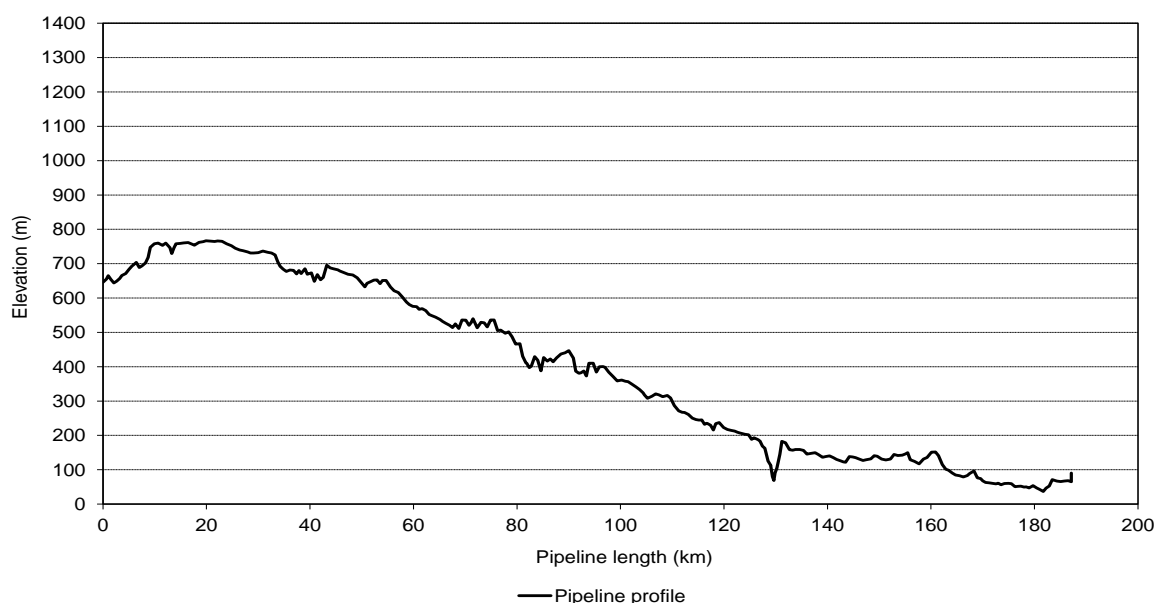


Figure 2. Tracé géographique Khouribga-JorfLasfar

Le tracé géographique est le trajet du pipeline en tenant compte de la hauteur par rapport au niveau de la mer. Le tracé géographique représente le profil du pipeline, il lie la station de tête à la station terminale.

La hauteur de la station de tête (Khouribga) par rapport au niveau de la mer est **645m**.

La hauteur de la station terminale (jorf-lasfar) par rapport au niveau de la mer est **66m**.

Le tracé géographique présente le profil du pipeline sur les 187 Km (altitude en fonction de la distance).

La station de tête est sur le point ($x=0$), et la station terminale est sur le point ($x= 187$ km).

Nous remarquons bien qu'il s'agit d'une pente entre la station de tête et la station terminale, donc l'énergie requise pour le pompage est optimisée par la gravité.

2.2. Mesure des paramètres de marche et des propriétés physique de la pulpe

La station de tête contient un laboratoire interne qui a pour but de mesurer la viscosité plastique de la pulpe ; et d'analyser la granulométrie des particules contenues dans le mélange (eau-phosphate), le diamètre des granulats de phosphate est toujours inférieur à **250 μ m**, concernant la mesure de la masse volumique de la pulpe le pipeline est équipé d'un capteur à rayon gamma, ce capteur est permanent, il nous délivre la valeur de la masse volumique de la pulpe à chaque instant. La mesure du débit dans le pipeline s'effectue à travers un débitmètre ultrasonique, et la mesure de pression à travers des capteurs ABB2600T. Ces capteurs de pression et de débit sont contenus dans tout les (PMS) que nous avons cité précédemment.

Mesure de débit



Débitmètre SONAR Trac

Mesure de Pression



Transmetteurs de pression ABB 2600T

Figure 3. Instruments de mesure

Tous ces instruments sont liés à un système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA), qui affiche à la salle de contrôle le comportement général du procédé de transport via pipeline. Cela permet aux opérateurs de suivre, et de contrôler les paramètres de marche. Les valeurs mesurées par tous les instruments de métrologie que nous avons déjà cités s'affichent sur une interface dans la salle de contrôle.



Figure 4. Système de supervision réel (SCADA)

Les informations contenues dans cette capture d'écran figure (4) sont les pressions dans toutes les (PMS) en bar, le débit de l'écoulement en m^3/h , la charge hydraulique ou (hauteur manométrique) de sortie de la station de tête, et le tracé de la ligne piézométrique (comportement des pertes de charge), c'est la ligne en bleu foncé.

Nous remarquons bien sur la figure (4) qu'une partie du pipeline est coloré en orange et les deux autres parties sont coloré en bleu ciel, la partie coloré en orange est la partie remplie en pulpe pour les autres parties sont remplies en eau, on pousse la partie remplie en pulpe avec l'eau (effet piston) jusqu'à la station terminale, c'est le cas pour la figure (4). On appelle le tronçon de pulpe : un **batch**.

Nous remarquons aussi que le comportement de la ligne piézométrique pour la partie remplie en pulpe n'est pas le même pour les parties remplies d'eau, ce qui est normal car les pertes de charge dépendent des propriétés physiques du fluide.

Les valeurs de pression détectée pour le cas de la figure (4) sont présentées dans le tableau suivant :

	Station de tête	PMS 1	Station des vannes	PMS 2	PMS 3	PMS 4	Station terminale
Pression (en bar)	27,89	11,07	22,11	32,51	49,92	37,60	38,85

Tableau 1. Les valeurs de pression détectées par les diverses stations de mesure de pression

Cet essai a été fait pour un débit de marche de 4000 m³ /h et une densité pulpe $\rho = 1600$ Kg/m³ et une viscosité plastique de pulpe $\mu = 0.0102$ Pa.s.

La viscosité plastique de la pulpe varie dans un intervalle design entre 0.006 Pa.s et 0.0102 Pa.s.

Le gradient hydraulique de l'écoulement pour la partie rempli en pulpe est :

J= 0.0038 mètre/mètre du pipeline.

