

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherche de Sciences de l'Eau

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Conception d'un module de calcul des pressions et des débits dans l'annulaire lors de la cimentation d'un puits de forage

HAMIDI Massilia / Rabia Maya Nesrine

Proposé par

Mr Athmane ABBAS (2Rigs)
Mr Rachid BOUTCHICHA (2Rigs)

Sous la direction de

Pr Saâdia BENMAMAR (ENP)
Mr Rachid BOUTCHICHA (2Rigs)

Présenté et soutenue publiquement le 29 Juin 2019

Composition du Jury :

Président	Mr Salah Eddine TACHI	Docteur	ENP
Promoteur	M ^{me} Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteur	Mr Rachid BOUTCHICHA	Directeur général	2Rigs
Examineur	Mr Salim BENZIADA	Docteur	ENP
Examineur	Mr Farouk MEZALI	Docteur	Université de Msila
Examineur	Mr Wissem KIRATI	Chercheur	KAUST

ENP 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherche de Sciences de l'Eau

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Conception d'un module de calcul des pressions et des débits dans l'annulaire lors de la cimentation d'un puits de forage

HAMIDI Massilia / Rabia Maya Nesrine

Proposé par

Mr Athmane ABBAS (2Rigs)

Mr Rachid BOUTCHICHA (2Rigs)

Sous la direction de

Pr Saâdia BENMAMAR (ENP)

Mr Rachid BOUTCHICHA (2Rigs)

Présenté et soutenue publiquement le 29 Juin 2019

Composition du Jury :

Président	Mr Salah Eddine TACHI	Docteur	ENP
Promoteur	M ^{me} Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteur	Mr Rachid BOUTCHICHA	Directeur général	2Rigs
Examineur	Mr Salim BENZIADA	Docteur	ENP
Examineur	Mr Farouk MEZALI	Docteur	Université de Msila
Examineur	Mr Wissem KIRATI	Chercheur	KAUST

Dédicace

A mes chers parents

Vous avez toujours été présents à mes côtés pour m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie.

En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour vous, recevez ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime.

A mes chers frères Mouloud, Amine et Salim

Vous n'avez cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études

Ma chère grand-mère maternelle

Que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que tu n'as cessé de formuler dans tes prières. Que Dieu te préserve santé et longue vie.

A la mémoire de mes grands-pères

Qui ont été toujours dans mon esprit et dans mon cœur, je vous dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.

A ma très chère binôme Maya

Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet, ont été d'une grande importance. J'ai passé de très agréables moments en réalisant ce travail, je n'aurai pas pu trouver mieux comme binôme.

A ma grande famille, mes tantes, mes oncles ainsi que mes cousins et cousines.

A tous mes amis, je cite en particulier Yacine

A tous ceux dont l'oubli du nom n'est pas celui du cœur.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je te dédie entièrement ce travail à toi qui m'as donné la vie,

Toi qui m'as montré le bonheur et consolé mes pleurs,

Toi qui as illuminé mes nuits et rassuré mes peurs,

Toi qui en me prenant dans tes bras apaisais mes douleurs,

Même si mon cœur s'est cicatrisé, sache que je ne t'ai jamais oublié car à travers mes pensées tu resteras toujours à mes côtés.

Aujourd'hui je vis sans toi l'un des événements le plus important de ma vie, et on m'a donné la chance de remplir toute cette page par des dédicaces à des gens qui me sont chers, mais moi rien ne me ferait plus plaisir que d'imaginer à travers des mots comment cette journée se serait déroulée avec toi.

« Laisse-moi deviner que t'aurais été beaucoup plus stressée que moi, mais tu l'aurais caché sous ta douceur habituelle en me réveillant très tôt le matin pour éviter que je sois en retard, car tu sais très bien que je tarde beaucoup pour me préparer vue que je tiens ça de toi. Au final, nous aurions tardé toutes les deux car toi aussi t'aurais voulu te faire belle pour cette occasion. Avant de sortir nous nous serions regardées pour vérifier que tout allait bien à chacune d'entre nous et c'est là que t'aurais commencé à pleurer en te rendant compte à quel point j'avais grandi. Dans le chemin vers l'école l'ambiance aurait été calme à moins que toi et papa vous vous prendriez la tête pour un détail qui n'en vaudrait pas la peine comme à chaque fois. De temps en temps tu te serais retournée vers moi en me disant de ne pas m'inquiéter et que tout irait bien. Une fois arrivé, tu m'aurais laissé pour aller prendre en charge le reste des préparatifs, t'aurais accueilli tes invités avec une immense fierté et tu serais sûrement devenue amie avec la maman de ma binôme Massilia, je suis sûre que tu les aurais tellement appréciés. A l'instant où la présentation aurait commencé, nos regards se seraient croisés et tu m'aurais rassuré avec un grand sourire, t'aurais été attentive à mes moindre gestes et paroles que t'aurais sûrement connu par cœur vu que je les aurais répétés devant toi des dizaines de fois. A la fin t'aurais applaudi le plus fort possible et tu serais venue nous prendre toutes les deux dans tes bras en pleurant bien évidemment. Après avoir parlé avec tous mes professeurs, tu m'aurais obligé à prendre des photos avec toute la famille. A la fin tu serais revenue à la maison pour préparer le dîner vu que t'aurais sûrement invité toute la famille à manger et tu m'aurais dit de rentrer plus tôt pour t'aider. Quand tout le monde serait parti on se serait retrouver dans ma chambre pour discuter de tous les événements de la journée jusqu'à ce qu'à ce qu'on se serait endormie sans se rendre compte »

Maya

Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant et miséricordieux, nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés de loin ou de prêt lors de la réalisation de ce projet.

En premier lieu, nous remercions vivement les membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail.

Plus particulièrement, nous remercions notre professeur et encadrante Madame Benmamar Saâdia pour son écoute, son soutien, ces précieux conseils, directifs et les bonnes conditions de travail qu'elle nous a fournis tout au long de ce projet,

Un grand remerciement aussi à Monsieur Djouhra Mustapha Taha ingénieur en supplychain de nous avoir permis d'accéder à la majorité des livres et documents sur lesquels nous nous sommes basées lors de la réalisation de ce travail.

Au final nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Monsieur Boutchicha Rachid Directeur Général de 2RIGS, de nous avoir proposé ce sujet très intéressant et enrichissant, sur lequel nous avons pris un grand plaisir à travailler et à donner le meilleur de nous-mêmes. Nous le remercions également pour toutes les connaissances qu'il nous a transmises, pour sa confiance et pour nous avoir poussées à aller toujours plus loin avant et après notre projet.

Rabia Maya Nesrine

Hamidi Massilia

الهدف من هذا العمل هو تصميم برنامج محاكاة لحساب ضغط وتدفق الموائع خلال تدعيم ابار النفط بالإسمنت. تم تقسيم العمل الى جزئين. في المرحلة الأولى قمنا بتطبيق نموذج رياضي على تراكب مختلف الموائع المضخة داخل الانبوب والفراغ بين البئر والانبوب بعد القيام بعدة فرضيات. في المرحلة الثانية قمنا بإنشاء خوارزمية مثلى وترجمتها الى برنامج حساب باستعمال بايثون كلغة برمجة لحل جملة معادلات الموافقة للظاهرة الفيزيائية المذكورة سابقا. للتأكد من صحة نتائج البرنامج، قمنا بمقارنتها مع نتائج محاكاة برنامج المنشأ من طرف شركة شلومب .

ت المفتاحية: تدعيم بالإسمنت، الضغط، التدفق، بايثون.

Abstract

The purpose of this work was to design a simulation module to calculate pressures and flows during well cementing. Our work was divided into two parts, the first one was an adaptation of a mathematical model of mud circulation, spacers, cement slurries and mud displacing by applying the fundamentals of fluid mechanics: mass conservation and quantity of movement. The second part was devoted to digital programming using Python as a programming language in which we had developed an optimal algorithm to solve equations that were developed previously by a Euler approach (iterative method). To consolidate our results a comparison was carried out with the results obtained by the software CemCADE.

Key words: Cementing, pressure, flow, annulus, Python

Résumé

Le but de ce travail était de concevoir un module de simulation permettant le calcul des pressions et des débits pendant la cimentation d'un puits de forage. Notre travail a été divisé en deux parties, la première a consisté en une adaptation d'un modèle mathématique à une superposition de la boue de circulation, les spacers, les laitiers de ciment et la boue de chassage en mouvement, et cela en s'appuyant sur les fondamentaux de la mécanique des fluides : conservation de la masse et de la quantité de mouvement. La seconde partie a été consacrée à la conception du module de calcul des pressions et des débits dans l'annulaire lors de la cimentation d'un puits de forage en utilisant comme langage de programmation Python. La validation des résultats s'est faite après comparaison des résultats obtenus par simulation sur CemCADE.

Mots clés : Cimentation, pression, débit, python, annulaire.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Définitions

Liste des symboles

Introduction générale.....	14
1. Notions générales sur la cimentation	18
1.1 Introduction	18
1.2 Définition de la cimentation	18
1.3 Types de cimentation.....	18
1.3.1 Cimentation primaire.....	18
1.3.2 Cimentation squeeze.....	19
1.3.3 Pose de bouchon de ciment : Cimentation par pose de bouchon en trou ouvert, en cours du forage	19
1.4 Normalisation	19
1.5 Les différents fluides utilisés lors de la cimentation primaire.....	20
1.5.1 Boue de circulation.....	20
1.5.2 Fluide intermédiaire	20
1.5.3 Laitier de ciment.....	20
1.5.4 Boue de chassage	20
1.6 Classification des ciments	21
1.7 Additifs « Adjuvants ».....	21
1.8 Critères de choix du type de laitier	23
1.9 Méthodes de cimentation primaire	24
1.10 Equipements les plus utilisés dans la cimentation par tube ancré (<i>Nguyen, 1993</i>) ...	24
1.11 Préparation du laitier	26
1.12 Etapes de la cimentation primaire par tube ancré.....	26
1.13 Colonne perdue « Liner »	28
1.14 Problèmes issus d'une mauvaise cimentation	28
1.15 Conclusion.....	29
2. Propriétés de l'écoulement des fluides lors de la cimentation des puits de forage	31
2.1 Introduction	31
2.1.1 La rhéologie.....	31
2.1.2 Temps de pompabilité	36

Table des matières

2.1.3	Viscosité	36
2.1.4	Pression	36
2.1.5	Densité.....	37
2.1.6	Chaleur d'hydratation.....	38
2.1.7	Perméabilité.....	38
2.1.8	Température	38
2.2	Type d'écoulement dans un espace annulaire et dans un tube	39
2.2.1	Écoulement laminaire.....	39
2.2.2	Écoulement turbulent	40
2.2.3	Nombre de Reynolds	40
2.3	Les pertes de charge	41
2.4	Densité de circulation équivalente (ECD)	43
2.5	Conclusion	44
3.	Description du phénomène physique se produisant lors de la cimentation	46
3.1	Introduction	46
3.2	Organigramme du déroulement de la cimentation primaire	46
3.3	Cimentation	47
3.3.1	Tubage.....	47
3.3.2	Circulation de la boue	47
3.3.3	Pompage : fluides non miscibles.....	49
3.3.4	Perte de fluide.....	50
3.4	Paramètres affectant le déplacement	51
3.4.1	Effet de la densité.....	51
3.4.2	Effet de la viscosité	51
3.4.3	Phénomène de U-tube (chute libre).....	52
3.5	Temps de pompage.....	53
3.6	Conclusion	53
4.	Modélisation mathématique de l'écoulement d'un fluide dans un tube ou dans un annulaire.....	56
4.1	Introduction	56
4.2	Schéma de l'écoulement des fluides dans un tube ou dans un annulaire	56
4.3	Développement mathématique	58
4.3.1	Equation d'état	58
4.3.2	Equation de continuité.....	59
4.3.3	Equation de la conservation de la quantité de mouvement	63

Table des matières

4.4	Calcul des pertes de charge	65
4.5	Calcul des pressions dynamiques	65
4.6	Calcul de débit	66
4.7	Calcul du volume du laitier	66
4.7.1	Méthode de calcul manuelle.....	67
4.7.2	Méthode de calcul à partir d'un Caliper.....	70
4.8	Conclusion.....	71
5.	Elaboration du programme de résolution du modèle mathématique	73
5.1	Introduction	73
5.2	Modèle mathématique final	73
5.3	Langage de programmation	74
5.4	Module de simulation	75
5.5	Algorithme général	75
5.6	Fonctions principales du programme	76
5.6.1	Fonction de création de la géométrie	76
5.6.2	Fonction de calcul des volumes	76
5.6.3	Fonction de calcul des pressions statiques	77
5.6.4	Fonction de calcul des pressions dynamiques.....	78
5.7	Conclusion.....	80
6.	Simulation et résultats	82
6.1	Introduction	82
6.2	Simulation.....	82
6.3	Résultats et comparaison	83
6.4	Analyse :.....	89
6.5	Conclusion.....	90
	Conclusion générale et perspectives	91
	Références bibliographiques	92
	Annexe	94

Liste des tableaux

Tableau 1-1: classification des ciments selon la norme API (<i>Dwight, 1989</i>)	21
Tableau 2-1 : variation de la pression et des différentes températures avec la profondeur (<i>Dwight, 1989</i>)	39
Tableau 2-2 : les équations du nombre de Reynolds et leur valeur critique (<i>Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982</i>)	41
Tableau 2-3 : les expressions des pertes de charge (<i>Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982</i>)	42
Tableau 6-1 : données géométriques du puits et du tubage.....	82
Tableau 6-2 : données dynamiques et rhéologiques.....	83

Liste des figures

Figure 1-1 : processus de la cimentation	28
Figure 1-2 : représentation des différents problèmes rencontrés après la cimentation (<i>Nelson et al., 2006</i>)	29
Figure 2-1 : relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour un fluide Newtonien	32
Figure 2-2 : relation entre le gradient de frottement et le débit pour un fluide Newtonien	32
Figure 2-3 : Profil de vitesse d'un écoulement laminaire dans un tube ou dans un annulaire (<i>Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982</i>)	39
Figure 2-4 : écoulement turbulent dans un tube ou dans un annulaire (<i>Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982</i>).....	40
Figure 3-1 : Conséquences de l'excentricité sur le déplacement des fluides	47
Figure 3-2 : illustration du phénomène de la filtration.....	49
Figure 3-3 : pompage des différents fluides	50
Figure 3-4 : illustration du phénomène U-tube simplifié (<i>Bekken et Ullsfoss, 2017</i>).....	53
Figure 4-1 : schéma de l'élément de volume d'un fluide dans le tube.....	56
Figure 4-2 : schéma de l'élément de volume d'un fluide dans l'annulaire	57
Figure 4-3 : représentation des volumes dans le cas de la cimentation de la zone de surface .	67
Figure 4-4 : représentation des volumes dans le cas de la cimentation des autres zones.....	68
Figure 4-5 : représentation des volumes dans le cas de la cimentation avec deux types de laitier.....	69
Figure 4-6 : calliper à quatre bras.....	70
Figure 4-7 : Diagramme enregistré par un Caliper représentant la profondeur en fonction du diamètre (<i>Nelson et al., 2006</i>)	71
Figure 5-1 : logo du module Ce Ma	75
Figure 5-2 : fenêtre d'introduction des données géométriques	76
Figure 5-3 : fenêtre d'introduction des données hydrauliques	78
Figure 5-4 : fenêtre d'introduction des données dynamiques	79
Figure 6-1 : Tracé de la géométrie du puits du premier cas d'application.....	83
Figure 6-2 : Résultats du volume du laitier	84
Figure 6-3 : Pressions statiques selon Cema	84
Figure 6-4 : Pressions hydrostatiques selon CemCADE.....	85
Figure 6-5 : Débits selon Ce Ma	86
Figure 6-6 : Débits selon CemCADE.....	86
Figure 6-7 : Pressions selon Ce Ma.....	87
Figure 6-8 : Pressions dynamiques selon CemCADE.....	87
Figure 6-9 : Hauteurs des colonnes de fluides dans le tube en fonction du temps de pompage	88
Figure 6-10 : Hauteurs des colonnes de fluides dans l'annulaire en fonction du temps de pompage	88

Définitions

Cake de filtration (gâteau de filtration) : particules de boue solide déposées sur les parois du sondage par le fluide de forage

Densité du fluide (Specific gravity (SG)) : Proportion du poids d'un corps par poids d'un volume d'eau.

Déshydratation : C'est la perte d'eau du laitier ou du fluide de forage par le processus de filtration.

Gel : La suspension colloïdale dans un tel état que les contraintes de cisaillement en dessous d'une certaine valeur finie ne produisent pas la déformation permanente

Mud logging (diagraphie instantanée) : analyse des déblais présents dans les boues de forage et des différents paramètres liés à la boue

Bentonite : roche argileuse formée principalement de beidellite et montmorillonite, qui constitue le support colloïdal des boues à base d'eau

Perméabilité : c'est la propriété des espaces intérieurs d'une roche de communiquer entre eux, ce qui permet aux fluides qu'ils contiennent de se mouvoir à travers la roche en question.

Pompabilité : il s'agit d'une caractéristique physique d'un laitier, Un laitier est dit pompable lorsque le fluide s'écoule facilement et qu'il n'induit pas une perte de charge trop importante lorsqu'on le place dans la gaine du ciment.

Porosité : la porosité d'une roche est caractérisée par le volume des espaces inter granulaires des éléments constituants. Elle représente la fraction volumique occupée par l'eau et l'air dans une éprouvette du ciment pris.

Yield point : (seuil de cisaillement) : seuil de plasticité pour un corps solide, valeur de la sollicitation à partir de laquelle apparaissent des déformations permanentes

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
D_e :	Diamètre extérieur du tube	[in]
D_i :	Diamètre intérieur du tube	[in]
D_o :	Diamètre du trou	[in]
d_{hyd} :	Diamètre hydraulique	[in]
ECD:	Densité de circulation équivalente	[-]
f :	Coefficient de perte de charge	[-]
G :	Facteur de correction de la géométrie	[-]
g :	L'accélération gravitaire	[m/s ²]
K :	Consistance de l'écoulement	[-]
L :	Profondeur à un point donné	[m]
n :	Indice du comportement de l'écoulement	[-]
n_p :	Indice de comportement de l'écoulement de la loi de puissance	[-]
P :	Pression à un point donné	[Pa]
P_h :	Pression hydrostatique exercée par la colonne de fluide à une profondeur h	[Pa]
PV :	Viscosité plastique du fluide	[cP]
q :	Débit d'écoulement à travers une section transversale A	[m ³ /s]
r :	Rayon du tubage.	[in]
R :	Rayon du trou.	[in]
Re :	Nombre de Reynolds	[-]
Re_c :	Nombre de Reynolds critique	[-]
Re_g :	Nombre de Reynolds généralisé du modèle de Herschel-Bulkley unifié	[-]
T :	Température	[°C]
v :	Vitesse moyenne du fluide	[m/s]
V :	Volume du fluide	[m ³]

Liste des symboles

YP :	Seuil de cisaillement du fluide (Yield Point)	[lb/100 ft ²]
z :	Position de l'élément par rapport à l'axe OZ.	[m]
:	Coefficient d'excès du volume du laitier	[-]
x :	Contrainte de cisaillement	[Pa]
:	Excentricité du trou	[-]
:	Taux de cisaillement	[lb/100 ft ²]
y :	Limite de plasticité	[lb/100 ft ²]
d :	Masse volumique du fluide	[Kg/m ³]
μ :	Viscosité dynamique du fluide	[cP]
P :	Perte de charge	[Pa]
S :	Surface de la base de l'élément.	[in ²]
V :	Volume de l'élément.	[m ³]
μ _e :	Viscosité dynamique équivalente	[cP]
μ _p :	Viscosité plastique	[cP]

Liste des conversions

$$1 \text{ Psi} = 0.0689 \text{ Bar}$$

$$1 \text{ Psi} = 6895 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ feet} = 30.48 \text{ cm}$$

$$1 \text{ lb} = 0.454 \text{ Kg}$$

$$1^\circ \text{ F} = -17,22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$1\text{cP} = 0.001 \text{ Pa.s}$$

Introduction générale

L'économie de l'Algérie est basée principalement sur le secteur énergétique. Les hydrocarbures à eux seuls représentent 60 % des recettes du budget et 98 % des recettes d'exportation. D'après les statistiques fait par British Petroleum de l'année 2018, l'Algérie a été le 17^e producteur de pétrole avec une production de 65.3 Million de tonne de pétrole, et le 10^e producteur de gaz naturel au monde avec une production 92.3 milliard de mètre cube. Même si durant ces dernières années, l'état Algérien commence à envisager des solutions écologique et renouvelable, l'énergie fossile reste toujours sa priorité. Comptant déjà plus de dix mille puits, l'exploration et la recherche de nouveaux gisements sur le territoire Algérien fait toujours l'objet de préoccupation et d'étude de beaucoup d'entreprises nationales et multinationales.