Dans toute cette étude on s'intéresse qu'au gradient hydraulique de la partie rempli en pulpe.

3. Approche théorique

3.1. Modélisation du profil géographique du pipeline

Le profil livré par le constructeur n'est pas continu, il ne contient pas tous les points du trajet entre la station de tête et la station terminale. Il ne contient que les coordonnées de 303 points appartenant au trajet. Ce profil est discrétisé (non continu).

Ce profil est donné sous forme d'un tableau qui contient 303 points :

Point	Distance	Elevation
	(m)	(m)
1	0,0	645,8
2	428,5	651,5
3	1094,7	656,7
4	1782,3	649,0
5	2354,1	643,6
↓	↓	↓
302	187252,3	66,4
303	187252,3	93,2

Tableau 2. Coordonnées des 303 points appartenant au profil du pipeline

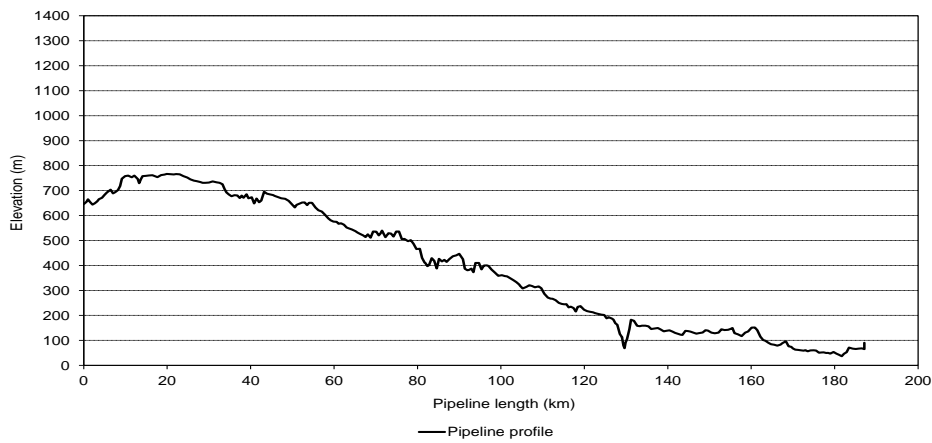


Figure 5. Profil géographique du pipeline

Pour avoir un profil de pipeline continu on va procéder à une méthode d'interpolation entre les points donnés dans le tableau (2), cette méthode consiste à établir des fonctions linéaires de forme $Z(x) = ax + b$ entre chaque point et le point qui le suit.

Le **a** et le **b** se déterminent à partir des coordonnées des points du tableau (2).

C'est-à-dire :

Entre le point **1** de coordonnées (0 ; 645.8) et le point **2** de coordonnées (428.5 ; 651.5) :

$$Z(x) = \left(\frac{651.5 - 645.8}{428.5 - 0} \right) x + 645.8 \quad \text{pour} \quad x \in [0 ; 428.5]$$

$$= (0,01330) x + 645.8$$

Entre 2 → 3 : $Z(x) = (0,00780) x + 648,1577$ pour $x \in [428.5 ; 1094.7]$

Entre 3 → 4 : $Z(x) = (-0,01119) x + 668,94186$ pour $x \in [1094.7 ; 1782.3]$

Entre 4 → 5 : $Z(x) = (-0,00944) x + 665,82208$ pour $x \in [1782.3 ; 2354.1]$



Entre 302 → 303 : $Z(x) = (-0.00099) x + 251,79802$ pour $x \in [186747.4 ; 187252.3]$

Maintenant le profil géographique est continue sur l'intervalle [0 ; 187252.3], et géré par la fonction $Z(x)$. La fonction $Z(x)$ est définie par morceaux sur l'intervalle [0 ; 187252.3].

(187252,3) est la longueur du pipeline en mètre.

3.2. Modélisation du comportement des pertes de charges

3.2.1. Cas de pompage continu en pulpe

La ligne piézométrique est la ligne décrivant les pertes de charges linéiques le long de la conduite, on va déterminer la fonction $H(x)$ qui gère cette ligne. Pour le pompage continu en pulpe la ligne piézométrique garde la même inclinaison le long de tout le pipeline. En général, pour les écoulements

turbulent, on détermine le facteur de frottement f à partir du diagramme de MOODY et de la formule de COLBROOK-WHITE, mais pour le cas où : ($10^{-6} < k/D < 10^{-2}$ et $5 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^8$), qui est notre cas ; nous avons utilisé l'équation "Swamee and Jain" [4-7]. Le coefficient de perte de charge J ou (gradient hydraulique) à partir de la formule de Darcy est :

$$J = \text{Avec } f = \frac{0.33125}{\left[\ln \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

f : le facteur de frottement (friction) ; V : la vitesse d'écoulement du fluide.

D : Le diamètre interne du pipeline ($D = 0.85$ m) ; g : accélération de la pesanteur ; k : La rugosité de la conduite.

Le facteur de friction f est lié au nombre de Reynolds Re et à la rugosité K par le rapport (k / D) comme indiqué par l'équation en haut. Le revêtement interne du pipeline est fait d'un matériau en plastique (**H.D.P.E**) ayant une rugosité $k=2 \times 10^{-5}$.

Pour un déplacement élémentaire sur le pipeline : $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{dH}{dx} = \frac{2 f V^2}{g D}$

Donc : $dH = \frac{2 f V^2}{g D} \times dx$; On intégrant cette formule : $\int dH = \int \frac{2 f V^2}{g D} .dx$ On va aboutir à : $H(x) = \left(\frac{2 f V^2}{g D} \right) x + cte$

Détermination de la constante d'intégration : à $x = 0$ $cte = H(x=0)$

$H(x=0)$ est la charge fournie par la station de pompage (h_i) + la charge due à l'étranglement (C) ; ($x=0$ est la position de la station de pompage).

Donc la fonction analytique qui gère la ligne piézométrique pour le cas de pompage continu en pulpe :

$$H(x) = \left(\frac{2 f V^2}{g D} \right) x + H(x = 0) \quad \forall x \in [0; 187252]$$

Pour ce cas le pompage est continu en pulpe (la pulpe remplit tout le pipeline).