Le forage d'un puit de pétrole ou de gaz coute environ dix millions de dollars, sa réussite à court et à long terme dépend principalement du succès de l'opération de la cimentation, c'est pour cela que la cimentation représente l'étape la plus importante et la plus critique du forage.

De nombreuses technologies existent afin d'éviter au maximum les risques d'échec de la cimentation et par conséquent des pertes importantes d'argent. Parmi eux, des logiciels ont été développés comme CemCADE et CEMPRO+, par des compagnies de services pétrolières dans le but d'obtenir principalement à partir d'une simulation, les pressions dynamiques, pressions hydrostatiques, les débits résultants de l'écoulement de différents fluides pompés dans le tube et l'espace annulaire créé entre ce dernier et le trou lors de la cimentation d'un puits de forage ainsi qu'une visualisation de l'effet U-tube. Les différentes courbes en fonction du temps ou de la profondeur obtenues permettent de vérifier si toutes les conditions de pression de pompage et de débits sont satisfaites pour éviter tout risque d'effondrement, d'éboulement ou autre.

En pratique, les décisions prises par les ingénieurs reposent exclusivement sur les résultats des simulations réalisées via ces logiciels. Même si la méthode de fonctionnement, les équations et le modèle de calcul de ces derniers leurs restent totalement inconnu. En plus de cela l'achat de ces logiciels étant exclusivement cher, les entreprises pétrolières nationales se doivent de recourir aux compagnies de service multinationales comme Schlumberger, Haliburton ou Baker Hughes afin d'obtenir ces résultats.

Le but de notre projet de fin d'étude est d'élaborer à partir d'un modèle mathématique régissant ces écoulements, un module qui répond aux objectifs principaux de ces logiciels afin de fournir à nos ingénieurs un outil de comparaison, de vérification et même de simulation. L'avantage principal de ce module est qu'il ne représente pas une boîte noire et pourra être disponible et utilisé en toute sérénité.

Même si différentes méthodes de cimentation existent, notre projet repose seulement sur l'une d'entre elles. Au cours de ce présent rapport nous allons tout d'abord expliquer en détail en

quoi consiste cette méthode et pourquoi nous l'avons choisi, Nous allons aussi présenter tous les paramètres hydrauliques, rhéologiques et dynamiques qui influencent l'écoulement des fluides dans l'annulaire et le tube lors de l'opération de la cimentation avant de décrire le phénomène physique engendrer par ce dernier. C'est à ce moment-là que nous pourrions passer à l'établissement du modèle mathématique régissant ce phénomène en exposant les équations de base utilisées et les différentes hypothèses émises pour faciliter leur résolution. Par la suite, nous exposerons le code de calcul, sa structure et ses principales fonctions. L'analyse des résultats simulés par le module obtenu et sa validation est faite par une comparaison aux résultats du logiciel CemCade mis à notre disposition. En conclusion nous proposerons de nombreuses idées qui peuvent être développées afin d'augmenter les fonctionnalités de notre module pour un produit final commercialisable.

Partie 1

Recherche bibliographique sur la cimentation

Chapitre 1

Notions générales sur la cimentation

1. Notions générales sur la cimentation

1.1 Introduction

La cimentation est l'étape la plus importante et la plus difficile à réaliser lors de la construction d'un puits. Une mauvaise cimentation est susceptible d'affecter la sécurité du puits pendant toute sa durée de vie. Assurer une qualité élevée des travaux de cimentation de puits nécessite une bonne connaissance du principe et la procédure de l'opération de la cimentation. Dans ce chapitre, les principes de base de la cimentation primaire du puits sont introduits, y compris ses objectifs et ses différentes méthodes d'opérations. Nous présentons aussi les différents fluides et équipements utilisés, ainsi que la terminologie nécessaire à la compréhension des chapitres suivants.

1.2 Définition de la cimentation

La cimentation d'un puits de forage est le processus de mise en place d'un laitier approprié dans l'espace annulaire formé par le trou foré et le tubage à une cote donnée (*Dwight, 1989 ; Nguyen, 1993*).

1.3 Types de cimentation

Il existe plusieurs types de cimentation spécifiques à certaines applications, répondants aux besoins techniques lors du forage d'un puits (*Nguyen, 1993*).

1.3.1 Cimentation primaire

Elle se fait en parallèle avec le forage d'un puits, par sections successives dont le rôle principal est de :

- ✓ Prévenir l'affaissement des parois du puits,
- ✓ Renforcer et consolider le trou du forage,
- ✓ Ancrer définitivement le tubage au terrain,
- ✓ Isoler et protéger les différentes couches de la roche,
- ✓ Isoler les niveaux productifs (gaz, pétrole, eau),
- ✓ Protéger le tubage contre la corrosion qui peut être causée par la présence d'éléments corrosifs dans les formations profondes de la roche,
- ✓ Prévenir la pollution des nappes captives et du sol,
- ✓ Se servir d'appuis pour la tête du puits et les équipements de contrôle,
- ✓ Garantir l'étanchéité derrière la colonne du tubage,
- ✓ Limiter le mouvement des fluides entre les différentes couches de formations.

1.3.2 Cimentation squeezees

C'est l'injection de ciment à un point donné sous pression hydraulique suffisante pour déshydrater partiellement ou expulser l'eau du laitier, laissant un ciment optimal qui durcira et obturera tous les vides. On l'utilise pour diverses raisons telles que :

- ✓ Consolider ou réparer la cimentation primaire,
- ✓ Obturer une couche productrice épuisée,
- ✓ Isoler une couche des zones adjacentes dans le but de limiter la proportion d'eau ou de gaz accompagnant la production du pétrole.

1.3.3 Pose de bouchon de ciment : Cimentation par pose de bouchon en trou ouvert, en cours du forage

Cette opération consiste à placer à l'aide de train de sonde une quantité de laitier dans le découvert ou dans une colonne dans le but de :

- ✓ colmater les venues d'eau,
- ✓ obturer les zones à pertes de boue de forage,
- ✓ respecter les séquences d'abandon du puits (abandon d'un réservoir avant de mettre en production un niveau supérieur),
- ✓ colmatage de pertes de circulation,
- ✓ fermeture d'un niveau aquifère,
- ✓ abandon définitif d'un puits,
- ✓ Créer une déviation du puits.

1.4 Normalisation

En 1937, l'institut américain du pétrole (API : American Petroleum Institute) a établi le premier comité d'étude de la cimentation. Plusieurs tests au laboratoire et équipements de mesure existent pour déterminer la fluidité et la pompabilité des laitiers de ciment selon la température du fond du puits. Les avancées technologiques ont permis de développer des techniques encore plus performantes afin d'estimer au mieux le comportement des fluides selon les normes internationales de l'API.

Les études de standardisation sont publiées annuellement dans deux brochures. Les spécifications de l'API sont publiées dans le Volume 10A et les Pratiques recommandées par l'API des tests sur les ciments des puits pétroliers et les additifs sont publiées dans le Volume 10B (*Dwight, 1989*).

1.5 Les différents fluides utilisés lors de la cimentation primaire

La réussite de l'opération de la cimentation primaire, nécessite l'utilisation de différents fluides ayant chacun une composition et rôle spécifique.

1.5.1 Boue de circulation

Après la mise en place du tube, il faut s'assurer qu'un pourcentage important de la boue soit effectivement en circulation pour garantir le succès de l'opération. La boue étant principalement un mélange d'argile et d'eau ou d'huile qui a pour rôle de nettoyer le trou et faire remonter en surface ce qui reste des agrégats résultants du forage. Elle a aussi pour rôle principal de refroidir, stabiliser la température du puits et colmater les pores de la formation. Compte tenu de la complexité du problème, généralement la circulation ne sera arrêtée que lorsque la boue ne remonte plus de déblais et que tout le volume de boue reste constant.

1.5.2 Fluide intermédiaire

C'est un fluide à base d'eau ou d'huile auquel on ajoute des produits chimiques pour améliorer ses performances, placé en tête de ciment après la boue de circulation dans le but de :

- Nettoyer l'intérieur du tubage ainsi que l'annulaire de la boue de circulation.
- Créer un tampon entre la boue et le laitier pour éviter tout risque de contamination de la boue et floculation des particules argileuses qui pourrait être causée par le calcium présent dans le ciment.

La formulation de ce fluide doit prendre en considération les points suivants :

- Le fluide doit être compatible avec la boue et le laitier de ciment.
- Il doit présenter une rhéologie et une densité optimales dans des conditions de fond du puits afin de garantir un bon déplacement de la boue.
- Il dispose de la chimie appropriée pour nettoyer les surfaces solides.
- Il ne devrait pas causer de dommages à la formation par filtration excessive ni altération de l'humidité de la roche.

1.5.3 Laitier de ciment

Les laitiers de ciment utilisés sont composés principalement de ciment et d'eau auxquels sont ajoutés un ou plusieurs additifs ayant chacun un rôle déterminé. Ces laitiers sont testés au laboratoire dans les conditions réelles auxquelles ils sont soumis pendant et après leur pompage.

1.5.4 Boue de chassage

Le fluide de chassage ou de déplacement est généralement de la boue ayant pour rôle de faire sortir le laitier de ciment hors du tubage afin de remplir l'annulaire. Le volume de déplacement est normalement calculé en fonction de la capacité nominale du tubage.

1.6 Classification des ciments

Selon la standardisation de l'API (Standard 10) qui date de juin 1984, différentes classes de ciments ont été définies pour la cimentation des puits pétroliers, cela selon les conditions in-situ et suivant la profondeur donnée en feet sachant que : (1foot = 0.305m) (*Dwight, 1989*).

Tableau 1-1: classification des ciments selon la norme API (*Dwight, 1989*)

Classe	Profondeur (ft)	Autres conditions
A	6000	Aucune caractéristique particulière n'est demandée.
B	6000	Les conditions nécessitent une résistance modérée ou élevée aux sulfates.
C	6000	Les conditions nécessitent une haute résistance initiale. (Disponible en type ordinaire ou en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
D	6000-10000	En condition de température et de pression modérément élevées. (Disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
E	6000-14000	Des conditions de température et de pression élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). Son temps de pompabilité est réglé par un retardateur ajouté en usine par le cimentier.
F	10000-16000	Des conditions de température et de pression élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). Son temps de pompabilité est réglé par un retardateur ajouté en usine par le cimentier.
G	De la surface à 8000	Des plus basses aux plus hautes températures grâce à sa compatibilité avec tous les additifs, (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
H	De la surface à 8000	Prévu pour des densités de laitier supérieures (1.98 au lieu de 1.90).

1.7 Additifs « Adjuvants »

Le développement de plus de 50 additifs a permis de fabriquer plusieurs types de laitier afin de réaliser des puits pétroliers dans des conditions extrêmes de pression, de température et de profondeur.

Lors de l'utilisation des additifs, il est nécessaire de prendre en considération leur compatibilité avec les autres adjuvants mais aussi avec le ciment lui-même. Les additifs les plus utilisés sont définis ci-dessous (*Dwight, 1989 ; Nguyen, 1993*).

▪ **Accélérateur**

Les laitiers de ciment utilisés dans le cas de la formation peu profonde et à basse température ont un retard dans le durcissement et dans le développement de la résistance à la compression. Afin d'y remédier, on peut choisir d'élever la température ou d'utiliser des accélérateurs tels que : Calcium chloride, Chloride de Sodium, Gypse, Silicate de Sodium, Ciments dispersant et Eau de mer.

▪ **Allégeant**

Ce sont des matières inertes utilisées pour réduire la densité du laitier à 1.78 et 1.98 afin de faciliter leur déplacement, réduire les pressions hydrostatiques pour éviter la fracturation des couches fragiles, colmater les zones à pertes en cours de forage et confectionner des bouchons de ciment de faible densité. Les matériaux couramment utilisés sont : Bentonite, Hydrocarbonés naturels, Nitrogène.

▪ **Alourdissant**

C'est un produit chimiquement inerte, utilisé pour augmenter la densité des laitiers de ciment au-delà de 2 afin de faire face aux pressions élevées rencontrées dans les puits profonds, il exige une faible quantité d'eau, ne réduit pas significativement la résistance du ciment et n'affecte pas vraiment le temps de pompage du ciment. Les matériaux couramment utilisés sont : Hématite, Ilménite, Barytine, Sable et Sel. L'hématite a été le plus largement utilisé parce qu'il convient le mieux aux exigences physiques et atteint le poids spécifique le plus efficace.

▪ **Retardateur**

Ce sont généralement des sucres qu'on ajoute au laitier afin de prévenir le durcissement rapide des laitiers de ciment en grandes profondeurs là où on rencontre des températures supérieures à 80°C.

▪ **Anti-mousse**

Il est utilisé pour éviter la création de la mousse lors du mixage du laitier.

▪ **Agent de contrôle des pertes de circulation**

Il a pour rôle de réduire la densité du laitier de forage afin de colmater les fissures créées lors du forage dans la formation. Exemple : fibre synthétique inerte.

▪ **Réducteur de filtrat**

Les réducteurs de filtrat forment un film contrôlant l'écoulement de l'eau du laitier de ciment et préviennent rapidement la déshydratation. Ils permettent aussi d'améliorer la distribution des particules selon leur dimension ainsi la retenue du liquide. Les matériaux de contrôle de filtration les plus utilisés sont les polymères organiques et les réducteurs de frottement.

▪ **Réducteur de frottement ou dispersant de ciment**

Ces agents sont ajoutés aux laitiers pour améliorer les propriétés de l'écoulement.

Les laitiers dispersés possèdent une faible viscosité et peuvent être pompés en turbulence à faible pression réduisant ainsi la puissance requise, les risques de perte de circulation et une déshydratation prématurée. Les réducteurs de filtrat diminuent la limite de plasticité et la résistance au gel du laitier. Les dispersants les plus couramment utilisés sont les polymères, acide organique et les sels (Chlorure de sodium) sous une faible température car ils retardent légèrement la prise du ciment.

1.8 Critères de choix du type de laitier

Le type de laitier est choisi en fonction des conditions in-situ suivantes (*Nguyen, 1993*) :

- Ñ La coupe lithologique.
- Ñ La déviation du puits.
- Ñ La géométrie du trou.
- Ñ Le type du tubage.
- Ñ La rhéologie du fluide (laitier, spacer, boue).
- Ñ La température statique du fond du trou BHST, qui modifie le temps de prise et donc le temps de pompabilité.
- Ñ La température de circulation du fond de puits BHCT, lors de la mise en place du laitier, qui modifie le temps de prise et donc le temps de pompabilité.
- Ñ Caractéristiques de la boue.
- Ñ La profondeur.
- Ñ Les pressions dynamiques rencontrées lors du pompage des fluides pour la cimentation.
- Ñ Les pressions hydrostatiques imposées par les formations rocheuses.
- Ñ La densité du laitier imposé par la limitation des pressions hydrostatiques de certaines formations rencontrées.

1.9 Méthodes de cimentation primaire

Il existe plusieurs méthodes de cimentation primaire :

- Ñ Cimentation par les tiges.
- Ñ Cimentation par le tube ancré.
- Ñ Cimentation par le tube suspendu.
- Ñ Cimentation par canne dans l'annulaire.

Les trois premières méthodes de cimentation s'appliquent uniquement pour les forages de gros diamètres et relativement profonds. La quatrième est utilisée pour les forages de moins de 50 mètres de profondeur. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons particulièrement à la méthode de cimentation par tube ancré car notre cas d'application repose sur cette dernière.

1.10 Equipements les plus utilisés dans la cimentation par tube ancré (Nguyen, 1993)

Plusieurs outils et équipement sont utilisés lors de l'opération de la cimentation ayant un rôle bien défini :

- Ñ **Sabot (Guide shoe)** : C'est un élément de forme arrondie qui aide à guider et à descendre le tubage par son propre poids (voir annexe 4).
- Ñ **Anneau de retenue (Float collar)** : Il permet de retenir les bouchons à la fin de la cimentation, on le choisit du même type que le sabot pour assurer leur redondance. Cet anneau est équipé d'un système anti retour surtout si le sabot ne l'est pas. Il doit toujours être intercalé de deux à trois tubes au-dessus du sabot afin de laisser une réserve au volume supplémentaire du laitier.
- Ñ **Centreurs (Centralizer)** : Ce sont des éléments déterminant pour la réussite de la cimentation. Ils permettent de centrer au maximum le tube dans le trou. Le nombre et la séparation entre les centreurs dépendent de l'importance de la déviation (voir annexe 3).

Quand les centreurs sont installés convenablement, ils permettent de :

- Empêcher le contact entre les parois du trou et le tubage lors de la mise en place de ce dernier.
- Eviter les coincements du tubage dans le puits.
- Homogénéiser la répartition hydrostatique des pressions.
- Faciliter la répartition du laitier tout au long de l'annulaire.

Il y a deux types de centreurs :

- Centreurs rigides : Avec lames en U , utilisés aux espaces annulaires (tubage-tubage), dans des trous bien calibrés et dans des puits très déviés. Ils ont l'avantage de limiter les forces de frottements.
 - Centreurs souples : Ils sont utilisés pour le centrage des colonnes dans le découvert.
- Ñ **Gratteurs (Scratchers)** : Ils permettent de nettoyer les parois en décollant les agrégats qui non pas pu être remontés en surface par la boue, lisser au maximum le mur du trou, et servent aussi à la destruction du cake, (cela se fait en équipant le tube de gratteurs et faire l'opération soit en rotation dans le cas de gratteurs rotatifs soit en translation dans le cas des gratteurs alternatifs) (voir annexe 5).
- Ñ **Colliers tourbillonneurs (hydrobonders)** : Ils modifient le profil de l'écoulement afin de faciliter le déplacement de la boue par le laitier et favorisent l'adhésion du ciment à la formation. Ils sont constitués par des disques de caoutchouc ayant un diamètre supérieur à celui de l'outil de forage (Diamètre nominale du forage), grâce à ses nervures spiralées, ils forcent le laitier à pénétrer vers le fond des cavités. Il est conseillé d'inverser le sens des spirales de deux colliers placés l'un après l'autre s'ils sont rapprochés afin de modifier au maximum le profil d'écoulement.
- Ñ **Ombrelles de cimentation (Cementing baskets)** : Elles aident à minimiser les pertes du laitier dans les zones fragiles. On les place à faibles profondeurs car même si elles n'empêchent pas la transmission des pressions, elles limitent sensiblement le passage des fluides (voir annexe 7).
- Ñ **Bouchons (plug)** : ils ont pour rôle principal de séparer et garantir une bonne étanchéité entre les fluides dans le tube lors de la cimentation afin de minimiser au maximum le risque de leur mélange et la contamination du laitier. Ils sont de deux types (voir annexe 2).
- Bouchon inferieur (bottom plug) : On le met en place après avoir pompé le spacer dans le tube afin de le séparer du laitier, et éviter la contamination de ce dernier en raclant les parois du tubage lors de son déplacement. Il est doté d'un diaphragme destructible sous l'effet d'une légère surpression.
 - Bouchon supérieur (Top plug) : Il est très étanche et résistant aux hautes pressions, placé après le pompage du laitier, il le sépare du fluide de chassage qui est généralement la boue pour éviter tout risque de contamination. En fin de chasse, il se met sur le bouchon inferieur ce qui signale la fin de la cimentation.
- Ñ **Tête de ciment** : Elle est vissée au sommet du tubage et contient les deux bouchons de cimentation. Elle est munie de vannes qui permettent le lancement des bouchons et des séquences de pompage des fluides (voir annexe 6).