3.2.2. Cas de batch

Pour le cas de batch le pompage n'est pas continu en pulpe, le batch ne couvre pas tout le pipeline, Il occupe une partie du pipeline et les autres parties sont occupées par l'eau pour garder la continuité dans le pipeline, et poussé le batch vers la station terminale (effet piston). L'eau assure la séparation entre les différents volumes de pulpe dans le cas de plusieurs batch.

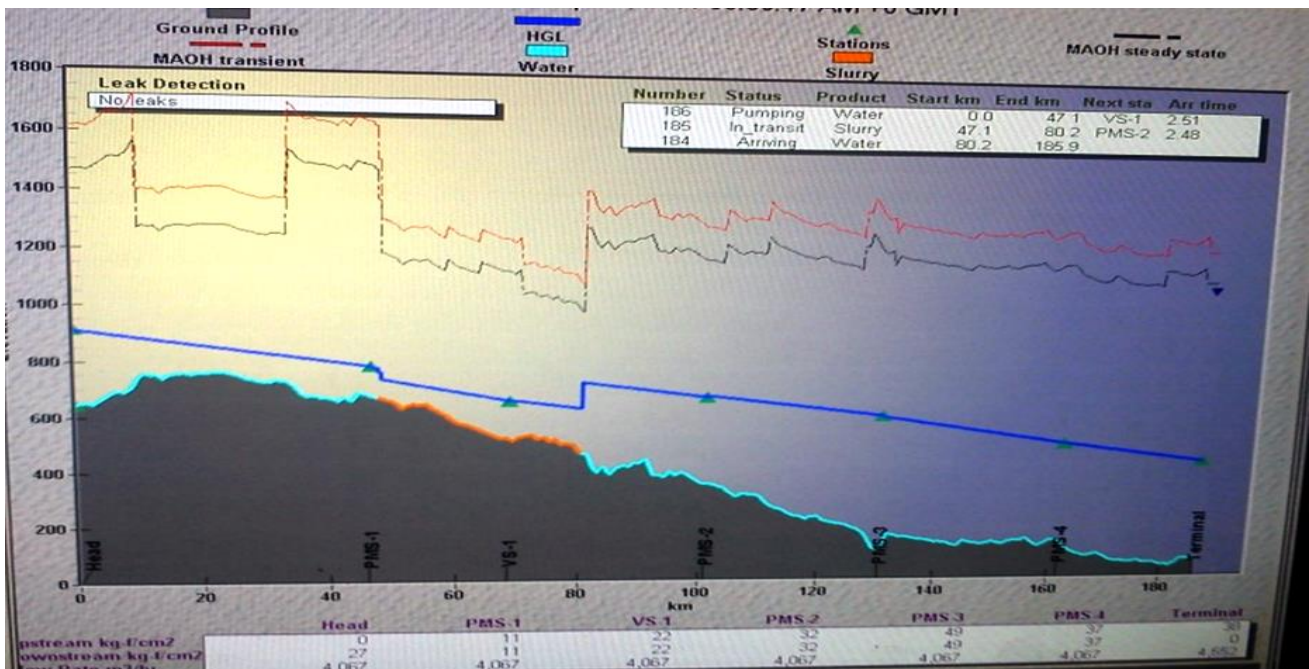


Figure 6. Fonctionnement en batch

Pour ce cas nous avons deux types de fonctions qui gèrent la ligne piézométrique, fonction pour la partie rempli par la pulpe et fonction pour les parties remplies d'eau. La position sur le pipeline de la queue du batch est (i) et la position de sa tête est (j).

$$j > i \text{ et } (i ; j) \in [0 ; 187252]^2$$

Le comportement de la ligne piézométrique le long du pipeline pour ce cas est géré de cette façon : Pour $x \in [0 ; i]$: $H(x) = \left(\frac{2 f'' v^2}{g D} \right) x + H(x = 0)$ (f'' est le facteur de frottement pour l'eau)

$$\text{Pour } x \in [i ; j] : H(x) = \left(\frac{2 f v^2}{g D} \right) x + H(x = 0) \text{ (f est le facteur de frottement pour la pulpe)}$$

$$\text{Pour } x \in [j ; 187252] : H(x) = \left(\frac{2 f'' v^2}{g D} \right) x + H(x = 0)$$

Le facteur de frottement f dépend de la densité ρ et de la viscosité μ du fluide, pour cela la ligne piézométrique pour l'écoulement d'eau n'a pas le même comportement que pour l'écoulement de la pulpe.

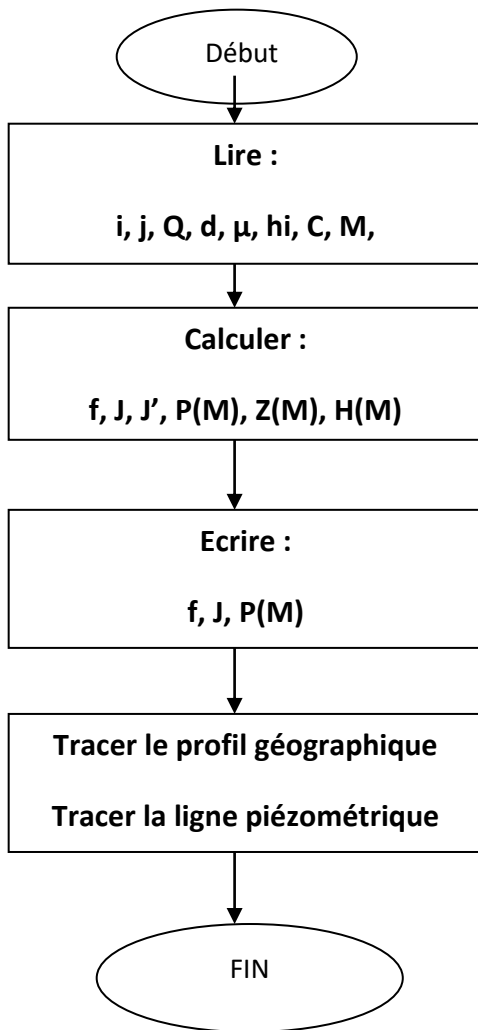
3.3. Conception du programme sur Matlab

Nous avons élaboré des fonctions pour modéliser le comportement du tracé géographique (profil du pipeline), et pour modéliser les pertes de charges (ligne piézométrique) le long du pipeline, soit pour le cas de pompage continu en pulpe soit pour le cas de batch. Et ce dans la finalité d'avoir un programme sur Matlab qui fournit la valeur de la pression dans tout point du pipeline, pour des conditions de marche donné. Condition de marche : (débit, viscosité, densité, charge de sortie station de pompage, ...). Dans la conception du programme, on se base sur la fonction $Z(x)$ qui caractérise le comportement du profil du pipeline, et sur la fonction $H(x)$ qui caractérise les pertes de charge hydrauliques le long du pipeline (ligne piézométrique), ce sont les fonctions obtenues dans les paragraphes précédents, et nous baserons aussi sur la méthode de calcul de pression dans un point (M) appartenant au pipeline :

$$P(M) = [H(M) - Z(M)] \times \rho g \text{ (théorème de Bernoulli)}$$

ρ : densité du fluide ; g : accélération de la pesanteur ; $P(M)$: la pression dans le point (M), $H(M)$: La charge dans le point (M), $Z(M)$: la hauteur de (M) par rapport au niveau de la mer.

Le programme se résume dans l'algorithme suivant :



i : la position de la queue du batch ; j : la position de sa tête

Q : le débit de l'écoulement ; d : la densité de la pulpe

μ : la viscosité de la pulpe ; hi : la charge hydraulique de sorties station de tête, C : la charge due à l'étranglement.

M : le point à pression inconnue.

$Z(M)$: l'altitude du point (M).

$H(M)$: La charge dans le point (M).

f : Le facteur de frottement pour la pulpe.

J : Le gradient hydraulique pour la pulpe.

J' : Le gradient hydraulique pour l'eau.

$P(M)$: La pression dans le point (M) choisie.

Les fonctions $Z(x)$ et $H(x)$ sont incluses dans le programme

Figure 7. Structure de l'algorithme du programme

4. Résultats et discussion

4.1. Comparaison des résultats du programme avec les résultats réels

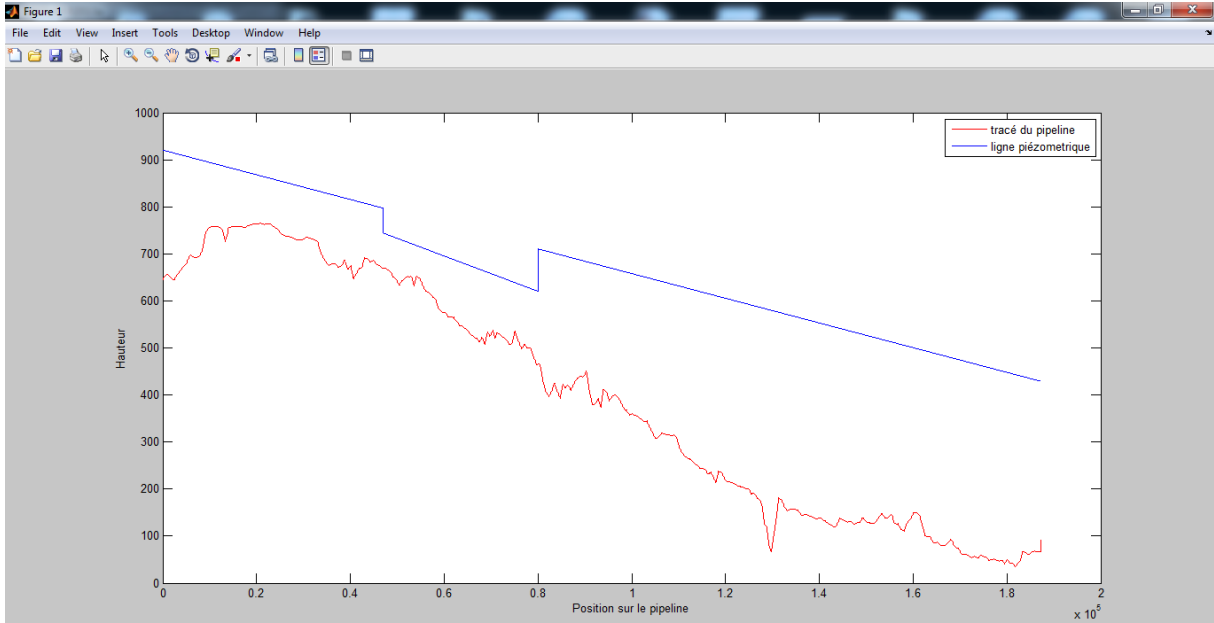


Figure 7. Le tracé du profil géographique et de la ligne piézométrique délivré par le programme

Le tracé affiché par le programme est similaire au tracé affiché sur le système de supervision réel dans la salle de contrôle, la différence entre les deux tracés est que le premier (figure 7) est basé sur des calculs théoriques, et le deuxième (figure 8) est basé sur des mesures expérimentales. Les conditions de marches pour ce cas sont : la position de la queue du batch (en km) : 47 ; La position de la tête du batch (en km) : 80, le débit (en m³/h) : 4000 ; La densité de pulpe (en Kg/m³) : 1600, la viscosité plastique de pulpe (en Pa.s) : 0.0102 ; La charge hydraulique à la sortie station de tête (en mètre) : 240 ; La charge hydraulique causée par l'étranglement (en mètre) : 35.



Figure 8. Le tracé délivré par le système de supervision réel

Nous avons effectué une succession d'expériences, pour comparer les résultats réels avec les résultats théoriques donnés par le programme. Ces essais consistent à comparer les valeurs des pressions données par les (PMS) avec celles données par notre modèle sur Matlab.

Le tableau suivant représente le résultat de l'essai le plus proche à la réalité, les valeurs réelles des pressions marquées sur ce tableau sont les valeurs déjà citées dans le paragraphe (approche expérimentale).

	Station de tête	PMS 1	Station des vannes	PMS 2	PMS 3	PMS 4	Station terminale
Résultats réels (en bar)	27,89	11,07	22,11	32,51	49,92	37,60	38,85
Résultats théoriques du programme (en bar)	27,18	12,47	22,63	33,11	51,23	37,33	39,41

Tableau 3. Comparaison des résultats réels et des résultats délivrés par notre modèle

Dans cet essai la position de la queue du batch a été dans le kilomètre 47 et sa tête dans le kilomètre 80. Cet essai a été fait pour un débit de marche de 4000 m³/h et une densité pulpe $\rho = 1600$ Kg/m³ et une viscosité plastique de pulpe $\mu = 0.0102$ Pa.s. Le gradient hydraulique pour l'écoulement de la pulpe dans cette simulation est $J = 0.0038$ mètre/mètre du pipeline, c'est le même gradient obtenu expérimentalement.