1.11 Préparation du laitier

La formulation des laitiers est un processus itératif. Elle doit répondre aux critères de performance requis et ceux fixés par le client, repose initialement sur l'expérience. La connaissance des bases de données facilite le processus de formulation. Toutefois, en raison de la variabilité des ciments, il est nécessaire de réaliser des tests au laboratoire afin de vérifier les résultats prévus. (*Nelson et al., 2006*).

Dans l'industrie pétrolière, la livraison du ciment au client peut se faire soit en vrac ou en sac, la distribution en sac a été de règle tellement longtemps que ce dernier étant de 94 lb (42.6 kg), d'un volume d'un pied cube (ft³) est devenu l'unité de mesure. Toutefois, le sac ne dépasse généralement pas la base, et l'acheminement jusqu'à la plateforme se fait en vrac après avoir été mélangé aux différents additifs pulvérulents prévu pour sa formulation.

Le laitier de ciment est pompé à partir d'une unité de cimentation mobile (voir annexe1) spéciale se trouvant sur place et regroupant tous les moyens nécessaires pour le mixage et le pompage des fluides. Elle est composée principalement de :

- Ñ un ou plusieurs bacs destinés à assurer un certain volume de réserve pour l'alimentation en eau,
- Ñ une ou plusieurs pompes centrifuges servant à alimenter des bacs, au mélange des fluides et au gavage des pompes de haute pression,
- Ñ un dispositif mélangeur destiné au gâchage des ciments,
- Ñ Une ou deux pompes de haute pression,
- Ñ des moyens de contrôle et de mesure des pressions et de débits.

1.12 Etapes de la cimentation primaire par tube ancré

La cimentation par tube ancré est une opération complexe qui nécessite une bonne organisation et maîtrise. Suivant les normes, les principales étapes à suivre pour réaliser ce type de cimentation sont :

1. En premier lieu, on doit récolter le maximum d'informations concernant les conditions in-situ (la température du fond sous circulation, la pression des formations, présence d'agents pouvant dégrader le laitier « eaux érosives », le volume de l'annulaire etc...).
2. En se reposant sur ces informations, on détermine les principaux points suivants :
 - le top ciment,
 - caractéristiques du fluide utilisé et le type du laitier,
 - régime d'écoulement,
 - le volume du spacer,
 - Volume et temps d'opération.

3. Le tubage doit être préalablement inspecté (filetage de connexion), mesuré, nettoyé, calibré (diamètre interne), numéroté et trié par ordre de descente.
4. On visse sur les tubes, l'anneau de retenue ensuite le sabot.
5. On place les centreurs et les gratteurs à des emplacements bien définis sur le tubage.
6. On doit s'assurer du fonctionnement des valves anti-retour (Float Collar et Sabot) par une circulation en surface.
7. Une fois tout le tubage au fond, on met en place la Tête de Cimentation et faire une circulation avec la boue pour le nettoyage du trou (au moins un cycle) et refroidir la formation.
8. On injecte un bouchon laveur « Spacer » de 1 à 10m³.
9. A cet instant on largue le bouchon de Fond (à membrane ouvrable avec la pression).
10. On pompe le volume voulu du laitier à l'intérieur du Tubage après l'avoir bien mélangé en surface.
11. Lorsque le bouchon inférieur arrive sur l'anneau de retenue, on doit remarquer une légère augmentation suivie d'une chute de pression. Cela indique que le laitier a transpercé la membrane du bouchon.
12. Puis, on doit larguer le bouchon de surface.
13. Ensuite, on chasse avec de la boue. Lorsque le bouchon supérieur arrive sur l'anneau de retenue, on enregistre une augmentation de pression qui indique le contact des deux bouchons.
14. A ce moment, il faut arrêter les pompes.
15. Une fois le laitier durci, on fait le contrôle et la vérification de la réussite de l'opération.
16. Après avoir réalisé toutes ces étapes, on place l'outil de forage de diamètre inférieure qui va forer les bouchons, sabot pour pouvoir atteindre la section suivante.
17. Une fois le forage de la section suivante terminée, on refait toutes les étapes précédentes pour la cimentation de cette section.

Ces étapes sont schématisées dans la figure ci-dessous :

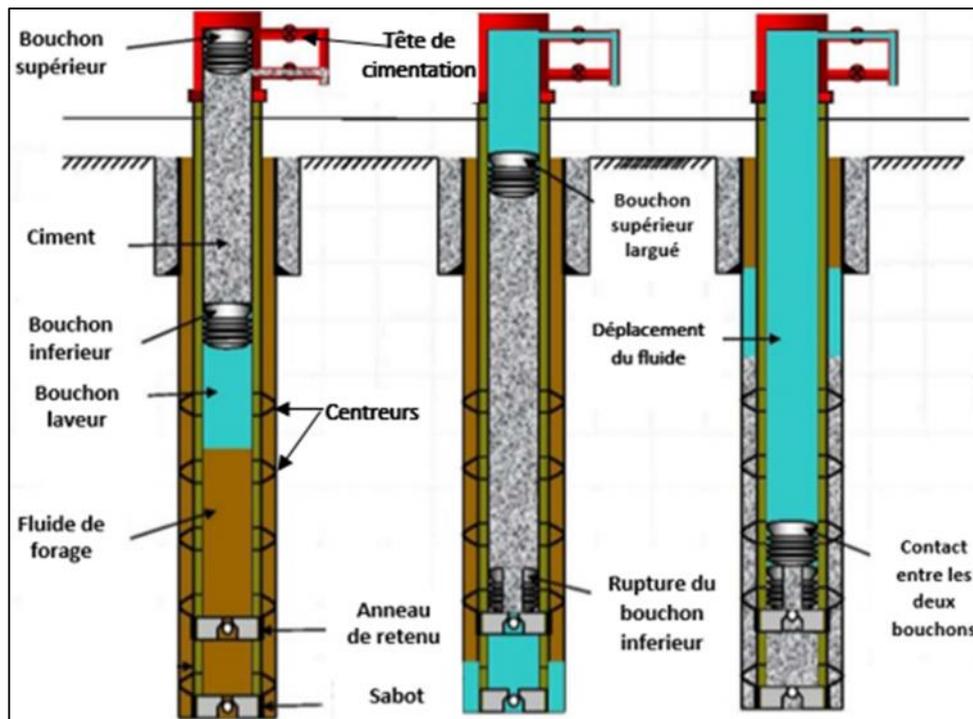


Figure 1-1 : processus de la cimentation

1.13 Colonne perdue « Liner »

C'est une série de tube introduite à l'intérieur du tubage précédent jusqu'à une hauteur limitée ne remontant pas jusqu'à la surface sur une distance pouvant aller de moins de 15 m à plusieurs centaines de mètre. L'annulaire créé entre ces deux tubes est cimenté dans le but de (Nguyen, 1993 ; Nelson et al, 2006) :

- Ñ Sceller mécaniquement la colonne perdue dans la colonne précédente,
- Ñ Garantir l'étanchéité entre les deux colonnes,
- Ñ Isolation des différents niveaux du réservoir et limitation des venues indésirables (eau, gaz),

1.14 Problèmes issus d'une mauvaise cimentation

Le travail des ingénieurs, consiste à mettre au point un programme de cimentation qui satisfait les conditions in-situ afin d'éviter tout risque de :

- Ñ Fracturation ou éruption du puits,
- Ñ La prise du laitier lors du pompage,
- Ñ Mauvaise isolation de l'annulaire,
- Ñ Effondrement du puits,
- Ñ Apparition de micro-annulaire,
- Ñ Infiltration de différents fluides,
- Ñ Ecrasement du ciment,

- Ñ Fissuration de la gaine,
- Ñ Présence de boue dans l'annulaire,
- Ñ Distribution non symétrique du ciment dans l'annulaire,
- Ñ Faible adhérence entre la roche et le ciment,
- Ñ Mauvaise adhésion entre la gaine du ciment et le tubage (décollement)
- Ñ La non prise du laitier (état liquide)

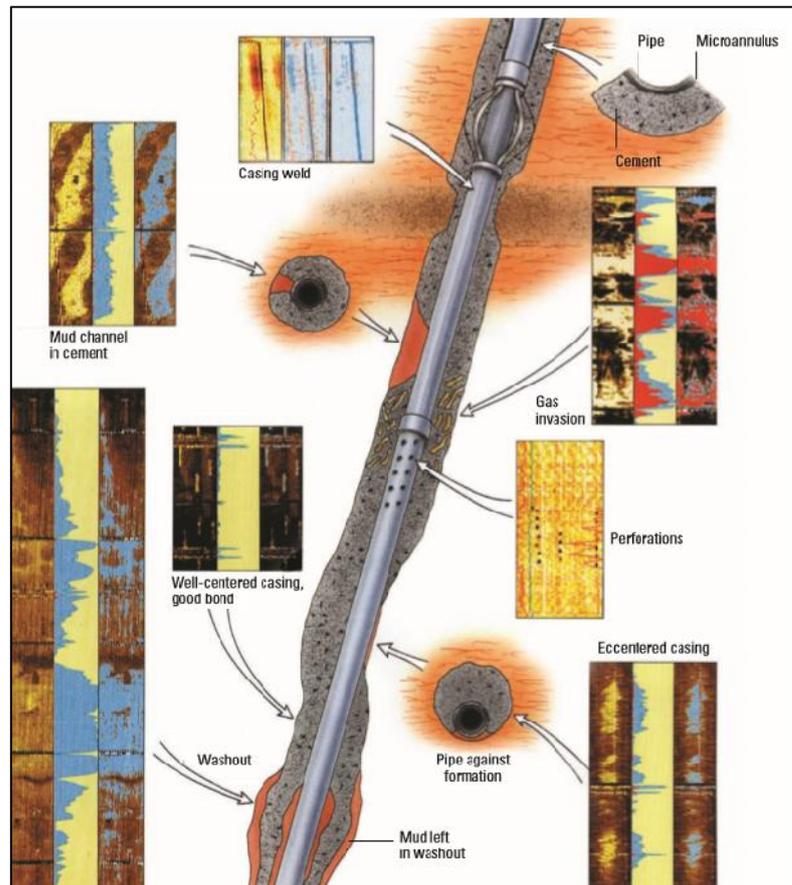


Figure 1-2 : représentation des différents problèmes rencontrés après la cimentation (Nelson et al., 2006)

1.15 Conclusion

Ce chapitre a décrit les connaissances de base de la cimentation primaire, ses objectifs, ses étapes et ses moyens de réalisation. En plus de maîtriser ces derniers, les ingénieurs pétroliers doivent prendre en considération le comportement dynamique ultérieur des fluides utilisés, car ils sont soumis à des charges mécaniques et thermiques lors de la cimentation primaire au cours de leurs durées de vie.

Le chapitre suivant concernera les propriétés physiques, dynamiques et hydrauliques des fluides lors de leurs écoulements dans un annulaire et les paramètres qu'on doit prendre en considération afin de décrire et prévoir les différents phénomènes pouvant se produire lors de la cimentation primaire.

Chapitre 2

**Propriétés de l'écoulement
des fluides lors de la
cimentation des puits de
forage**

2. Propriétés de l'écoulement des fluides lors de la cimentation des puits de forage

2.1 Introduction

La cimentation consiste à pomper une séquence de fluides dans le puits. Souvent, ces fluides, comme les spacers, la boue de chassage et les laitiers de ciment, ont des caractéristiques de comportement particulières qui modifient le comportement dynamique du fluide affectant ainsi sa vitesse et sa pression à une profondeur donnée.

La complexité de ces processus et la multitude des fluides impliqués ainsi que les pressions exercées par la formation exigent une caractérisation suffisamment détaillée des matériaux afin de concevoir et d'optimiser les travaux de cimentation.

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter les différentes lois de comportement d'un fluide, les propriétés hydrauliques de l'écoulement et les différents phénomènes qui peuvent se produire lors de la cimentation auxquels les ingénieurs doivent faire face.

2.1.1 La rhéologie

La rhéologie est l'étude de la déformation d'un matériau s'il est solide, ou son écoulement s'il est liquide sous l'influence d'une pression. Elle peut être décrite comme science qui a pour but de déterminer les propriétés intrinsèques du fluide, les viscosités principales nécessaires pour déterminer la relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement de l'élément qui causent le mouvement du fluide. Cette relation définit si le fluide est Newtonien ou non Newtonien.

2.1.1.1 Fluide Newtonien

Dans le cas d'un fluide newtonien, la tension de cisaillement est proportionnelle au taux de cisaillement suivant l'équation :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2-1)$$

Cette relation est représentée dans la Figure (2-1), où la pente de la droite représente la viscosité du fluide μ , une constante qui ne dépend pas du débit mais seulement de la pression et de la température.

Les fluides newtoniens les plus communs sont : l'eau, l'huile légère et l'essence.

Comme on peut le voir dans la Figure (2-2), le fluide newtonien commence à s'écouler immédiatement après l'application d'un gradient de pression. Durant tout le temps où le fluide est en régime laminaire, la relation entre le gradient de frottement et le débit est linéaire comme l'est la relation entre la tension et le taux de cisaillement.

Quand l'écoulement commence à être turbulent, la relation n'est plus linéaire, et la pression de friction augmente plus rapidement que dans le régime laminaire.

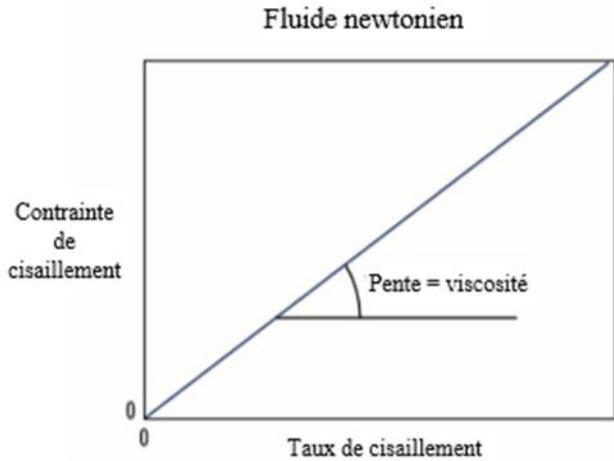


Figure 2-1 : relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour un fluide Newtonien

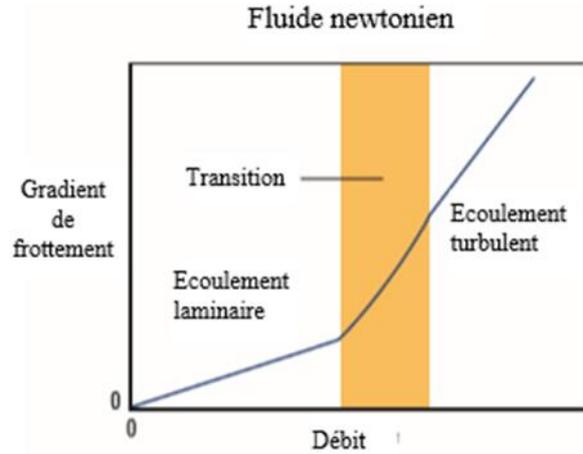


Figure 2-2 : relation entre le gradient de frottement et le débit pour un fluide Newtonien

2.1.1.2 Fluide non newtonien

Ce comportement est caractérisé par une non linéarité entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement par excès du seuil de plasticité. Nous citons ci-dessous les différents modèles rhéologiques utilisés pour décrire l'écoulement des fluides non newtoniens (Gucuyener, 1983).

Ñ Plastique de Bingham

C'est l'un des modèles rhéologiques les plus utilisés. Ce modèle à deux constantes, considère une proportionnalité directe entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement par excès de la limite de plasticité. La constante de proportionnalité est définie par la viscosité plastique.

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (2-2)$$

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement (lb/100 ft²), τ : Contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 : Limite de plasticité (lb/100 ft²) et μ_p : Viscosité plastique (cP).

Ñ Loi puissance (Power law)

Les fluides qui suivent la loi puissance, appartiennent à la classe des fluides pseudo-plastique. Comme les fluides newtoniens, ils commencent à s'écouler immédiatement après l'application d'un gradient de pression, mais la relation entre la tension de cisaillement et le taux de cisaillement est dans ce cas non linéaire. Ce modèle est décrit par l'équation suivante :

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2-3)$$

avec, K et n sont respectivement la consistance et indice du comportement de l'écoulement. Lorsque, nous avons :

- $0 < n < 1$, le fluide est rhéofluidifiant ou pseudo plastique
- $n = 1$, le fluide est newtonien
- $n > 1$, le fluide est rhéoépaississant ou dilatant

Ñ Herschel-Bulkley

Ce modèle combine le modèle de la loi puissance et celui de Bingham. Comme dans le modèle de Bingham, il y a une contrainte de rupture qui doit être dépassée pour que l'écoulement commence. Au-dessus de cette contrainte, la relation entre la tension de cisaillement et le taux de cisaillement suit la loi de puissance. Ce modèle à trois paramètres, proposé par Herschel-Bulkley, décrit le comportement élastique pseudo plastique tel que :

$$\tau_w = \begin{cases} 0 & \text{si } \dot{\gamma}_w \leq \tau_y \\ K \dot{\gamma}_w^n & \text{si } \dot{\gamma}_w > \tau_y \end{cases} \quad (2-4)$$

Ñ Roberston-Stiff

Roberston et Stiff ont proposé le modèle suivant reliant la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement des laitiers de ciment par :

$$\tau_w = \begin{cases} 0 & \text{si } \dot{\gamma}_w \leq A \\ A C^B & \text{si } \dot{\gamma}_w > A \end{cases} \quad (2-5)$$

Avec, $A = K^n$ et $B = n$

Ce modèle est une présentation du modèle de Vacodlo sous une autre forme. Le modèle de Vacodlo est :

$$\tau_w = \begin{cases} 0 & \text{si } \dot{\gamma}_w \leq \tau_y \\ \tau_y \left(\frac{\dot{\gamma}_w - \tau_y}{K} \right)^{1/n} & \text{si } \dot{\gamma}_w > \tau_y \end{cases} \quad (2-6)$$

Ñ Modèle rhéologique unifié (Unified Model)

C'est un modèle empirique basé sur des résultats expérimentaux a été établi à partir du modèle de Herschel-Bulkley exprimé sous une forme facilement reconnaissable par les ingénieurs du terrain (*Zamora et al., 2005*).

L'équation du modèle unifié est fonction des différents paramètres mis en jeu dans l'ensemble des modèles rhéologiques cités ci-dessus. Le modèle s'écrit selon l'équation suivante :

$$\tau_w = 1.066 \left[\left(\frac{4 - \alpha}{3 - \alpha} \right)^n \tau_y + k \dot{\gamma}_w^n \right] \quad (2-7)$$

Lorsque $\dot{\gamma}_y = 0$, l'équation (2-7) est réduite à la solution exacte du fluide selon la loi de puissance.

Pour $\dot{\gamma}_y = YP$, et $n = 1$, l'équation se présente comme l'expression simplifiée du modèle plastique de Bingham.

Avec, K et n sont respectivement la consistance et indice du comportement de l'écoulement.

La constante 1.006 est obtenue par conversion de la lecture du viscosimètre en lbm/100 ft.

Les propriétés rhéologiques utilisées dans le calcul de pertes de charge sont mesurées sur des viscosimètres de laboratoire HTHP (Haute température, haute pression). Les paramètres n , k et γ_y du modèle de Herschel-Bulkley sont dérivés de ces mesures rhéologiques en utilisant les équations suivantes :

$$n = 3.32 \log_{10} \frac{2PV + YP}{PV + YP} \quad (2-8)$$

avec,

PV : viscosité plastique (cP),

YP : seuil de cisaillement (lb/100 ft²),

γ_y : Limite de plasticité (lb/100 ft²),

x_w : Contrainte de cisaillement (Pa).