Nous remarquons bien l'accord approximatif des résultats réels avec les résultats théorique, c'est ce qui valide et valorise notre modèle théorique.

4.2. Simulation à travers notre modèle théorique

Dans le paragraphe (4.1.) nous avons prouvé la validité de notre modèle, et à quel niveau les résultats du modèle sont en accord avec les résultats expérimentaux. C'est ce qui nous a encouragé d'effectuer des simulations à travers notre programme, pour savoir l'influence de certains paramètres de marche sur le comportement du procédés.

Cette simulation consiste à fixer tout les paramètres, et de varier un entre eux pour savoir son impact sur les pressions et sur les pertes de charge.

Ces paramètres sont : (le débit découlement, la densité de la pulpe, la viscosité de la pulpe, et la charge hydraulique qu'associe l'étranglement au pipeline).

4.2.1. Influence du débit d'écoulement

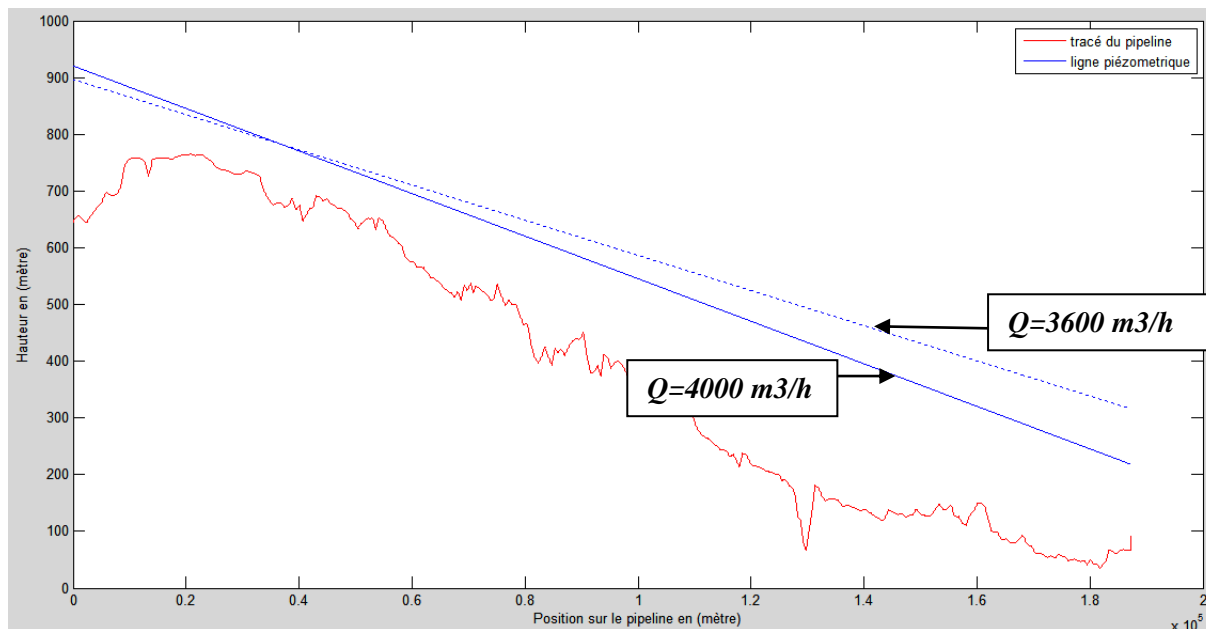


Figure 9. lignes piézométriques pour les débits $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ et $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le pompage continu en pulpe

Concernant le pompage continu en pulpe, Pour le cas où le débit est de $4000 \text{ m}^3/\text{h}$, la ligne piézométrique est plus inclinée en bas que le cas où le débit est de $3600 \text{ m}^3/\text{h}$, donc les pertes de charge pour ($Q= 4000 \text{ m}^3/\text{h}$) sont plus importantes que pour ($Q=3600 \text{ m}^3/\text{h}$). Alors on peut conclure que plus le débit de marche augmente plus les pertes de charge augmentent aussi. Les gradients hydrauliques qu'affiche notre programme sont $J=0.0038 \text{ m/m}$ pour ($Q= 4000 \text{ m}^3/\text{h}$) et $J=0.0031 \text{ m/m}$ pour ($Q=3600 \text{ m}^3/\text{h}$).

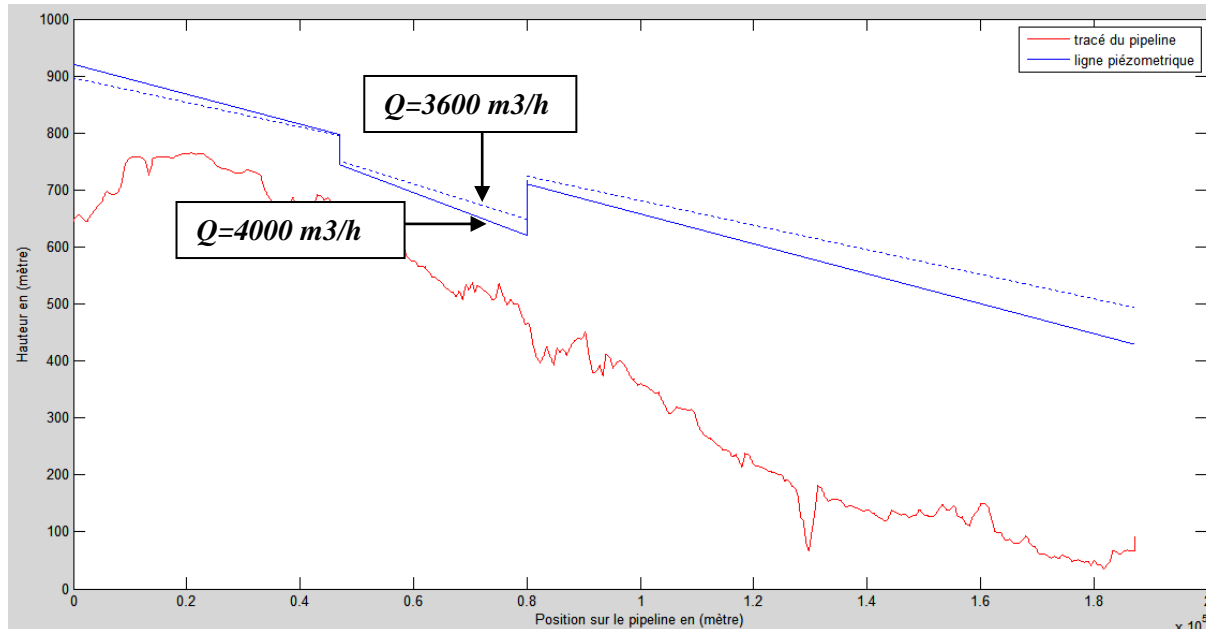


Figure 10. La ligne piézométrique pour les débits $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ et $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le cas de batch

Le débit d'écoulement a les mêmes influences citées en haut pour le cas de batch.

4.2.2. Influence de la densité de la pulpe

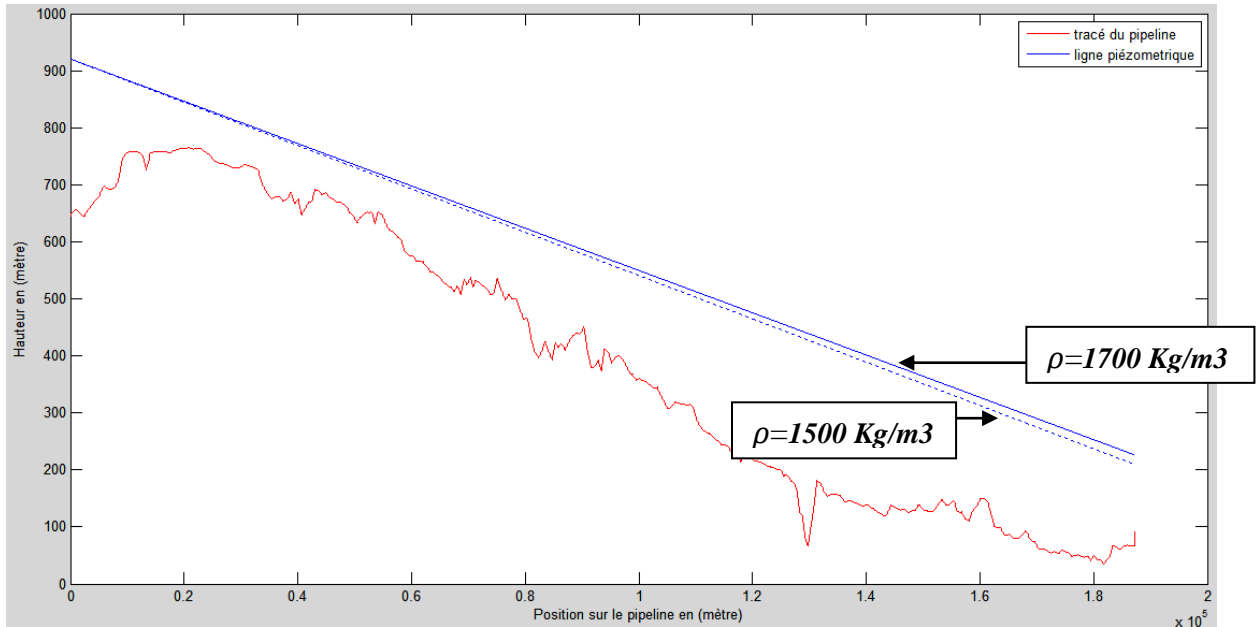


Figure 11. Lignes piézométriques pour les densités 1700 Kg/m3 et 1500 Kg/m3 pour le pompage continu en pulpe

Concernant le pompage continu en pulpe, Pour le cas où la densité pulpe est de $\rho=1500 \text{ Kg/m}^3$, la ligne piézométrique est plus inclinée en bas que le cas où la densité pulpe est de $\rho=1700 \text{ Kg/m}^3$, donc les pertes de charge pour ($\rho=1500 \text{ Kg/m}^3$) sont plus importantes que pour ($\rho=1700 \text{ Kg/m}^3$). La viscosité de pulpe est supposée constante entre les deux cas. Mais en général nous remarquons à partir des courbes que la densité de pulpe n'a pas d'influence importante sur le comportement des pertes de charge. Les gradients hydraulique qu'affichent notre programme sont $J=0.0037 \text{ m/m}$ pour ($\rho=1500 \text{ Kg/m}^3$) et $J=0.0038 \text{ m/m}$ pour ($\rho=1700 \text{ Kg/m}^3$). La densité de pulpe a les mêmes influences sur le cas de batch.