On peut traiter un fluide de Herschel-Bulkley comme un fluide répondant à la loi de puissance quand le taux de cisaillement est important. La pente de l'équation log-log de l'écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley est supposée numériquement proche de l'indice de comportement de l'écoulement de la loi de puissance n_p , défini par :

$$n_p = 3.32 \log_{10} \frac{2PV + YP}{PV + YP} \quad (2-9)$$

Afin de déterminer la tension de cisaillement sur la formation, nous avons besoin du taux de cisaillement :

$$\gamma_w = \frac{1.6Gv}{d_{hy}}$$

Avec, v : vitesse moyenne calculée à partir de l'équation de conservation de la masse (m/s), d_{hyd} : diamètre hydraulique (in) et G : facteur de correction de la géométrie dépendant du paramètre rhéologique n . Il est donné par la formule suivante :



= 0 pour le tube et =1 pour l'annulaire.

2.1.1.3 Les limites des modèles rhéologiques

Les modèles de la loi de puissance et de Bingham ont de sérieuses limitations en décrivant la rhéologie des fluides de forage, spacers et le laitier de ciment sur un large intervalle du taux de cisaillement. L'alternative la plus employée est l'utilisation du modèle de Bulkley, il ne souffre pas des mêmes limitations. C'est seulement en 2006 qu'API a recommandé l'utilisation du modèle, mais les logiciels les plus utilisés ont commencé à l'utiliser que ces dernières années.

Afin de faciliter en pratique l'application des modèles rhéologiques sur les différents fluides, le modèle Herschel-Bulkley unifié s'est avéré suffisamment précis pour les programmes hydrauliques les plus avancés. C'est le modèle de choix pour de nombreuses applications des fluides non newtoniens, principalement pour les raisons suivantes (*Zamora et al, 2005*) :

- Convient à une large gamme de boues de forage,
- Contient un terme de contrainte de rendement qui est souvent utilisé pour évaluer et optimiser le nettoyage des trous, l'affaissement de la barytine, la suspension et d'autres préoccupations liées à l'hydraulique,
- Inclut comme cas particulier le modèle plastique de Bingham traditionnel et loi de puissance exacte en fonction de la valeur de la limite d'élasticité.

2.1.1.4 Importance de la rhéologie (*Nelson et al., 2006*)

Une bonne caractérisation de la rhéologie est essentielle pour :

- Ñ Evaluer la pompabilité et la miscibilité des fluides.
- Ñ Optimiser l'enlèvement de la boue et le déplacement des fluides.
- Ñ Détermination du frottement quand des fluides s'écoulent dans le tube et dans l'annulaire.
- Ñ Evaluer la capacité des fluides à transporter des particules larges (fibres et quelques matériaux perdus lors de la circulation).
- Ñ Prédire l'effet du profil de la température sur le déplacement des fluides.
- Ñ Prédire les pressions qui seront exercées dans l'annulaire durant et après le placement des fluides.

2.1.1.5 Facteurs influençant la rhéologie du laitier

Malgré les performances réalisées au cours de ces 60 dernières années, une caractérisation complète de la rhéologie doit encore être atteinte, car le comportement rhéologique du laitier dépend de plusieurs facteurs :

- Ñ Quantité d'eau ajoutée au ciment.
- Ñ Taille et forme des grains, la surface spécifique de la poudre de ciment.
- Ñ Composition chimique du ciment et la distribution relative des composants sur la surface des grains.
- Ñ Présence d'additifs.
- Ñ Type et capacité d'équipements utilisés sur chantier pour le mixage.
- Ñ Procédure de mélange et de test (*Nelson et al., 2006*).

2.1.2 Temps de pompabilité

C'est le temps mis par le laitier, maintenu en agitation sous condition de pression et de température, pour atteindre une certaine consistance. Pratiquement, il correspond à la durée pendant laquelle le laitier reste pompable dans les conditions de température et de pression normalisés en fonction du type de cimentation envisagée.

Des tests normalisés par l'API existent afin d'évaluer le temps de pompabilité comme le HPHT test. Le HPHT (Haute pression et haute température) consistomètre expose un échantillon de coulis de ciment à un ensemble contrôlé des paramètres de température, l'agitation et la pression qui simulent les conditions de fond de trou jusqu'à des valeurs maximales de l'ordre de 400°F et 25,000 psi [204°C et 175 MPa]. Lors de ce test, ces paramètres sont soigneusement surveillés et contrôlés précisément par un logiciel système (*Dwight, 1989*).

2.1.3 Viscosité

Le laitier de ciment doit avoir une viscosité ou consistance permettant un déplacement maximal de la boue lorsqu'on n'utilise pas de spacer et une bonne adhésion entre la formation et le tubage. La taille des particules, leurs surfaces ainsi que les additifs influencent la quantité d'eau requise pour atteindre la viscosité requise d'un laitier donné.

Des intervalles de viscosité existent pour un laitier donné déterminant l'épaississement et la pompabilité pour un certain nombre de conditions de puits (*Dwight, 1989*).

2.1.4 Pression

Lors du forage et de la cimentation, le puits est soumis à différentes pressions, citées ci-dessous, qui doivent être prises en considération afin de maintenir la stabilité du puits et éviter tout risque d'effondrement.

2.1.4.1 Pression hydrostatique

La pression imposée sur le laitier de ciment par la charge hydrostatique au niveau du puits, réduit la pompabilité du ciment. Dans les puits profonds, la pression hydrostatique peut excéder 20000 psi (*Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982*).

La valeur de la pression hydrostatique est donnée par :

$$P_h = \rho g L \quad (2-10)$$

Où,

- P_h : pression hydrostatique (Pa),
- g : l'accélération gravitaire (m/s^2),
- L : profondeur à un point donné (m),
- ... : masse volumique de la boue injectée (kg/m^3).

2.1.4.2 Pression interstitielle (Pore pressure)

La pression interstitielle est la pression exercée par les fluides dans les espaces interstitiels des roches. Cette pression est générée par la roche dans les fluides au-dessus des zones poreuses. Lorsque les foreurs rencontrent la zone des pores qui est la roche porteuse d'hydrocarbures, la pression des pores va forcer le pétrole et le gaz hors de la roche dans le puits provoquant ainsi l'éruption du puits (*Khoshnaw et al., 2015*).

2.1.4.3 Pression de fracturation ou de rupture (Fracturation pressure)

La pression de rupture est la pression dans le puits à laquelle une formation se fissurera. La pression de rupture peut diminuer avec la diminution de la pression du réservoir. Il est habituellement nécessaire d'effectuer des essais de « dépannage » pour conclure la pression de rupture d'une zone spécifique de réservoir de pétrole ou de gaz (*Khoshnaw et al., 2015*).

Remarque

Il est nécessaire de maintenir la pression de forage entre la pression de fracturation et la pression interstitielle afin d'éviter tout risque d'effondrement, instabilité du puits ou éboulement ainsi que les pertes par circulation à travers les zones fracturées causés par un excès de la pression de rupture. Alors que, si la pression du puits est inférieure à la pression des fluides de formation, cela entraînera d'autres problèmes de forage tels que l'infiltration de gaz ou d'un autre fluide.

2.1.5 Densité

La densité du laitier peut être calculée très simplement à partir de la densité de la poudre de ciment, de celle de l'eau de gâchage, et de celles de différents additifs entrant dans la composition du laitier (*Dwight, 1989*).

Le calcul de la densité se fait pour les programmes de cimentations, mais la mesure reste indispensable au laboratoire et sur le site par une balance à boue standardisé de tous les fluides utilisés.

Pour les faibles densités -10.8 à 15.6 lbm/gal-(1.29-1.9 SG) matériaux qui requièrent de larges volumes d'eau de gâchage sont fréquemment utilisés.

Pour les densités élevées -15.6 à 22.0 lbm/gal-(1.9-2.64 SG) les dispersants et matériaux allégeant comme l'hématite sont couramment utilisés.

Elle dépend des paramètres techniques et économiques tels que les densités élevées permettent un développement d'une résistance à la compression alors que les faibles densités engendrent un volume important des laitiers mais avec de faibles propriétés mécaniques.

La densité dépend principalement des facteurs suivants :

- Gradient de fracturation,
- Pression des pores,
- Composition du ciment,
- Objectifs économiques,
- Objectifs du puits.

2.1.6 Chaleur d'hydratation

Lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau, une réaction exothermique se produit dans laquelle une chaleur considérable est libérée. Plus grande est la masse de ciment, plus importante est l'évolution de la chaleur.

La chaleur de la réaction est influencée par la composition chimique du ciment, par les adjuvants et par l'environnement en profondeur. Plus grande est la température de formation, plus rapide est la réaction et donc plus rapide est l'évolution de la température (*Dwight, 1989*)

2.1.7 Perméabilité

La perméabilité du ciment sera très variable suivant les formulations et les conditions de conservation, pouvant aller de quelques centièmes de millidarcy à quelques millidarcy. La perméabilité des laitiers de ciment affectent fortement l'isolement zonal. Une procédure opérationnelle visant à déterminer la perméabilité relative du ciment est contenue dans un système de standard dans RP 10B spécifié par l'API impliquant l'utilisation d'un perméamètre (*Dwight, 1989*).

2.1.8 Température

La température de la formation augmente, le laitier de ciment s'hydrate et développe une résistance plus rapidement.

Deux températures doivent être définies BHST (Bottom Hole Static Temperature) : température statique du fond du puits et (BHCT) (Bottom Hole Circulation Temperature) : température en circulation du fond du puits (*Dwight, 1989*).

La BHST est obtenue par une reconnaissance lors d'une diaggraphie et essais aux tiges.

La BHCT est obtenue depuis les enregistrements dans les raccords en descendant la garniture de forage durant le traitement par la boue avant la descente du tubage. C'est la température théorique rencontrée par le laitier de ciment lorsqu'il est placé dans le puits, permettant ainsi de choisir l'additif approprié pour satisfaire toutes les conditions de la cimentation.

Dans le tableau ci-dessous, on remarque une proportionnalité entre la pression et la température avec la profondeur.

Tableau 2-1 : variation de la pression et des différentes températures avec la profondeur (*Dwight, 1989*)

Profondeurs (ft)	BHST (°F)	BHCT (°F)	Pression (psi)
10000	230	144	5000
14000	290	206	10000
16000	320	248	10000

2.2 Type d'écoulement dans un espace annulaire et dans un tube

L'écoulement dans un espace annulaire peut être assimilé à un écoulement dans un tube. En écoulement permanent et en conditions isothermiques, les fluides s'écoulent soit en régime laminaire ou turbulent. Ces deux conditions d'écoulement sont séparées par une zone transitoire.

2.2.1 Ecoulement laminaire

Quand un fluide s'écoule dans un tube en régime laminaire, les particules individuelles dans le fluide avancent en suivant une ligne droite parallèle à l'axe du tube. Dans la plupart des cas les particules en contact avec les parois sont stationnaires. La vitesse des autres particules varie en fonction de leur proximité des parois. La vitesse la plus importante est celle des particules au centre comme on peut le voir dans la figure suivante. La forme du profil de vitesse d'un fluide dépend de son comportement rhéologique (*Nelson et al., 2006*).

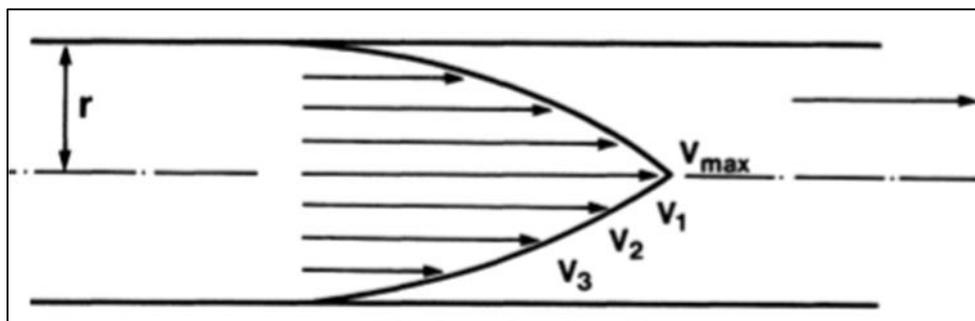


Figure 2-3 : Profil de vitesse d'un écoulement laminaire dans un tube ou dans un annulaire (*Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982*)

2.2.2 Ecoulement turbulent

Les particules tourbillonnent dans le tube dans un mouvement de roulement qui est tout à fait différent de l'écoulement laminaire. Les particules ont une composante de vitesse non parallèle à l'axe du tube comme on peut le voir dans la figure (2-6) ci-dessous, la vitesse dépend du temps. La vitesse augmente rapidement loin des parois et devient assez constante dans la majeure partie du fluide.

A faible débit, l'écoulement se fait en régime laminaire, son comportement peut être caractérisé par la viscosité, quand le débit est plus important le fluide rentre en régime transitoire avant que l'écoulement turbulent soit établi. Dans ce cas, l'écoulement devient moins dépendant de la viscosité et plus dépendant des forces d'inerties (*Nelson et al., 2006*).

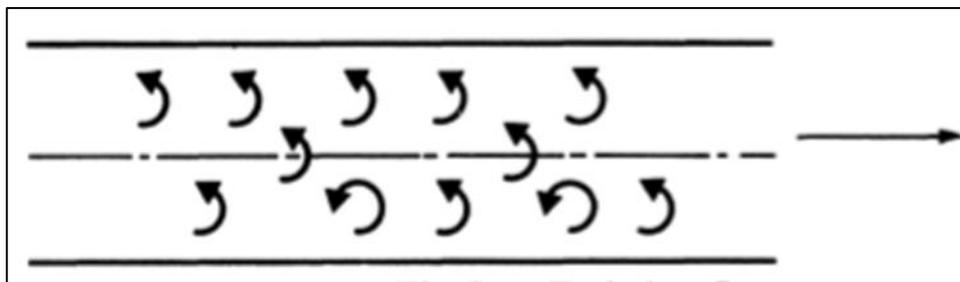


Figure 2-4 : écoulement turbulent dans un tube ou dans un annulaire (*Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982*)

2.2.3 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds caractérise l'importance des forces de viscosités par rapport aux forces d'inerties. Plus le nombre de Reynolds est faible, plus les forces de viscosité sont prépondérantes par rapport aux forces d'inerties. Il permet aussi de déterminer le régime d'écoulement en le comparant à une valeur critique. Si le nombre de Reynolds est supérieur à cette valeur, le régime est dit turbulent sinon, le régime est dit laminaire.

Pour chaque modèle rhéologique, une expression du nombre de Reynolds et sa valeur critique sont définies comme on peut le voir dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2-2 : les équations du nombre de Reynolds et leur valeur critique (*Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982*)

Modèle	Annulaire	Tube
Newton	$R_e = \rho \frac{0.8165 (D_0 - D_e) v}{\mu}$ $R_{ec} = 2100$	$R_e = \frac{D\rho v}{\mu}$ $R_{ec} = 2100$
Bingham	$R_e = \rho \frac{0.8165 (D_0 - D_e) v}{\mu}$ $R_{ec} = 2100$	$R_e = \frac{D\rho v}{\mu_e}$ $R_{ec} = 2100$
Loi puissance	$R_e = \rho \frac{0.8165 (D_0 - D_e) v}{\mu} \frac{3n}{2n + 1}$ $R_{ec} = 3470 - 1370n$	$R_e = \frac{D\rho v}{\mu_e} \frac{4n}{3n + 1}$ $R_{ec} = 3470 - 1370n$
Herschel-Bulkley unifié	$R_e = \frac{\rho v^2}{1936 \tau_w}$ $R_{ec} = 3470 - 1370n$	$R_e = \frac{\rho v^2}{1936 \tau_w}$ $R_{ec} = 3470 - 1370n$

Avec,

R_e : Nombre de Reynolds,

v : vitesse moyenne du fluide (m/s),

D_0 : Diamètre du trou (in),

D_e : Diamètre extérieur du tube (in),

R_{ec} : Nombre de Reynolds critique,

R_{eg} : Nombre de Reynolds généralisé du modèle de Herschel-Bulkley unifié,

μ : viscosité dynamique (cP),

μ_e : viscosité dynamique équivalente (cP),

ρ : masse volumique du fluide (kg/m³),

n : indice de consistance.

2.3 Les pertes de charge

Les pertes de charges représentent la résistance à l'écoulement des fluides. Elles dépendent :

- De l'écoulement,
- du circuit,
- du fluide.

Elles sont essentiellement dues aux frottements fluides avec fluide et fluide avec parois, il faut noter aussi qu'en absence d'écoulement les pertes de charge sont nulles.

Dans le cas d'un annulaire, l'équation générale de la perte de charge entre deux points séparés par une distance L, est :

$$\Delta P = 2 \frac{f_l \rho v^2}{\varphi_e} \quad (2-14)$$

Où, f est le coefficient de perte de charge et $\varphi_e = D_o - D_e$.

Cette équation varie d'un modèle rhéologique à un autre suivant le régime d'écoulement. Dans le tableau (2-3), on présente ces différentes équations pour le modèle de Bingham et le modèle de la loi de puissance.

Tableau 2-3 : les expressions des pertes de charge (Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1982)

	Modèle rhéologique	Annulaire	Tube
Ecoulement laminaire	Newton et Bingham (Re < 2100)	$f = \frac{16}{R_e}, \Delta P = 48 \frac{L \mu_e v}{(D_o - D_i)^2}$	$f = \frac{1}{R_e}, \Delta P = \frac{3}{D^2} \frac{L \mu_e v}{D^2}$
	Loi puissance (Re < 3470-1370n)	$\Delta P = 48 \frac{L \mu_e v}{(D_o - D_i)^2} \frac{2n + 1}{3n}$	$\Delta P = 32 \frac{L \mu_e v}{D^2} \frac{3n + 1}{4n}$
	Herschel-Bulkley unifié	$f_{lam} = \frac{16}{R_{eg}}, \Delta P = 1.076 f \frac{L v^2}{10^5 d_{hyd}}$	
Ecoulement transitoire	Herschel-Bulkley unifié	$f_{trans} = \frac{16 R_{eg}}{R_{ec}^2}, \Delta P = 1.076 f \frac{L \rho v^2}{10^5 d_{hy}}$	
Ecoulement turbulent	Newton et Bingham (Re > 2100)	$f_{lam} = \frac{0.05}{R_e^{0.02}}, \Delta P = 0.127 \frac{L v^{1.8} \mu_e^{0.2}}{D_o^{0.8} D_i^{0.2}}$	$f = \frac{0.05}{R_e^{0.2}}, \Delta P = \frac{0.1 L \rho^{0.8} v^{1.8} \mu_e^{0.2}}{D^{1.2}}$
	Loi puissance (Re 3470 - 1370n)	$f_{lam} = \frac{C}{R_e^b}, \text{Où } C = \frac{\log n^{2.5}}{50}, b = \frac{1.4 \log n}{7}, \Delta P = \left(\frac{2cL\rho^{1-b}v^{2-b}}{[0.8165(D_o - D_i)]^{1+b}} \right) \left(\mu_e^b \left(\frac{2n + 1}{3n} \right)^b \right)$	$f = \frac{c}{R_e^b}, \text{Où } c = \frac{1 \log n + 2}{5}, b = \frac{1.4 - 1 \log n}{7}, \Delta P = \frac{2cL\rho^{1-b}v^{2-b}}{D^{1+b}} \mu_e^b \left(\frac{3n + 1}{4n} \right)^b$
	Herschel-Bulkley unifié	$f_{turb} = \frac{a}{R_{eg}^b}, a = \frac{\log_{10} n_p^{3.93}}{50}, b = \frac{1.75 \log_{10} n_p}{7}$	

		$\Delta = 1.076f \frac{L v^2}{10^5 d_{hy}}$
--	--	---

Avec,

P : Perte de charge (Pa),

μ_e : Viscosité dynamique équivalente (cP),

d_{hyd} : Diamètre hydraulique (in),

ρ : Densité du fluide considéré (kg/m^3),

R_e : Nombre de Reynolds,

R_{eg} : Nombre de Reynolds généralisé.