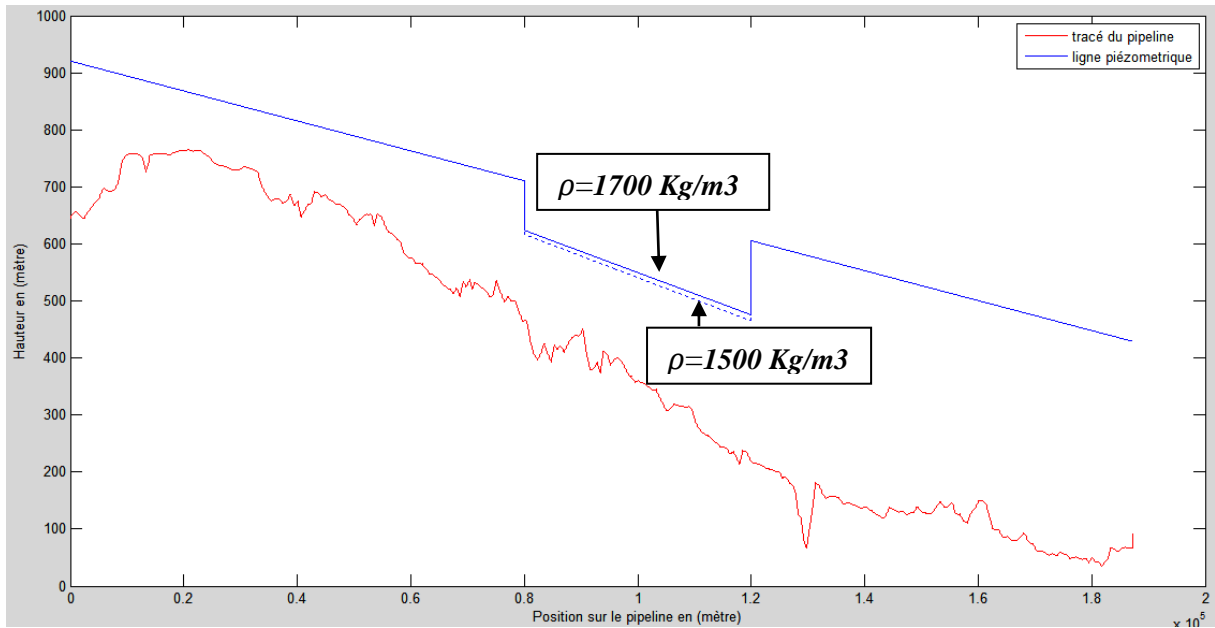


Figure 12. Lignes piézométriques pour les densités 1700 Kg/m3 et 1500 Kg/m3 pour le cas de batch

4.2.3. Influence de la viscosité plastique de la pulpe



Figure 13. Lignes piézométriques pour les viscosités 0.010 Pa.s et 0.020 Pa.s pour le pompage continu en pulpe

Concernant le pompage continu en pulpe, Pour le cas où la viscosité de pulpe est de $\mu=0.020$ Pa.s, la ligne piézométrique est plus inclinée en bas que le cas où la viscosité pulpe est ($\mu=0.010$ Pa.s), donc les pertes de charge pour ($\mu=0.020$ Pa.s) sont plus importantes que pour ($\mu=0.010$ Pa.s). Alors on peut conclure que plus la viscosité de pulpe augmente plus les pertes de charge augmentent. Les gradients hydraulique qu'affichent notre programme sont $J=0.0034$ m/m pour ($\mu=0.010$ Pa.s) et $J=0.0039$ m/m pour ($\mu=0.020$ Pa.s). la densité de pulpe est supposée constante entre les deux cas.

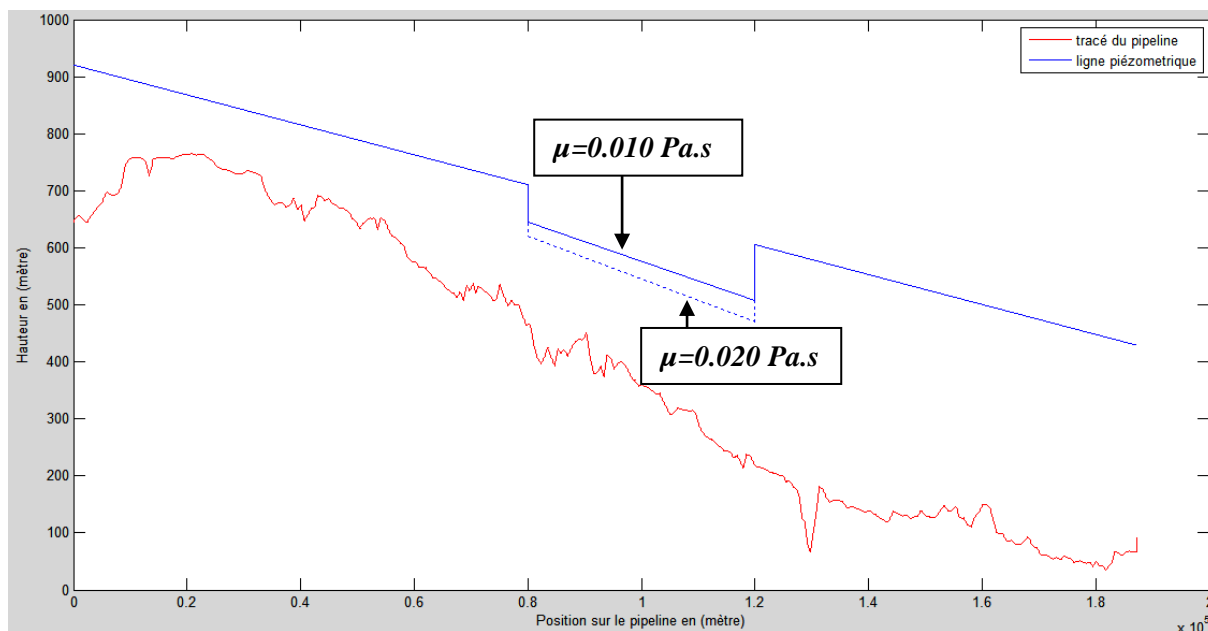


Figure 14. Lignes piézométriques pour les viscosités 0.010 Pa.s et 0.020 Pa.s pour le cas de batch

La viscosité a les mêmes influences citées en haut pour le cas de batch.