L : longueur de la colonne de fluide (m)

v : vitesse de déplacement du fluide (m/s)

Remarque

Dans le cas du modèle de Herschel-Bulkley unifié le coefficient de perte de charge est calculé pour le cas laminaire et turbulent comme il suit (Zamora et al., 2005) :

Avec,

$$f = f_{int}^{12} + f_{lam}^{12} \frac{1}{R_e^2}$$

$$f = f_{tran}^{18} + f_{turb}^{18} \frac{1}{R_e^2}, \quad f_{lam} = \frac{16}{R_{eg}}, \quad f_{trans} = \frac{16 R_{eg}}{R_{ec}^2} \quad \text{et} \quad f_{turb} = \frac{a}{R_{eg}^b}$$

f_{int} : coefficient de frottement intermédiaire

2.4 Densité de circulation équivalente (ECD)

Lors de l'écoulement d'un fluide, la pression « dynamique » exercée par la colonne de fluide au fond du trou et la pression équivalente en tout point dans l'annulaire augmente. Cette augmentation résulte des forces de frottement et des pertes de charge.

La densité de circulation équivalente ECD dans un annulaire d'une hauteur h est la somme de :

- > P_h : La pression hydrostatique exercée par la colonne de fluide a une profondeur h,
- > P_a : Les pertes de charge causées par le mouvement du fluide de la profondeur h à la surface.

$$ECD = P_h + P_a \tag{2-6}$$

2.5 Conclusion

D'après ce chapitre, on conclut que les propriétés de chaque fluide sont complexes car elles dépendent du fluide lui-même mais aussi du milieu dans lequel il s'écoule. Leur connaissance est indispensable pour faire une bonne réalisation et organisation de l'opération de la cimentation.

Afin de connaître l'impact du milieu sur le comportement du fluide, il est nécessaire de comprendre son interaction et échange avec d'autres fluides. C'est pourquoi, nous allons décrire le phénomène physique dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Description du phénomène physique se produisant lors de la cimentation

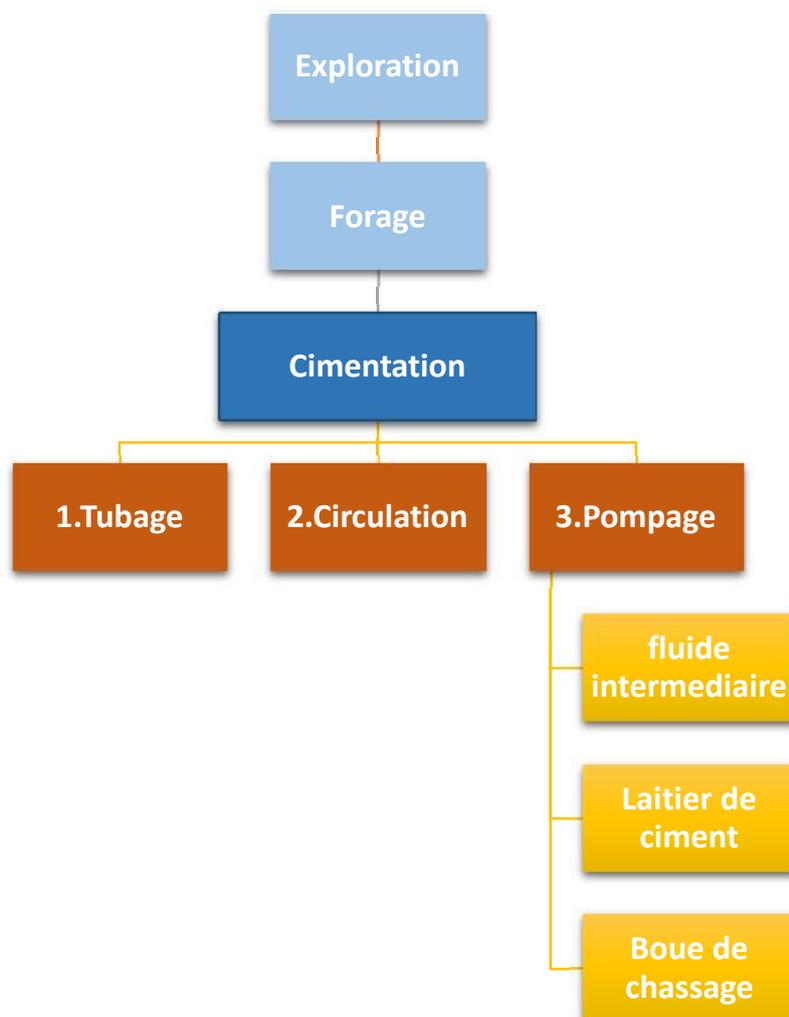
3. Description du phénomène physique se produisant lors de la cimentation

3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous allons décrire en détail ce qui se passe du point de vue physique et mécanique dans le tube et l'annulaire lors de l'étape de la cimentation ainsi que le comportement ultérieur de chaque fluide dans le tube lorsque le puits est soumis à des charges au cours de sa durée de vie.

3.2 Organigramme du déroulement de la cimentation primaire

La réussite de l'opération de la cimentation primaire nécessite une bonne connaissance du domaine et aussi une bonne organisation et gestion des étapes. Dans l'organigramme ci-dessous nous avons résumé les principales étapes à suivre afin de pouvoir introduire par la suite les phénomènes physiques qui se produisent lors de la cimentation.



3.1: organigramme de l'opération de la cimentation

3.3 Cimentation

La mise en place du ciment dans l'annulaire, repose principalement sur :

3.3.1 Tubage

Une fois que le forage d'une section donnée soit terminé, on fait descendre une série de tube (la longueur de chaque tube vaut 12 m selon la norme API) de diamètre normalisé et inférieur au diamètre de l'outil de forage. Le sabot est le premier élément à être introduit muni d'un clapet anti retour suivi par l'anneau de retenu après avoir été raccordé à deux ou à trois tubes afin de garder dans cet espace le laitier soit en surplus ou pouvant être contaminé par le dernier raclage du bouchon supérieur. On poursuit l'assemblage jusqu'à ce que le sabot soit surélevé de 5 à 10 m au-dessus du fond pour permettre le passage des fluides du tube vers l'annulaire. A ce moment, on maintient la série de tube préalablement équipés de centreurs et de gratteurs, suspendue à la surface grâce à la tête de ciment. Cette opération nécessite une bonne application et précision pour éviter tout risque de coincement ou de contact endommageant la formation.

3.3.1.1 Problème d'excentricité

Il faut noter que malgré tous les efforts que fournissent les ingénieurs pour centrer le tube, il est impossible d'obtenir un résultat parfait dû principalement à la forme non homogène du trou. Le diamètre est non constant car suivant la nature de la roche qu'on doit forer, il peut être plus grand ou moins que celui de l'outil de forage, ce qui complique l'opération du tubage et particulièrement la centralisation. Dans le cas du forage horizontal cela devient encore plus compliqué car en plus des raisons citées précédemment, la gravité aura pour effet de rapprocher le tube des parois inférieure du trou.

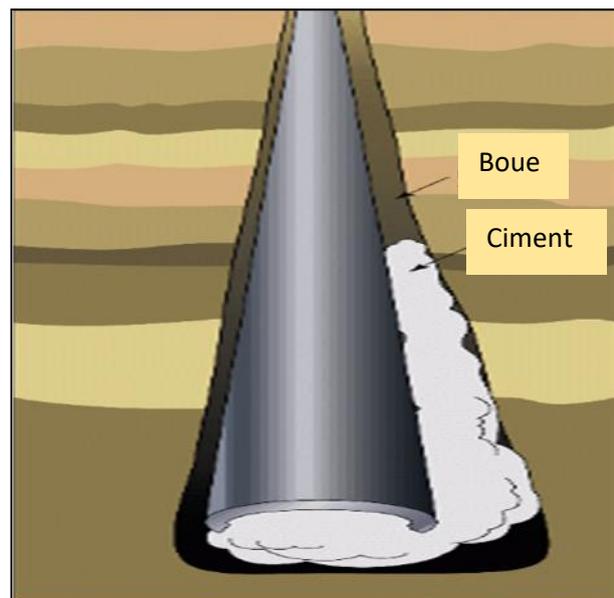


Figure 3-1 : Conséquences de l'excentricité sur le déplacement des fluides

3.3.2 Circulation de la boue

Pour assurer le succès de la cimentation, il est primordial de faire circuler une à deux fois de la boue ayant un comportement non-newtonien de type viscoplastique. La circulation est effectuée en régime turbulent afin de nettoyer le puits du reste des agrégats issus du forage ou lors du tubage. Cette étape est indispensable car elle permet de stabiliser relativement la température tout au long de la période de pompage. Lors de cette opération différents phénomènes peuvent se produire affectant ainsi les conditions dans le puits.

3.3.2.1 Perte de circulation

La perte de circulation est définie comme la perte de fluide totale ou partielle dans des zones de grande perméabilité, des cavités dans la formation, pouvant se produire aussi dans des zones fracturées lors du forage ou lors de l'opération de la cimentation. Elle ne doit pas être confondue avec les pertes de fluides qui sont en rapport avec la porosité primaire (*Dwight, 1989*).

Ñ Conséquences de la perte de circulation

Ce phénomène peut causer différents problèmes tels que :

- Réduction de l'espace annulaire.
- Faible isolation zonale.
- Augmentation des risques d'effondrement et d'éruption.
- Perte de volume des fluides injectés.

Ñ Mécanismes de perte de circulation

On définit deux mécanismes responsables de la perte de circulation :

- Pertes naturelles : causées par une perméabilité importante, une formation non consolidée, fracturée ou présence de cavité.
- Pertes induites : causées par l'application excessive des pressions qui fracturent la formation.

3.3.2.2 Formation du filtercake

Quand la pression dans une formation perméable est moins importante que celle dans l'annulaire, une partie de la phase liquide de la boue est absorbée par la formation et une partie de sa phase solide reste accrochée aux parois, ce qu'on appelle un filtercake « gâteau de filtration ». L'efficacité du nettoyage de l'annulaire se réduit ce qui fait augmenter les pertes de charge. Dans la situation extrême, le filtercake bouche l'annulaire. Mais dans le cas où le filtercake est d'épaisseur négligeable par rapport aux dimensions de l'annulaire, il permet de :

- Ñ Régulariser la géométrie.
- Ñ Homogénéiser la rugosité et lisser les parois du trou.
- Ñ Représenter une première isolation entre le tube et la formation.

Remarque

Pour que ces résultats soient obtenus, un mouvement du tube rotatif ou alternatif est effectué afin de bien fixer et adhérer le filtercake aux parois.

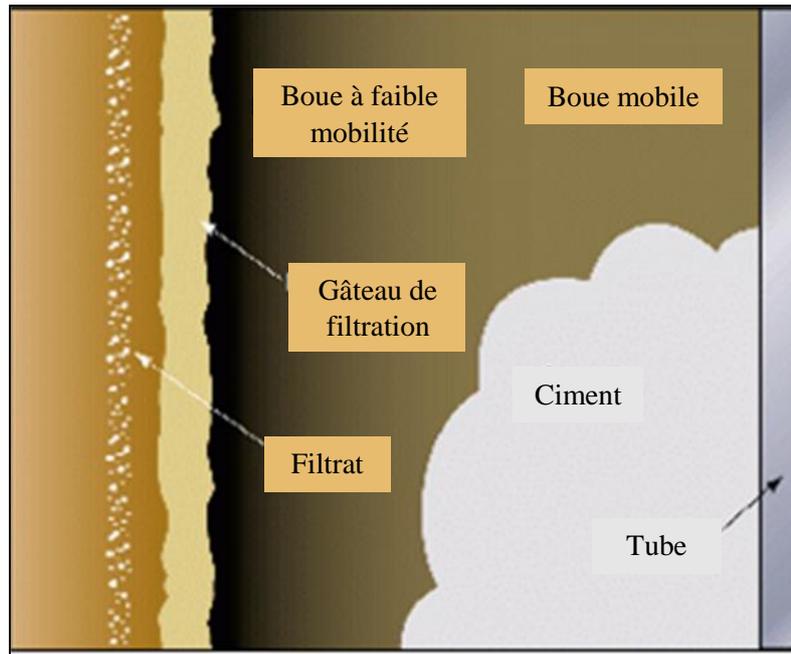


Figure 3-2 : illustration du phénomène de la filtration

3.3.3 Pompage : fluides non miscibles

Une fois l'annulaire prêt à être cimenté, on entame l'opération de pompage des différents fluides suivants :

3.3.3.1 Fluide intermédiaire

On pompe un volume de fluide intermédiaire de rhéologie dépendant du spacer (Preflush) utilisé. Le pompage du spacer peut s'effectuer soit en :

- Ñ Régime laminaire : dans le cas où le fluide intermédiaire est visqueux après l'ajout d'additifs (Bentonites ou polymères) afin d'éviter tout risque de sédimentation des particules solides non remontées par la boue en circulation.
- Ñ Régime turbulent : c'est le cas préférable pour avoir un bon nettoyage de l'annulaire utilisé dans avec les fluides visqueux.

Il faut noter que le filtercake reste en place malgré le passage du spacer, car ce dernier ne possède pas un pouvoir érosif important surtout en régime laminaire (Lavrov, 2016).

3.3.3.2 Laitier

Après le largage du bouchon inférieur, on pompe le laitier de ciment liquide ayant une densité importante. Dans certains cas, on injecte deux laitiers léger et dense (tail et lead cement) de telle sorte que la densité du premier soit inférieure à celle du second. Leurs déplacements dans le tube seront aussi affectés par leurs propres poids. De par sa viscosité, le laitier de ciment s'écoule généralement en régime laminaire dans le tube ou l'annulaire et s'adhère ainsi totalement aux parois. Le laitier est un fluide non newtonien et il peut suivre différents modèles rhéologiques.

Le temps de prise est un paramètre important sur lequel repose toute l'organisation de l'opération de pompage, il est déterminé en effectuant des essais en laboratoire selon les conditions réelles du trou.

3.3.3.3 Boue de chassage

Après que tout le ciment soit pompé, on injecte de la boue dans le puits. Comme la boue de forage, celle du chassage a aussi un comportement non newtonien de type viscoplastique. Caractérisé par un débit important, une faible densité et une viscosité bien particulière, ce fluide affectera l'équilibre des forces permettant un déplacement efficace des différents fluides entre le tubage et l'annulaire tenant compte des conditions du puits. McLean et al. (1967) ont constaté que les fluides de déplacement visqueux sont plus efficaces que les fluides non visqueux et aussi que l'efficacité est proportionnelle au débit de pompage. De ce fait, on a un meilleur rendement en régime turbulent causant ainsi des pertes de charge plus importante.

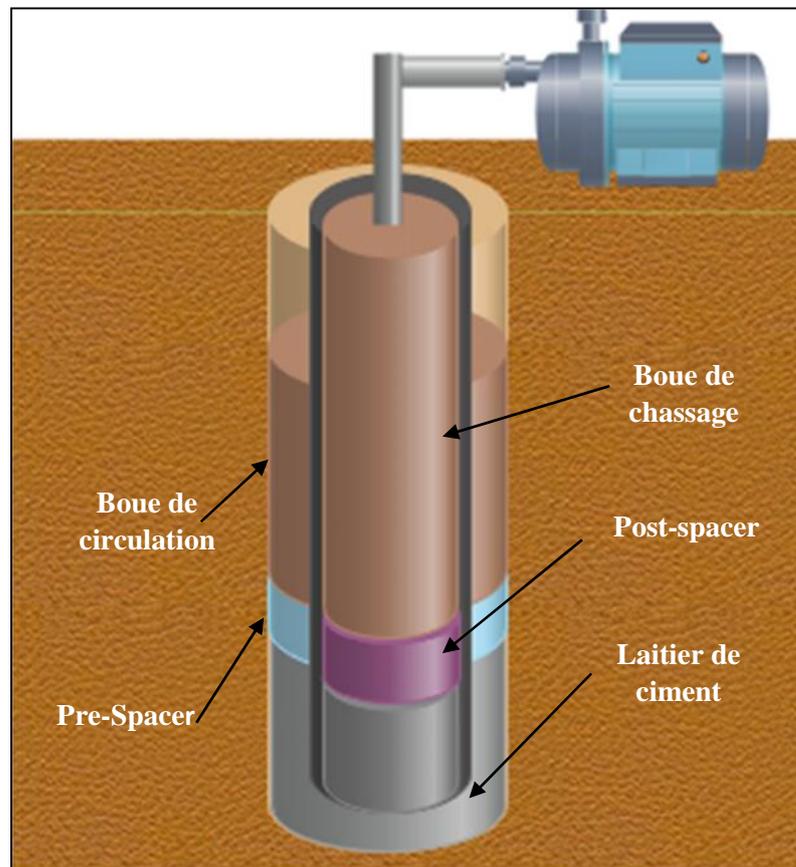


Figure 3-3 : pompage des différents fluides

3.3.4 Perte de fluide

Le processus de perte de fluide est l'infiltration des différents fluides utilisés lors de la cimentation à travers les vides et les pores de la formation.

Un contrôle insuffisant des pertes de fluide peut être responsable des défaillances de la cimentation primaire de plus la présence de filtrat de ciment dans la formation peut causer des dommages et réduit la production. D'autre part, la perte de fluide peut avoir certains avantages,

tels que l'amélioration de la liaison entre le laitier et la formation et l'augmentation de la pression de fracturation (*Dwight, 1989*).

Ñ Inconvénients des pertes de fluide

Les avantages cités ci-dessus ne compensent généralement pas les inconvénients suivants :

- > Les pertes de fluides augmentent la quantité des solides lors de l'écoulement du laitier. Ce qui modifie ses propriétés, sa densité, sa viscosité et la perte du volume de fluide introduit initialement.
- > Le filtrat qui entre dans la formation interagit avec les minéraux, modifie les propriétés de la roche et le profil de saturation. Tous ces effets sont généralement connus comme des dommages pour la formation.

3.4 Paramètres affectant le déplacement

L'un des premiers paramètres influençant l'efficacité du déplacement des différents fluides est le régime d'écoulement du fluide déplaçant. D'après leurs études, Howard et Clark (1948) ont conclu que, lorsque le nombre de Reynolds du laitier de ciment est faible, seulement 60 % de boue « circulaire » serait déplacée, alors que 90 à 95 % est déplacée lorsque le laitier de ciment se déplace en régime laminaire ou dans le régime turbulent.

Le déplacement efficace d'un fluide par un autre résulte de l'interaction entre différentes forces. Certaines forces aident au déplacement, tandis que d'autres résistent. Ces forces comprennent la flottabilité, la viscosité, l'inertie et d'autres propriétés rhéologiques comme la contrainte d'élasticité et la force du gel. Les effets physico-chimiques doivent également être pris en compte, mais ils sont plus difficiles à inclure dans les modèles. Ces forces sont étroitement liées à divers paramètres. Par exemple, les forces de flottabilité sont une fonction directe des différences de densité et de l'inclinaison des trous, tandis que les forces visqueuses sont des fonctions de la rhéologie des fluides, de la géométrie du puits et des conditions d'écoulement (*Lavrov, 2016*).

3.4.1 Effet de la densité

A faible débit, le déplacement vers le haut d'un fluide dense par un autre léger dans une conduite verticale conduit à un phénomène instable. Inversement, lorsque le liquide de déplacement est plus lourd que le liquide déplacé, les forces de flottabilité ont tendance à aplanir l'interface et à favoriser un déplacement efficace.

3.4.2 Effet de la viscosité

Le déplacement d'un fluide visqueux par un fluide moins visqueux de densité identique conduit à une digitation visqueuse, dans laquelle un flux du fluide moins visqueux franchit l'interface et pénètre dans le fluide plus visqueux. Inversement, le déplacement d'un fluide mince par un fluide plus visqueux conduit à un meilleur déplacement.

3.4.3 Phénomène de U-tube (chute libre)

Il est souvent utile de visualiser le puits comme étant un tube en U. Une colonne de tube représente l'annulaire et l'autre colonne représente l'intérieur du tubage. Le fond du tube en U représente le fond du puits.

Généralement la densité du laitier et du spacer est plus importante que celle de la boue de circulation se trouvant déjà dans l'annulaire. Lorsque le laitier de ciment et / ou le spacer sont pompés dans le tube, la différence de densité entre la colonne de fluide dans le tube et la colonne de fluide dans l'anneau crée un déséquilibre de force hydrostatique. Si la différence de pression hydrostatique dépasse le frottement du système, la colonne de fluide plus lourde accélérera. En conséquence, le débit de chute de la colonne de ciment dans le tube sera supérieur au débit de pompage en surface, ce qui créera un écart « discontinu » entre le ciment en chute et la tête de puits. C'est ce que l'on appelle souvent « U-Tube » ou « phénomène de chute libre ».

Au début de la chute libre, l'espace discontinu est inexistant. Au fur et à mesure que la colonne de fluide plus lourd accélère, l'écart augmente et finit par atteindre une valeur maximale ainsi que la vitesse de chute du ciment. La colonne en chute commencera alors à décélérer à mesure que la surpression diminuera, et l'écart deviendra éventuellement inexistant à nouveau. Pendant la période de décélération, le débit de chute libre diminuera à une valeur inférieure au débit de pompage en surface. L'effet de chute libre durera jusqu'à ce que l'équilibre hydrostatique soit atteint entre le tube et l'annulaire.

Le phénomène de chute libre pose certains problèmes liés au contrôle du débit. Premièrement, il est difficile de suivre avec précision les niveaux de fluide, car les débits dans le puits diffèrent de ceux de la pompe de forage. Deuxièmement, pendant la période de chute libre, le débit sortant de l'annulaire dépasse le débit de pompage. En outre, lorsque l'espace discontinu diminue (le fluide pompé par la pompe de l'appareil remplit l'espace), le débit sortant est inférieur au débit de la pompe. En raison des différents débits, la pression au fond du puits (P_{dha}) fluctuera. Il est important de réduire cette fluctuation, en particulier dans les intervalles de pression opérationnels étroits. En outre, tant qu'il existe un intervalle discontinu, aucune mesure de pression en surface n'est disponible, ce qui réduit le contrôle de l'exploitation par les opérateurs (*Bekken et Ullsfoss, 2017*).

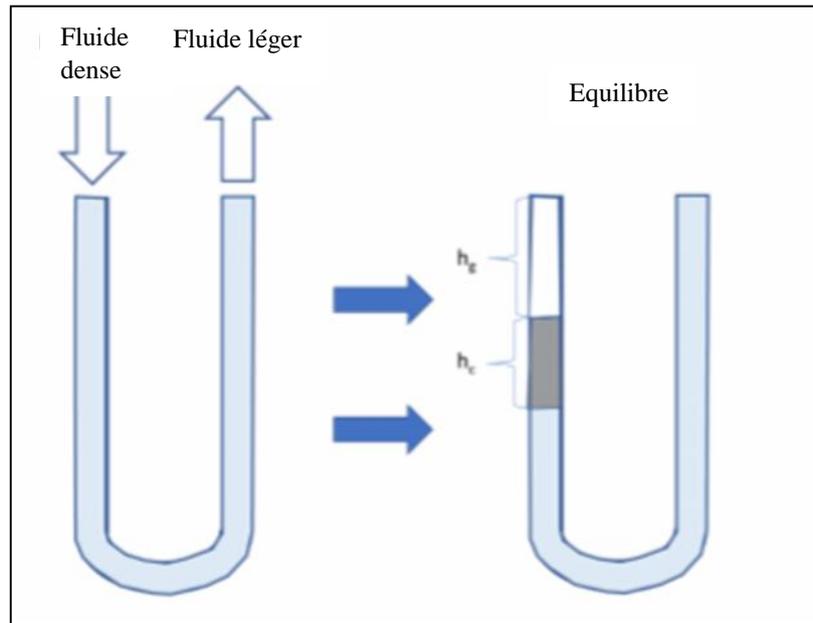


Figure 3-4 : illustration du phénomène U-tube simplifié (Bekken et Ullsfoss, 2017)

3.5 Temps de pompage

Il est déterminé par rapport au temps de prise du laitier et la durée du pompage des différents volumes de fluide pompés dans l'annulaire. Par mesure de sécurité, la formulation du laitier est faite de telle sorte que le temps de prise soit au minimum deux fois plus supérieur que le temps de pompage.

3.6 Conclusion

Après avoir vu le chapitre présent, on peut conclure que le phénomène physique se déroulant lors de l'opération de la cimentation est tellement complexe nécessite une bonne compréhension afin de pouvoir le traduire en modèle mathématique en faisant des hypothèses fondées et cohérentes.

Le chapitre suivant englobera les différentes équations et les simplifications décrivant l'écoulement des différents fluides pompés lors de la cimentation dans l'annulaire et le tube.

Partie 2

Modélisation

Chapitre 4

Modélisation mathématique de l'écoulement d'un fluide dans un tube ou dans un annulaire

4. Modélisation mathématique de l'écoulement d'un fluide dans un tube ou dans un annulaire

4.1 Introduction

Le pompage lors de l'opération de la cimentation provoque l'écoulement de fluides successifs à travers le tube et l'annulaire. Cet écoulement est régi par les équations de base de la mécanique des fluides. La vitesse et la pression dépendent des propriétés des fluides, de l'interaction physique entre eux et de la méthode de cimentation.

Modéliser le comportement de l'écoulement dynamique dans un puits, nécessite l'élaboration d'un modèle mathématique.

Dans ce présent chapitre, nous allons définir les forces qui rentrent en jeu en présence d'un fluide dans le tube ou dans l'annulaire, et présenter les différentes hypothèses nécessaires pour la résolution du modèle mathématique.

4.2 Schéma de l'écoulement des fluides dans un tube ou dans un annulaire

Les fluides pompés par l'unité de cimentation, vont s'écouler de la surface vers le fond du puits à travers le tube encre, pour ensuite remonter du fond jusqu'à la surface ou à une hauteur donnée à travers l'annulaire. Lors de leur écoulement plusieurs forces volumiques et surfaciques rentrent en jeu. Ces forces appliquées sur un élément de volume d'un fluide ΔV sont représentées sur les schémas suivant :

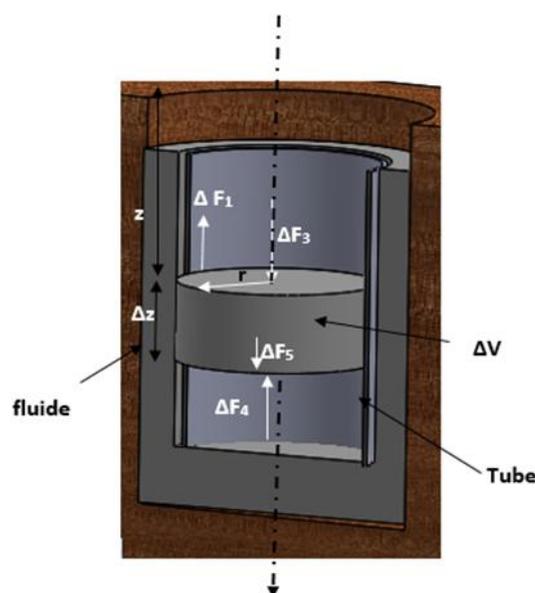


Figure 4-1 : schéma de l'élément de volume d'un fluide dans le tube

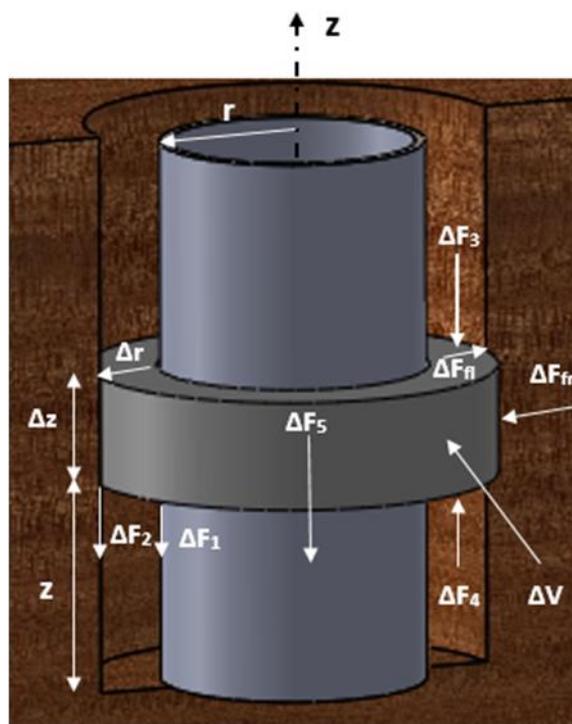


Figure 4-2 : schéma de l'élément de volume d'un fluide dans l'annulaire

Avec,

- F_1 : Force de frottement entre le tube et le fluide.
- F_2 : Force de frottement entre le fluide et la formation.
- F_3 : Force de pression appliquée sur l'élément.
- F_4 : Force de pression appliquée sous l'élément.
- F_5 : Poids de l'élément.
- F_{fr} : Force de la formation sur le fluide.
- F_{fl} : Force du fluide sur la formation.
- S : Surface de la base de l'élément.
- S_1 : Surface de contact entre le tube et le fluide.
- S_2 : Surface de contact entre le fluide et la formation
- V : Volume de l'élément.
- z : Position de l'élément par rapport à l'axe OZ.
- z : Hauteur de l'élément.
- r : rayon du tubage.
- R : Rayon du trou.
- dr : variation du rayon.

4.3 Développement mathématique

Dans notre cas, la plupart des fluides utilisés sont visqueux, de ce fait leur écoulement peut être décrit par les équations fondamentales suivantes :

- Equation du modèle rhéologique.
- Equation d'état.
- Equation de continuité.
- Equation de conservation de la quantité de mouvement.

Vu la complexité du phénomène, il a été indispensable d'émettre les hypothèses suivantes afin de simplifier et pouvoir résoudre nos équations :

- ✓ Homogénéité : On considère que les propriétés des fluides sont indépendantes des coordonnées spatiales.
- ✓ Isotropie : On considère que les propriétés des fluides sont constantes dans toutes les directions.
- ✓ Milieu continu : Les propriétés des fluides sont des fonctions continues de l'espace et du temps
- ✓ Ecoulement unidimensionnel : Les fluides se déplacent suivant l'axe OZ seulement soit vers le haut ou vers le bas.
- ✓ Fluide incompressible : La variation temporelle et spatiale de la densité est négligée dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Cependant, les principaux effets de compressibilité du fluide sont pris en compte en combinant l'équation d'état à l'équation de conservation de la masse.
- ✓ Isotherme : Vu que la variation de la température est considérée sur une échelle allant de minutes aux heures, et que la variation du temps que nous allons considérer est sur une échelle de seconde, on considère alors que notre système est isotherme.
- ✓ Non permanent : Le débit est variable, donc la pression et la vitesse dépendent du temps
- ✓ Système axisymétrique : On suppose qu'il n'y a pas d'inclinaison du tube et l'axe du trou et du tube sont confondus.

4.3.1 Equation d'état

La masse volumique peut être décrite selon l'équation suivante, en se basant sur une interpolation des données P, V et T (pression, volume et température) :

$$\rho = \rho(P, T) \quad (4-1)$$

Le changement de la masse volumique d'un liquide est en fonction de la température et de la pression. Il est décrit généralement par l'équation d'état sous la forme linéaire suivante :

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \alpha (T - T_0) + \beta (P - P_0) \right] \quad (4-2)$$

...0, T₀, et P₀ sont la densité, la température et la pression à un point de référence de la linéarisation.

En introduisant les propriétés matérielles, le module isotherme d'élasticité, et le coefficient cubique d'expansion, l'équation (4-2) devient :

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \alpha (T - T_0) + \frac{1}{K} (P - P_0) \right] \quad (4-3)$$

Par définition, nous avons :

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P, \rho} \quad (4-4)$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{T, \rho} \quad (4-5)$$

L'équation (4-3) peut alors être écrite sous la forme différentielle :

$$d\rho = \rho \left[\alpha dT + \frac{1}{K} dP \right] \quad (4-6)$$

La précision de la linéarisation citée ci-dessus diminue si la pression et la température augmentent. Celle-ci reste exacte pour la plupart des fluides de forage pour les pressions allant de 0 à 500 bars et des températures allant de 0 à 200 °C (*Isambourg et al., 1996 ; Kaasa et al., 2012*).

Un gradient de température existe dans le puits mais la variation de la masse volumique due au changement de la température est faible, alors α est généralement faible (*Kaasa et al., 2012*).

Comme mentionnée auparavant, la diminution de la température est négligeable donc la linéarisation peut être simplifiée comme suit :

$$d\rho = \frac{\rho}{K} dP \quad (4-7)$$

4.3.2 Equation de continuité

L'équation de conservation de la masse affirme que le débit d'entrée est égal à celui de la sortie d'un système, plus une accumulation de masse due à l'effet de compressibilité :

$$\frac{\partial}{\partial t} \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4-8)$$

En coordonnées cylindriques, l'équation de continuité s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r v_z) = 0 \quad (4-9)$$

Dans un écoulement homogène unidimensionnel, on peut dire que le vecteur de vitesse s'écrit en fonction de la composante z seulement, tel que :

$$\mathbf{v} = v_z \mathbf{e}_z$$

L'équation de continuité s'écrit dans ce cas :

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial z} (r v_z) = 0 \quad (4-10)$$

Où, v_z est la vitesse du fluide et z est la variable spatiale définie selon l'axe de l'écoulement.

En remplaçant l'équation (4-7) dans l'équation (4-10) et en supposant que la section $A(z)$ est constante, l'équation de continuité devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial z} (q) = 0 \quad (4-11)$$

Où, q est le débit d'écoulement à travers une section transversale A .

De plus, l'écoulement est supposé spatialement incompressible, c'est-à-dire $\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$ et

l'équation (4-10) intégrée dans un volume de contrôle V , donne l'équation de continuité sous sa forme standard intégrale (Kaasa et al., 2012).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dV + \int_{\partial V} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, dA = 0 \quad (4-12)$$

Où, ρ est la masse volumique moyenne à l'intérieur du volume de contrôle homogène V .

\dots , q_{in} , \dots , q_{out} sont les flux de masse entrant et sortant du contrôle de volume respectivement.

Afin d'avoir la pression comme variable principale, on remplace l'équation (4-7) dans l'équation (4-12), créant ainsi une équation modélisant la variation de la pression à n'importe quelle profondeur du puits.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dV + \int_{\partial V} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, dA = 0 \quad (4-13)$$

Où, P est la pression à l'intérieur du volume de contrôle.

En se basant sur l'hypothèse que la masse volumique est spatialement homogène $\rho_{in} = \rho_{out}$, on obtient :

$$\frac{V}{\tau} \frac{dP}{dt} = \frac{V}{\tau} \frac{dP}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (4-14)$$

Durant l'opération de la cimentation, plusieurs fluides sont présents dans le tube et l'annulaire au même moment. De ce fait, on modifie l'équation précédente afin de l'appliquer sur un système hydraulique composé de trois fluides.

Le tubage et l'annulaire sont modélisés en un système hydraulique composés de trois fluides différents.

En créant plusieurs volumes de contrôle, V_{d1} , V_{d2} et V_{d3} , l'équation (4-14) peut être séparée en trois (03) équations (*Stamnes et al., 2012*), décrivant la pression dynamique dans chaque fluide :

$$\frac{V_{d1}}{\tau} \frac{dP_1}{dt} = \frac{V_{d1}}{\tau} \frac{dP_1}{dt} = q_{in,1} - q_{out,1} \quad (4-15)$$

$$\frac{V_{d2}}{\tau} \frac{dP_2}{dt} = \frac{V_{d2}}{\tau} \frac{dP_2}{dt} = q_{in,2} - q_{out,2} \quad (4-16)$$

$$\frac{V_{d3}}{\tau} \frac{dP_3}{dt} = \frac{V_{d3}}{\tau} \frac{dP_3}{dt} = q_{in,3} - q_{out,3} \quad (4-17)$$

Où, d_1 , d_2 et d_3 représentent les différents fluides dans le tube ou l'annulaire.

De plus, la variation de pression est supposée constante dans n'importe quel point du tube, c'est-à-dire, $\dot{P} = \dot{P}_1 = \dot{P}_2 = \dot{P}_3$ et $q_{out,3} = q_{in,2}$ et $q_{out,2} = q_{in,1}$.

Les équations (4-15), (4-16) et (4-17) sommées entre elles, donnent :

$$\frac{V_{d1}}{\tau} \frac{dP}{dt} + \frac{V_{d2}}{\tau} \frac{dP}{dt} + \frac{V_{d3}}{\tau} \frac{dP}{dt} = q_{in,3} - q_{out,1} \quad (4-18)$$

Le volume total dans le tube ou dans l'annulaire est constant, ce qui veut dire une augmentation de volume du fluide 3, provoque une diminution du volume du fluide 1 de la même quantité, c'est-à-dire $\dot{V}_{d3} = -\dot{V}_{d1}$ et $\dot{V}_{d2} = 0$, du fait qu'il n'y a pas d'échange du fluide 2 avec le milieu extérieur.

L'équation (4-18) peut alors être simplifiée, et on a alors :

$$\frac{V_{d1}}{\tau} \frac{dP}{dt} + \frac{V_{d2}}{\tau} \frac{dP}{dt} + \frac{V_{d3}}{\tau} \frac{dP}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (4-19)$$

Afin d'implémenter par la suite un programme régissant l'écoulement, une relation est donnée pour calculer les volumes des différents fluides. A l'instant initial t_0 , les volumes initiaux sont V_{d1}^0 , V_{d2}^0 et V_{d3}^0 . Les volumes sont donnés comme solutions des équations différentielles suivantes :

$$\dot{V}_{d1} = -q_{out} \quad (4-20)$$

$$\dot{V}_{d2} = 0 \quad (4-21)$$

$$\dot{V}_{d3} = q_{in} \quad (4-22)$$

Ces équations ne considèrent pas les effets de compressibilité, et ne seront pas valides durant les transitions. Ces équations vont surestimer les volumes si les pressions augmentent. Afin de prendre en compte les effets de compressibilité, les volumes sont normalisés pour s'assurer que :

$$V_{d1} + V_{d2} + V_{d3} = V_{tot} \quad (4-23)$$

$$V_{d1} = k V_{d1}^c \quad (4-24)$$

$$V_{d2} = k V_{d2}^c \quad (4-25)$$

$$V_{d3} = k V_{d3}^c \quad (4-26)$$

$$k = \frac{V_{tot}}{V_{d1}^c + V_{d2}^c + V_{d3}^c} \quad (4-27)$$

V_{tot} est le volume total dans le tube. Les équations (4-24), (4-25) et (4-26) considèrent les effets de compressibilité sans tenir compte les différentes compressibilités des fluides. Du fait que le ciment est moins compressible que la boue, le ciment sera moins compressé que la boue. Afin de définir les différentes compressibilités des fluides, les coefficients isothermes d'élasticité de chaque fluide sont définis comme suit :

$$\beta_{d1} = \frac{1}{V_{d1}} \frac{dV_{d1}}{dP} \quad (4-28)$$

$$\beta_{d2} = \frac{1}{V_{d2}} \frac{dV_{d2}}{dP} \quad (4-29)$$

$$\beta_{d3} = \frac{1}{V_{d3}} \frac{dV_{d3}}{dP} \quad (4-30)$$

Où, les volumes des fluides 1, 2 et 3 sont comprimés de V_{di}^c à V_{di} dû à une différence de pression P et V_{di}^c sont les solutions des équations (4-20), (4-21) et (4-22). En réarrangeant les dernières équations, le volume réel des différents fluides sont calculés à partir des équations suivantes :

$$V_{d1} = V_{d1}^c \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma_1}} \quad (4-31)$$

$$V_{d2} = V_{d2}^c \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma_2}} \quad (4-32)$$

$$V_{d3} = V_{d3}^c \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma_3}} \quad (4-33)$$

4.3.3 Equation de la conservation de la quantité de mouvement

L'application du principe fondamentale de la dynamique sur un élément de volume conduit à l'utilisation de l'équation suivante :

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \sum \vec{F}_i$$

Les efforts extérieurs appliqués sur l'élément sont :

- des forces volumiques : des forces normales de pression,
- des forces surfaciques : des forces dues aux frottements des particules de fluides entres elles, et celles dues aux frottements entre solide (tube, formation) et fluide.