4.2.4. Influence de la charge hydraulique causée par l'étranglement

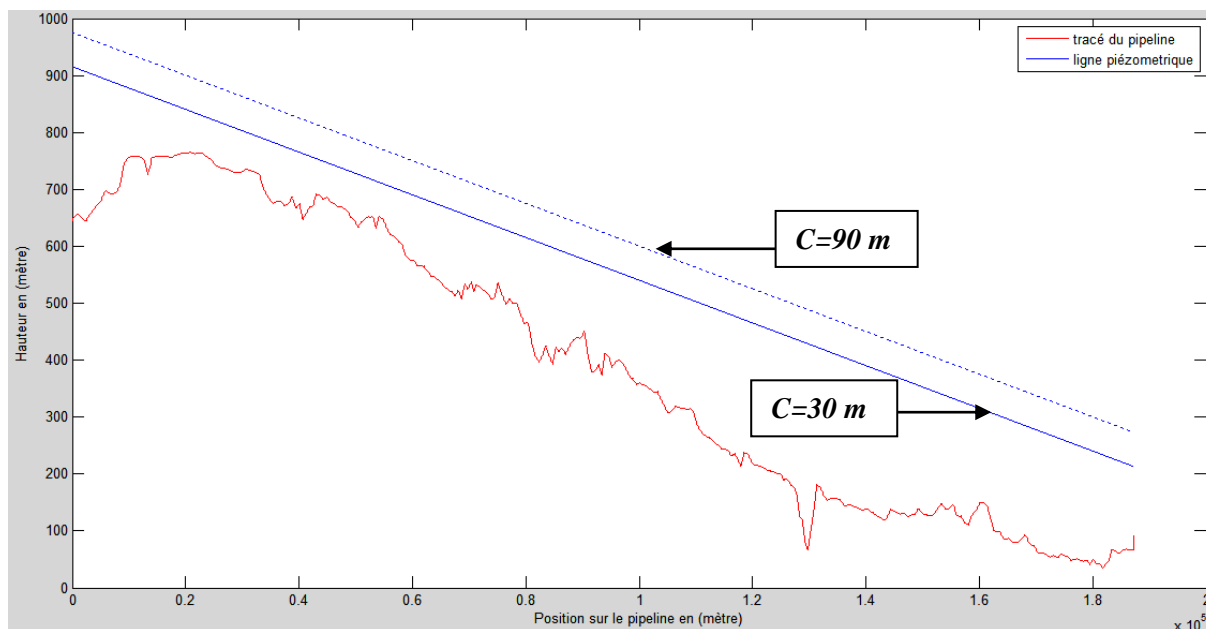


Figure 15. Lignes piézométriques pour l'étranglement à 30 m et 90 m pour le pompage continu en pulpe

Concernant le pompage continu en pulpe, Pour le cas où la charge hydraulique due à l'étranglement est de $C=30\text{ m}$, la ligne piézométrique garde la même inclinaison que le cas où $C=90\text{ m}$, donc l'étranglement n'a pas d'influence sur les pertes de charges. Plus on augmente le niveau d'étranglement plus la ligne piézométrique se translate en haut sans changer d'inclinaison. On peut conclure que l'étranglement augmente la charge hydraulique dans le pipeline sans influencer les pertes de charge.

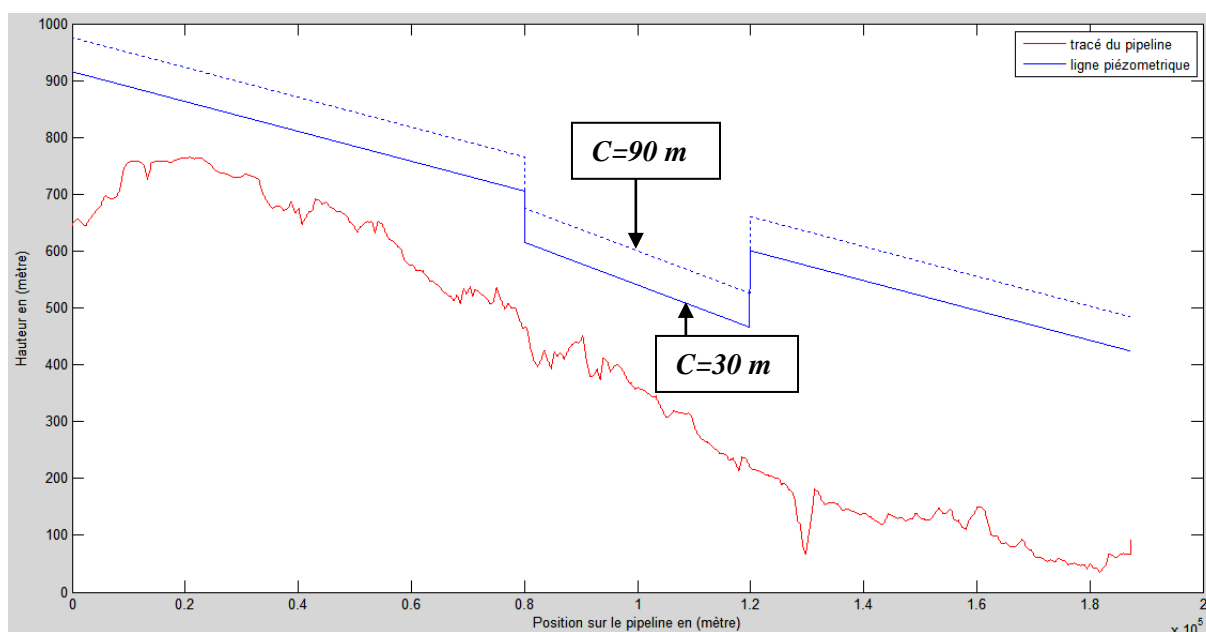


Figure 16. Lignes piézométriques pour l'étranglement à 30 m et 90 m pour le cas de batch

Pour le cas de batch l'étranglement a les mêmes influences citées en haut.

5. Conclusion

Une modélisation mathématique sur un nombre de paramètres influençant le processus de conduite de phosphate à travers le pipeline était réalisée. C'est ainsi, les pertes de charges linéiques ou régulières, le gradient hydraulique, le facteur de frottement, la rugosité de la conduite et le profil géographique. Le résultat était regroupé dans un programme sur Matlab, Cela nous a permis de bien comprendre le fonctionnement du pipeline OCP et de savoir l'influence de certains paramètres sur la marche du procédé.

Remerciements

Nous tenons à remercier le groupe Office Chérifien de Phosphate (OCP) qui nous a ouvert ses portes de la station tête du pipeline (site Khouribga) et plus particulièrement Mlle. Houda BENTAHAR et Mr. Idir AIT HSSAINE.

Références

- [1] B.E.A. Jacobs "Design of Slurry Transport Systems" pp285-6(1991)
- [2] Baha Abulnaga"Slurry Systems Handbook" McGraw-Hill (2002)
- [3] Miedema, S.A., "Slurry Transport: Fundamentals, a Historical Overview and The Delft Head Loss & Limit Deposit Velocity" Edited by Robert C. Ramsdell (2016)
- [4] J. J. Gr a y. Johann Heinrich Lambert "mathematician and scientist "Hist. Math.,5, No 1, pp.1728-1777, (1978)
- [5] L. F. Moody. Friction factors for pipe flow. // Trans. ASME, 66, No 8, pp.671-684. (1944)
- [6] É. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, Ce que disent les fluides, Belin, (2005)
- [7] E. Saadjan, "Les bases de la mécanique des fluides et des transferts de chaleur et de masse pour l'ingénieur " Éditions Sapiientia (2009).