L'équation sous forme non conservative correspond donc à l'écriture classique de la loi fondamentale de la dynamique.

$$m \vec{a} = \sum \vec{F}_i \quad (4-34)$$

Avec, \vec{F} : Forces volumiques et surfaciques ; m : La masse de l'élément et \vec{a} : l'accélération (m^2/s).

En divisant l'équation (4-34) par le volume de l'élément V , on obtient l'équation de la quantité de mouvement suivante :

$$\frac{m \vec{a}}{V} = \frac{\sum \vec{F}_i}{V} \quad (4-35)$$

$$\frac{\rho V \vec{a}}{V} = \sum Q_i = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{F}_i}{V} \quad (4-36)$$

- $F_1 = (\rho) S_1 v_1$
- $F_2 = (\rho) S_2 v_2$
- $F_3 = P(z) S$
- $F_4 = P(z + \Delta z) S$
- $F_5 = m g \cos(\alpha) = \rho V g \cos(\alpha)$ avec α inclinaison du tube dans le trou.
- $S_1 = 2\pi r_1 \Delta z$
- $S_2 = 2\pi r_2 \Delta z$
- $S = \pi (r_2^2 - r_1^2)$
- $V = \pi (r_2^2 - r_1^2) \Delta z$

Remarque : la formulation des fluides est faite de telle sorte qu'ils s'opposent à la résultante des forces de pression appliquées par la formation. Donc : $F_{fr} = F_{fi}$

$$\sum Q_i = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\rho \Delta z (v_1 S_1 - v_2 S_2) + P(z) S - P(z + \Delta z) S + \rho V g \cos(\alpha)}{\Delta z} \quad (4-37)$$

$$\sum Q_i = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\rho \Delta z (v_1 S_1 - v_2 S_2) + P(z) S - P(z + \Delta z) S + \rho V g \cos(\alpha)}{\Delta z}$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\rho \Delta z (v_1 S_1 - v_2 S_2) + P(z) S - P(z + \Delta z) S + \rho V g \cos(\alpha)}{\Delta z} = \rho (v_1 S_1 - v_2 S_2) + P(z) S - P(z) S + \rho V g \cos(\alpha)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \rho (v_1 S_1 - v_2 S_2) + \rho V g \cos(\alpha) \quad (4-38)$$

Système excentrique ce qui implique : $\cos(\alpha) = 1$

Donc l'équation de conservation de quantité de mouvement en coordonnées cylindrique qui régit notre écoulement est :

$$\frac{dQ}{dt} = \rho (v_1 S_1 - v_2 S_2) + \rho V g \cos(\alpha) \quad (4-39)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \rho (v_1 S_1 - v_2 S_2) + \rho V g \cos(\alpha) \quad (4-40)$$

En général, une équation décrit un débit moyen dans un volume de contrôle donné entre le point z_1 et z_2 , peut être écrite comme suit :

$$M(z_1, z_2) \frac{\partial q}{\partial t} = P(z_1) - P(z_2) - F(q, \mu, z_1, z_2) + G(\rho, z_1, z_2) \quad (4-41)$$

Avec,

$$M(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho(z)}{S(z)} dz$$

$$F(q, \mu, z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial \tau}{\partial z} dz$$

$$G(\rho, z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \rho(z) g dz$$

Où, $P(z_1, z_2)$ est la pression entre z_1 et z_2 et respectivement $G(z_1, z_2)$ est la différence de pression hydrostatique entre z_1 et z_2 , $F(q, \mu, z_1, z_2)$ représente les pertes de charge totale tout en long du parcours du fluide avec μ comme viscosité et $M(z_1, z_2)$ est l'intégrale de la masse volumique par la section $S(z)$ tout au long de la distance parcourue (*Kaasa et al., 2012*).

4.4 Calcul des pertes de charge

Afin de prédire l'écoulement dans l'annulaire et dans le tube, une estimation des pertes de charge est nécessaire qui dépendent particulièrement de la rhéologie des fluides. Le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley unifié est reconnu comme le modèle fournissant la prévision la plus réaliste possible du comportement des fluides non newtoniens dans un tube et dans un annulaire (*Zamora et al. 2005*).

4.5 Calcul des pressions dynamiques

En appliquant l'équation de continuité finale (4-19), à la pompe et en considérant les conditions aux limites au niveau du tube, nous pourrions alors écrire :

$$\left(\frac{V_m^p}{\beta_m} + \frac{V_c^p}{\beta_c} + \frac{V_s^p}{\beta_s} \right) \frac{\partial P_p}{\partial t} = q_p - q_o \quad (4-42)$$

Remarque

- Les indices m, c et s correspondent à la boue, ciment et spacer respectivement.
- Les indices p et a correspondent au tube et à l'annulaire.

Avec, V_m^p, V_c^p et V_s^p sont les volumes des différents fluides ; S_m, S_c et S_s sont les modules isothermes d'élasticité des différents fluides ; P_p est la pression de la pompe et q_p et q_{out} sont les débits de la pompe et celui de la sortie à la sortie respectivement

On fait de même en ce qui concerne la pression de circulation au fond du trou, en considérant la présence des différents fluides dans l'annulaire seulement, on a alors :

$$P = G_a + P_{f, a} \quad (4-43)$$

Où, P_{dha} : pression dynamique au fond du trou.

4.6 Calcul de débit

En appliquant l'équation de conservation de quantité de mouvement sur tout le système (annulaire et tube), le débit au niveau du sabot peut alors être exprimé comme suit :

$$(M_p + M_a) \frac{dq_0}{dt} = P_p - P_o - P_{f,p} - P_{f,a} + G_p - G_a \quad (4-44)$$

Afin de modéliser le phénomène de U-tube, il est nécessaire de prendre en considération que la différence de pression hydrostatique entre l'annulaire et le tube doit être supérieure aux pertes de charges dans le puits avant le début de la chute libre. Ce scénario peut être exprimé comme suit :

$$G_p - G_a - P_{f,p} - P_{f,a} > 0 \quad (4-45)$$

Dans le cas du phénomène de U-tube, les effets dus à la compressibilité peuvent être négligés car la pompe est mise à l'arrêt. Cette hypothèse transforme l'équation de conservation de masse en conservation de volume. C'est-à-dire que le volume pompé entrant dans le tube est identique à celui qui sort du sabot.

La variation de la hauteur de l'air h_r existant dans le tube peut être exprimée par la relation suivante :

$$\Delta h_r = \frac{1}{S_p} (q_o - q_p) \quad (4-46)$$

Avec, S_p la section intérieure du tube.

Comme on a $q_{out} > q_p$, cela va conduire à la réduction du niveau du fluide dans le tube et une augmentation du volume de l'air.

4.7 Calcul du volume du laitier

Le volume du laitier à pomper correspond au volume de l'annulaire qu'on veut remplir jusqu'à un certain niveau. En plus de ce volume, il faut prendre en compte le volume du laitier qui restera entre l'anneau et le sabot et entre ce dernier et le fond du trou. Cependant, la détermination de ce volume est très complexe car il faut prendre en considération les facteurs suivants :

- La forme irrégulière du trou.
- Les pertes de fluide dues à la présence de pores, de cavités et de fracturations.
- Manques de précision concernant la forme du trou.

Afin de remédier à ça, en plus du volume du laitier calculé théoriquement un excès de volume allant de 50% jusqu'à 300% doit être ajouté. Cet excès est basé principalement sur l'expérience, les pratiques courantes sur la région où se déroule l'opération et sur les résultats des appareils de mesure.

En pratique deux méthodes sont utilisées selon le diamètre du trou, les conditions in-situ et la profondeur du trou.

4.7.1 Méthode de calcul manuelle

Cette méthode est basée sur un calcul mathématique simple de volume d'après le diamètre de l'outil de forage et celui du tubage, plus un excès choisi par les ingénieurs. Elle est généralement utilisée pour estimer la quantité de ciment à envoyer sur le chantier, pour le calcul du temps de pompage et dans le cas de trou de grand diamètre avec des conditions favorables. Le calcul du volume du laitier se fait selon deux cas :

Ñ Cimentation de la zone de surface : C'est la cimentation du premier trou foré, dans ce cas l'annulaire est formé seulement entre la formation et le tube.

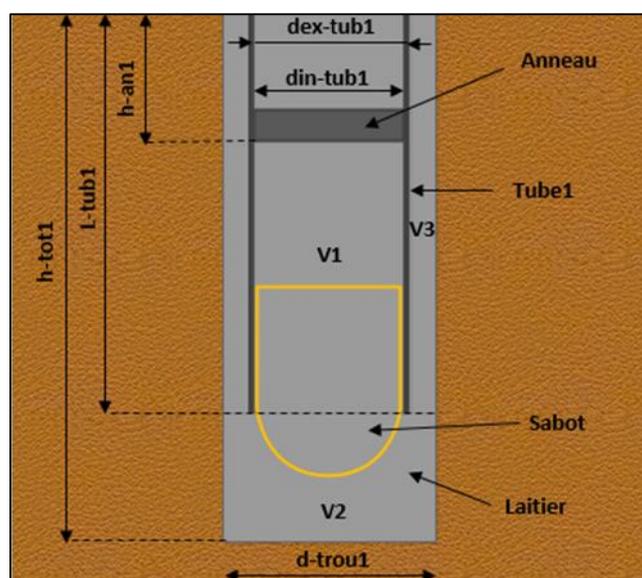


Figure 4-3 : représentation des volumes dans le cas de la cimentation de la zone de surface

Où,

- h_{tot1} : profondeur totale du premier trou,
- L_{tub1} : longueur du premier tubage,
- h_{an1} : Profondeur de l'anneau,
- $d_{ex-tub1}$: Diamètre extérieur du tubage,
- $d_{in-tub1}$: Diamètre intérieur du tubage,
- d_{trou1} : Diamètre du premier trou =Diamètre de l'outil de forage de la première section.

Dans ce cas le volume du laitier $V_{laitier}$ est égal à :

$$V_{laitier} = V_1 + V_2 + V_3 + V_{excès} \quad (4-47)$$

Avec,

- V_1 : le volume entre l'anneau et le sabot tel que :

$$V_1 = \frac{\pi d_{ti}^2}{4} (L_{ti} - h_a) \quad (4-48)$$

- V_2 : le volume entre le sabot et le fond du trou tel que :

$$V_2 = \frac{\pi d_{ti}^2}{4} (h_{ti} - L_{ti}) \quad (4-49)$$

- V_3 : le volume annulaire entre la formation et le tube :

$$V_3 = \frac{\pi (d_{ti}^2 - d_e^2)}{4} L_{ti} \quad (4-50)$$

- $V_{excès}$: le volume du laitier à ajouter en excès avec un pourcentage choisi par les ingénieurs tel que :

$$V_{excès} = (V_1 + V_2 + V_3) r$$

Ñ Cimentation des autres sections : Dans ce cas, il y a un volume supplémentaire à introduire qui se trouve entre le tubage de la section en question et celui de la section qui la précède.

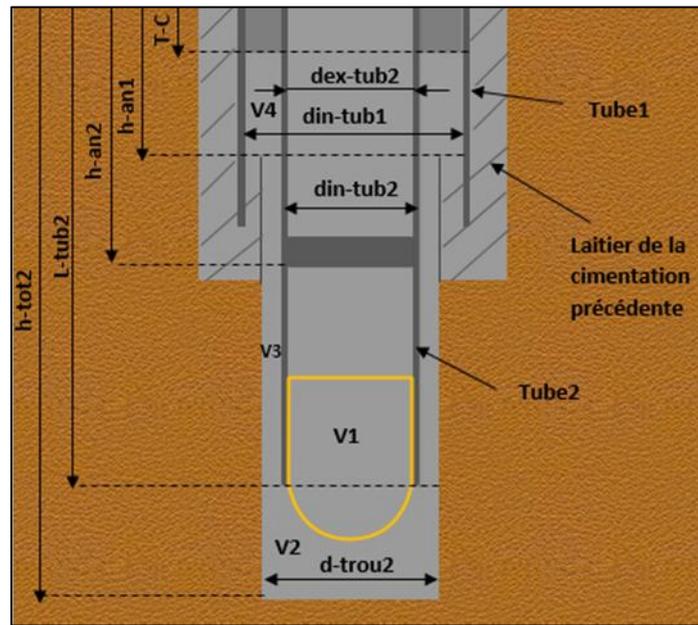


Figure 4-4 : représentation des volumes dans le cas de la cimentation des autres zones

Où, T-C : Niveau atteint par le laitier « Top ciment ».

Dans ce cas, le volume du laitier $V_{laitier}$ est égal à :

$$V_{laitier} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_{excès} \quad (4-51)$$

- V_1, V_2, V_3 et $V_{excès}$ sont déterminés comme dans le cas précédent.
- V_4 : le volume annulaire entre le tube 1 et 2 limité par le niveau de l'anneau précédent et le top ciment tel que :

$$V_4 = \frac{\pi (d_{ti}^2 - d_{ti}^2)}{4} (h_a - T) \quad (4-52)$$

Ñ Cimentation en utilisant deux laitiers de densités différentes : Dans certains cas afin d'optimiser la quantité de ciment utilisée, deux laitiers ayant une densité différente peuvent être pompés commençant par le plus léger « Lead slurry » et poursuivant par le plus lourds « Tail slurry ». Dans ce cas, il faut calculer le volume de chaque laitier.

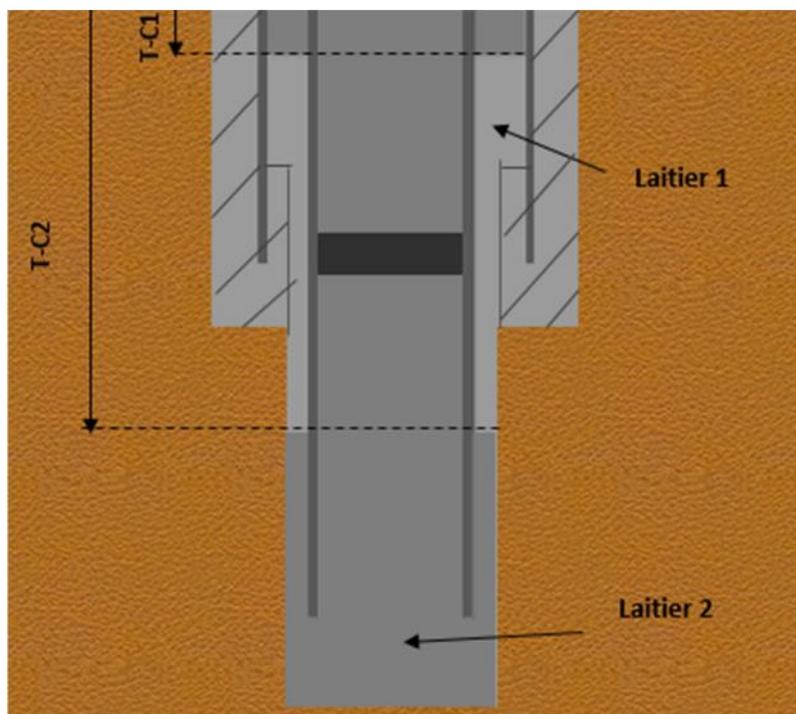


Figure 4-5 : représentation des volumes dans le cas de la cimentation avec deux types de laitier

➤ Dans ce cas, le volume du laitier $V_{\text{laitier-2}}$ est égal à :

$$V_{\text{laitier-2}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_{\text{excès-2}} \quad (4-53)$$

Avec,

- V_1 : le volume entre l'anneau et le sabot tel que :

$$V_1 = \frac{\pi d_{\text{ti}}^2}{4} (L_{\text{ti}} - h_a) \quad (4-54)$$

- V_2 : le volume entre le sabot et le fond du trou tel que :

$$V_2 = \frac{\pi d_{\text{ti}}^2}{4} (h_{\text{ti}} - L_{\text{ti}}) \quad (4-55)$$

- V_3 : le volume annulaire entre la formation et le tube limité par la profondeur du laitier 2 et la profondeur du tube 2 :

$$V_3 = \frac{\pi (d_{\text{ti}}^2 - d_{\text{e-ti}}^2)}{4} (L_{\text{ti}} - T_C) \quad (4-56)$$

- $V_{\text{excès-2}}$: le volume du laitier à ajouter en excès avec un pourcentage α_2 choisi par les ingénieurs tel que :

$$V_{\text{excès-2}} = (V_1 + V_2 + V_3) \Gamma_2 \quad (4-57)$$

➤ le volume du laitier $V_{\text{laitier-1}}$ est égal à :

$$V_{\text{laitier-1}} = V_4 + V_5 + V_{\text{excès-1}} \quad (4-58)$$

- V_4 : le volume annulaire entre la formation et le tube 2 :

$$V_4 = \frac{\pi(d_{\text{t}}^2 - d_{\text{e-t}}^2)}{4} (T_{\text{c}} - h_{\text{a}}) \quad (4-59)$$

- V_5 : le volume annulaire entre le tube 1 et tube 2 :

$$V_5 = \frac{\pi(d_{\text{t}}^2 - d_{\text{e-t}}^2)}{4} (h_{\text{a}} - T) \quad (4-60)$$

- $V_{\text{excès-1}}$: le volume du laitier à ajouter en excès avec un pourcentage :

$$V_{\text{excès-1}} = (V_5 + V_4) \Gamma_1 \quad (4-61)$$

Γ_1 et Γ_2 sont respectivement les facteurs d'excès des volumes du laitier dense et léger

4.7.2 Méthode de calcul à partir d'un Caliper

Afin de faire une estimation sur le diamètre réel du trou foré, on utilise un outil appelé Caliper log. Le type de Caliper peut affecter le volume du laitier calculé. Ceux à deux et trois bras, dont les bras fonctionnent ensemble, peuvent sous-estimer ou surestimer la taille du trou. Cela est particulièrement vrai pour les puits déviés, car les trous ont tendance à être ovales. Pour ces situations, des Caliper à quatre et six bras dotés de bras fonctionnant indépendamment fournissent des informations plus précises (Nelson et al, 2006).



Figure 4-6 : calliper à quatre bras (Nelson et al., 2006)

Le Caliper est descendu jusqu'au fond du trou en utilisant un câble, il est remonté avec une vitesse constante permettant de mesurer le diamètre. Pendant la remontée, les résultats sont inscrits sur un diagramme inséré dans l'enregistreur comme on peut le voir dans la figure suivante :

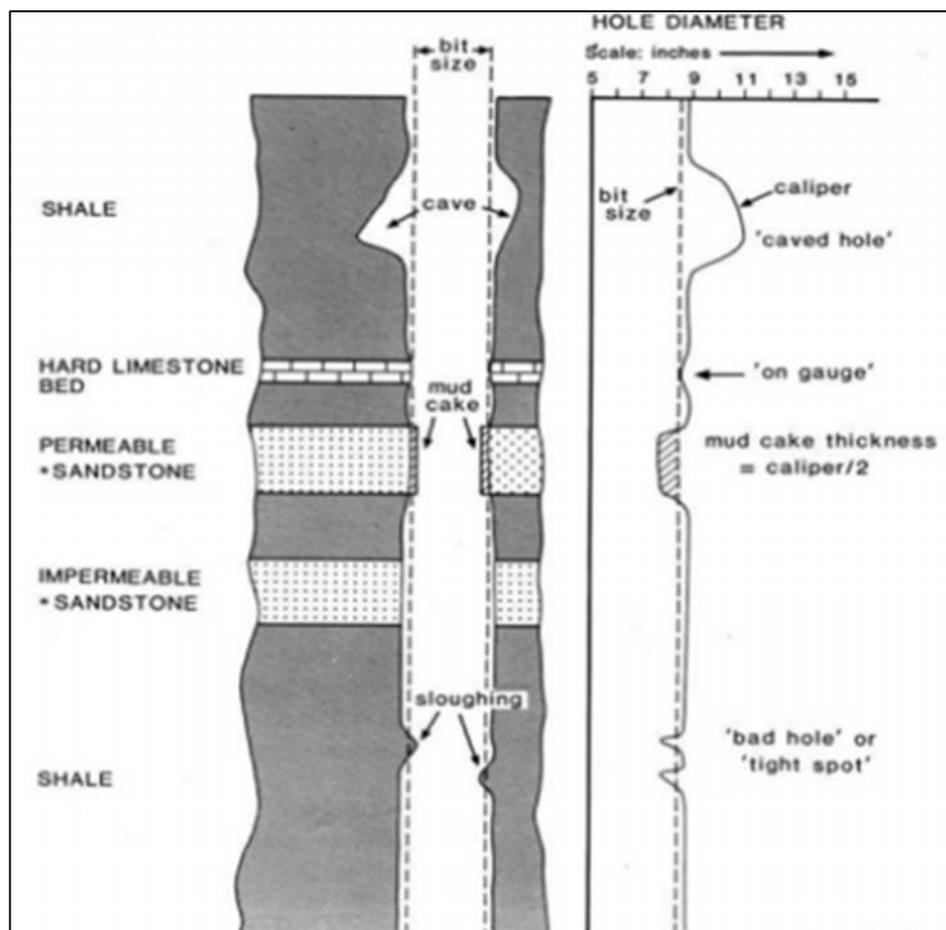


Figure 4-7 : Diagramme enregistré par un Caliper représentant la profondeur en fonction du diamètre (Nelson et al., 2006)

On peut trouver sur l'axe horizontal les différents diamètres qui peuvent varier de 6 à 16 pouces. Les profondeurs correspondantes sont sur l'axe vertical. Le principe de calcul du volume du laitier est de subdiviser la hauteur totale en plusieurs intervalles et d'attribuer un diamètre moyen correspondant à une section moyenne à chaque intervalle. Par la suite, il suffit de multiplier la section par la longueur de l'intervalle et faire la somme de tous les volumes élémentaires.

4.8 Conclusion

Une fois le modèle mathématique décrivant l'écoulement des différents fluides établi, il est possible de le traduire en un code numérique nous permettant de calculer le volume du laitier et les pressions dynamiques et hydrostatiques en chaque point et par la suite déduire la densité équivalente de circulation aux points critiques du trou.

Chapitre 5

Elaboration du programme de résolution du modèle mathématique

5. Elaboration du programme de résolution du modèle mathématique

5.1 Introduction

Après l'élaboration d'un modèle mathématique décrivant l'écoulement des différents fluides lors de la cimentation, on passe maintenant à la traduction de ce dernier en un outil informatique permettant le calcul des débits et des pressions.

La programmation scientifique sert à résoudre des problèmes le plus souvent mathématiques grâce à l'utilisation d'algorithmes numériques optimisés pour les ordinateurs modernes. Ces derniers permettent d'automatiser des tâches répétitives, rébarbatives, ou tout simplement trop longues pour être effectuées par un être humain.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la structure générale de l'algorithme du logiciel que nous avons élaboré, ses principales fonctions ainsi que le langage de programmation utilisé.

5.2 Modèle mathématique final

L'écoulement des fluides se produisant lors de la cimentation repose sur les équations finales obtenues par le développement mathématique fait dans le chapitre précédent.

$$\left(\frac{V_m^p}{\beta_m} + \frac{V_c^p}{\beta_c} + \frac{V_s^p}{\beta_s} \right) \frac{\partial p_p}{\partial t} = (q_p - q_o) \quad (5-1)$$

$$P = G_a + P_{f,a} \quad (5-2)$$

$$(M_p + M_a) \frac{\partial q_o}{\partial t} = P_p - P_o - P_{f,p} - P_{f,a} + G_p - G_a \quad (5-3)$$

$$G_p - G_a - P_{f,p} - P_{f,a} > 0 \quad (5-4)$$

Où, V_m^p , V_c^p et V_s^p sont les volumes des différents fluides ; S_m , S_c et S_s sont les modules isothermes d'élasticité des différents fluides ; q_p et q_o sont respectivement les débits de la pompe et le débit de sortie.

P_p : pression de la pompe, P_o : pression à la surface, $P_{fri,a}$: pertes de charges dans l'annulaire, $P_{fri,p}$: pertes de charges dans le tube, G_a : pression statiques dans l'annulaire, G_p : pression statiques dans le tube, M_a : l'intégrale de la masse volumique par la section de l'annulaire, M_p : l'intégrale de la masse volumique par la section du tube et P_{dha} : pression dynamique au fond du trou.

Le processus de la cimentation est continu et dynamique. Dans le but de résoudre les équations précédentes, il est nécessaire de faire une discrétisation dans le temps. Les différentes variables d'état peuvent être représentées par l'équation différentielle suivante (Kreyszig et al., 2011):

$$\dot{\gamma} = f(\gamma, \omega) \quad (5-5)$$

Où, y : variable d'état et $f(y, t)$ représente de la variation de la variable d'état selon la variable indépendante t .

En introduisant la définition de la dérivée :

$$Y = \frac{y(j+t) - y(j)}{t} \quad (5-6)$$

j : indice d'itération, t : pas de temps, on obtient alors l'équation suivante :

$$Y_{j+1} = Y_j + t \cdot f(y, \omega) \quad (5-7)$$

Il s'agit de l'équation d'Euler, une méthode simple du premier ordre qui estime la valeur de la prochaine itération en se basant sur la valeur de l'itération actuelle.

L'erreur dépend du pas de temps, tel que plus ce dernier est petit, l'erreur est moindre. Elle offre un bon équilibre entre précision des résultats et le temps de calcul.

A $t = 0$, le tube et l'annulaire sont totalement remplis par la boue mise en circulation. C'est pour cela que nous allons prendre les pressions et les débits relatifs à la boue de circulation comme conditions initiales.

5.3 Langage de programmation

Il existe un grand nombre de langages utilisés pour le calcul scientifique (C/C++/fortran), développés depuis de nombreuses années. Il s'avère que les langages traditionnels sont soit inadaptés à une utilisation généraliste (calculs et création d'une interface graphique - ex : fortran), ou ont une syntaxe suffisamment complexe ou rigide pour rendre difficile son utilisation par un utilisateur occasionnel (c++). C'est ce qui a permis le succès de logiciels commerciaux spécialisés dans le calcul (Mathematica, Maple, Matlab, et de langages (IDL), qui associent une syntaxe relativement simple avec des fonctionnalités (représentation graphique, bibliothèques de calcul) étendues, et utilisables directement à partir d'une ligne de commande (sans compilation préalable).

Nous avons choisi d'utiliser Python comme langage de programmation car, il présente de multiples avantages par rapport aux langages traditionnels :

- Ñ Naturel (utilisation de l'indentation, typage dynamique) et moderne (orienté objet),
- Ñ Utilisable en ligne de commande (donc interactif),
- Ñ Extensible (modules externes de calcul et de visualisation écrites en C/C++/fortran),
- Ñ Très utilisé pour le calcul scientifique (grâce à la réutilisation de bibliothèques de calculs déjà existantes),
- Ñ Libre ("open-source") et multiplateforme (Linux, Windows, MacOS,).

L'intérêt de python est d'accélérer le développement d'un programme par sa syntaxe simple, et par sa capacité à réutiliser des bibliothèques. Il propose les principales fonctionnalités de la programmation (actions conditionnelles, boucles, programmation modulaire), y compris les mécanismes de classes (héritage, surcharge des méthodes, polymorphisme), et donc se marie très bien avec un cours d'algorithmique.

5.4 Module de simulation

Afin de résoudre le modèle mathématique ci-dessus, nous avons conçu un module de calcul appelé Ce Ma, dont le logo est ci-dessous :

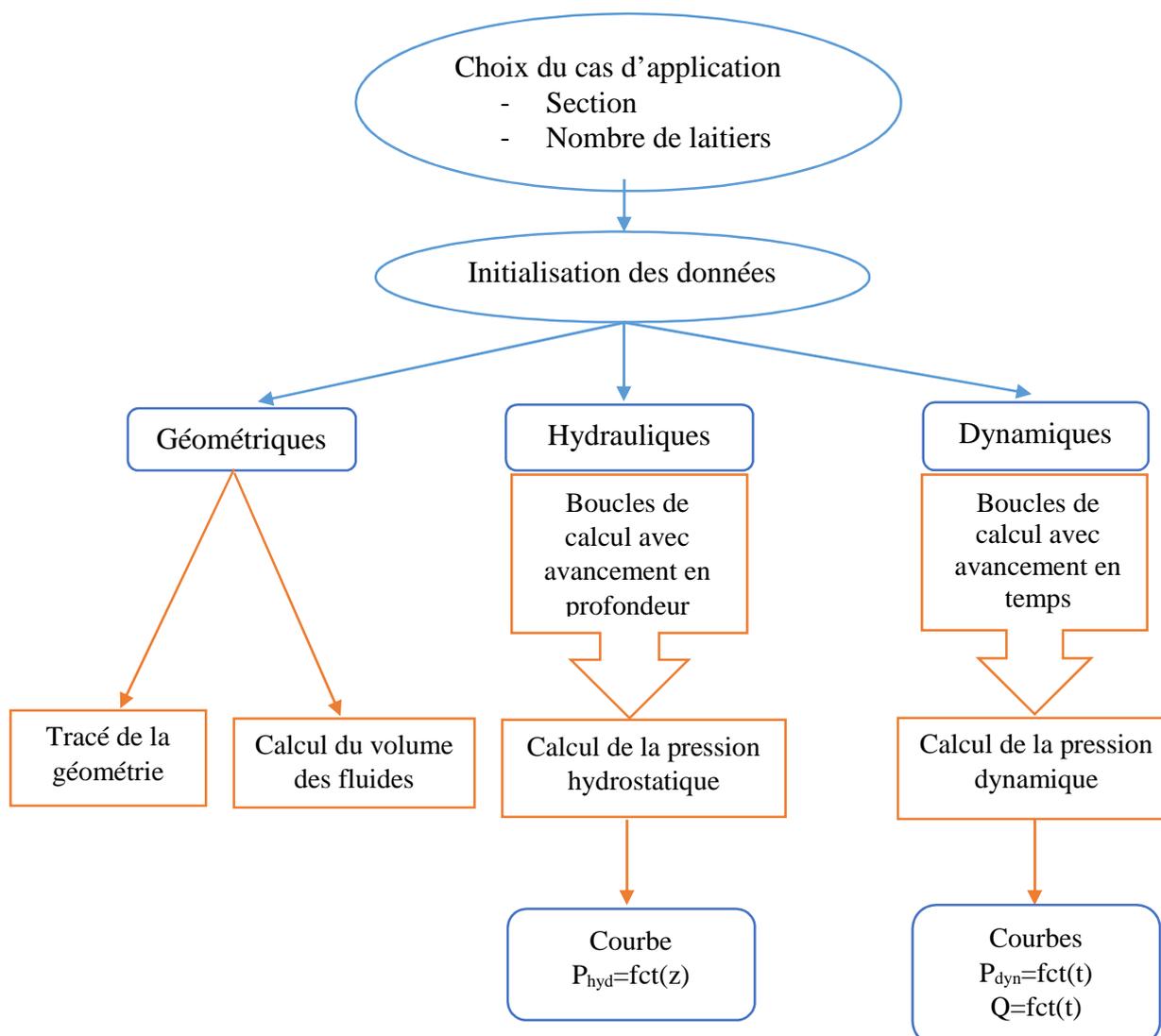


Figure 5-1 : logo du module Ce Ma

5.5 Algorithme général

Dans le but de concevoir un logiciel applicable pour la majorité des cas d'application rencontrés lors de la cimentation des puits, nous avons développé un algorithme reposant sur des fonctions dépendantes les unes des autres et ayant un rôle bien défini.

La structure générale de l'algorithme peut être représentée comme suit :



5.6 Fonctions principales du programme

En pratique, le logiciel a pour rôle d'effectuer différentes simulations d'écoulements des fluides lors de l'opération de la cimentation pour une section donnée qui dépendent principalement des fluides utilisées (paramètres hydrauliques) mais aussi des débits et temps de pompage.

Le programme est composé de quatre fonctions principales interconnectées, formé de 5500 lignes. Ces dernières sont basées sur le modèle mathématique élaboré dans le chapitre 4 précédent. La bibliothèque Tkinter disponible sur Python nous a permis de faciliter l'utilisation du programme et le rendre interactif à l'utilisation, en mettant en place des interfaces graphiques qui permettent d'introduire des données et les sauvegarder, afficher des messages et des résultats et aussi lancer les fonctions de calcul. Ces fonctions sont citées ci-dessous :

5.6.1 Fonction de création de la géométrie

Cette fonction a pour rôle de tracer la géométrie du puits en utilisant la bibliothèque Canevas qui nous permet de créer différentes formes à partir des données (profondeurs et diamètres) introduites par l'utilisateur en fonction du cas d'application.

Ci-dessous, une partie du code concernant la fonction de création de la géométrie et la fenêtre permettant d'initialiser d'entrer les données géométriques :

```
if choix==1:
    Lc=tvD+100
    lc=tvD-100
    c=tkinter.Canvas(app,height=Lc,width=lc,background='#A4510E')
    if var_s==1:
        a=c.create_rectangle(lc/2-(od/2),0,lc/2-(od/2)+od, tvD, fill='#8B8A8A', outline='black')
        b=c.create_rectangle(lc/2-(Id/2),0,lc/2-(Id/2)+Id, cd-0.1*cd, fill='#DFD9D9', outline='#DFD9D9')
        m=c.create_rectangle(lc/2-(Id/2), cd-0.1*cd, lc/2-(Id/2)+Id, cd, fill='#464444', outline='#464444')
        l1=c.create_line(lc/2-(ed/2),0,lc/2-(ed/2),lct, width=ed-Id)
        l2=c.create_line(lc/2+(ed/2),0,lc/2+(ed/2),lct, width=ed-Id)
```

Figure 5-2 : fenêtre d'introduction des données géométriques

5.6.2 Fonction de calcul des volumes

Cette fonction est basée sur la méthode manuelle du calcul des volumes citée dans le chapitre (4) utilisant les données géométriques et un facteur d'excès choisi par l'utilisateur. Elle nous permet de calculer le volume du laitier de ciment (ou deux laitiers selon le choix) et aussi le volume total du puits.

Ci-dessous, une partie du code concernant la fonction de calcul des volumes :

```

if choix==0:
    V_ta=(math.pi/4*(OD**2-ED**2)*(TVD-PCD))+(math.pi/4*(PID**2-ED**2)*(PCD))
    V_tp=(math.pi/4*(ID)**2)*(TVD)
    Ap=(math.pi/4*(ID)**2)
    V_0H=V_ta+V_tp
    if var_s==1:
        V1=(math.pi/4*(ID)**2)*(LCT-CD)
        V2=(math.pi/4*(OD)**2)*(TVD-LCT)
        V3=(math.pi/4*(OD**2-ED**2)*(LCT-PCD))
        V4=(math.pi/4*(PID**2-ED**2)*(PCD-TC))
        V_ex=(V1+V2+V3+V4)*float(alpha_var.get())
        V_slurry=V1+V2+V3+V4+V_ex

```

5.6.3 Fonction de calcul des pressions statiques

Cette fonction permet de calculer les pressions statiques au fond du puits en tenant compte des différentes colonnes de fluides présentes après l'opération de la cimentation. Le calcul se fait par une boucle après discrétisation de la profondeur selon un pas choisi par l'utilisateur.

Ci-dessous, une partie du code concernant la fonction de calcul des pressions statiques ainsi que la fenêtre permettant d'initialiser les paramètres d'entrée :

```

#newtonian
if c==0: #tube
    Re=(D*v_c*r_c)/(mu*10**(-3))
    Rec=2100
elif c==1: #annulaire
    Re=(0.8165*(D)*v_c*r_c)/(mu*10**(-3))
    Rec=2100
else: #Pipe - Pipe
    Re=(0.8165*(D)*v_c*r_c)/(mu*10**(-3))
    Rec=2100

# Détermination du régime d'écoulement et calcul du dp
if Re<Rec :
    if c==0: #tube
        dp=(32*mu*v_c*l*10**(-3))/D**2
    elif c==1: #annulaire
        dp=(48*mu*v_c*10**(-3)*l)/D**2
    else: # Pipe-Pipe
        dp=(48*mu*v_c*10**(-3)*l)/D**2

```

The screenshot shows a software window titled "Static pressure calculation". It contains the following fields and controls:

- Mud circulation density (kg/m³): 0.0
- Mud displacement density (kg/m³): 0.0
- Lead slurry density (kg/m³): 0.0
- Tail slurry density (kg/m³): 0.0
- Number of spacer used: 2 (dropdown menu)
- Preflush density (kg/m³): 0.0
- Postflush density (kg/m³): 0.0
- Rheological model of preflush: Newtonian model, Non newtonian model
- Rheological model of postflush: Newtonian model, Non newtonian model
- Fracturation pressure (Psi): 0.0
- Critical depth of fracturation pressure (m): 0.0
- Pore pressure (Psi): 0.0
- Critical depth of fracturation pressure (m): 0.0
- Step of Z: 0.0

Action buttons: "Next", "Ok", "OK", "Calculate", "Plot".

Figure 5-3 : fenêtre d'introduction des données hydrauliques

Les résultats de cette fonction sont représentés sous forme d'un graphe de pression hydrostatique en fonction de la profondeur, sur lequel sont tracées aussi les courbes de pression de fracturation et pression des pores. Cela nous permet de faire un premier test d'intégrité du puits pour savoir si c'est nécessaire de passer au calcul dynamique.

5.6.4 Fonction de calcul des pressions dynamiques

Pour le calcul dynamique, la fonction demande comme entrées : les débits, le temps de pompage, les paramètres rhéologiques ainsi que les modules de compressibilité de chaque fluide. Le calcul se fait par boucle après la discrétisation de la durée totale du pompage selon un pas de temps choisi par l'utilisateur.

En calculant les volumes et longueurs des fluides à chaque itération et les pertes de charges, on suit l'évolution des colonnes des fluides présentes dans le tube et l'annulaire pour chaque séquence de pompage. Cela nous permet de calculer les pressions dynamiques au fond du puits ainsi que les débits d'écoulement dans le tube et l'annulaire pour chaque pas de temps.

Ci-dessous, une partie du code concernant la fonction de calcul des pressions dynamiques ainsi que la fenêtre permettant d'initialiser les paramètres d'entrée :

```

# Dynamics for the total wellbore
qp[j]=q_pump(qp[j-1],f)
qb[j]=arrondi(max(0.00001,qb[j-1] + dt/(Mp[j-1]+Ma[j-1])*(Pp[j-1] - P0 - Fp[j-1]-Fa[j-1]+Gp[j-1]-Ga[j-1])),5)
qavg_pipe[j]=arrondi(max(0.00001,qavg_pipe[j-1] + dt/Mp[j-1]*(Pp[j-1] - Fp[j-1] - Pdha[j-1] + Gp[j-1])),5)
qout[j]=arrondi(max(0.00001,qout[j-1] + dt/Ma[j-1]*(Pdha[j-1] - Fa[j-1] - P0 - Ga[j-1])),5)
x=((Gp[j-1]-Ga[j-1]-Fa[j-1]-Fp[j-1]))
if x>0:
    hd[j]=arrondi(max(0,hd[j-1] + (dt/Ap)*(qb[j-1]-qp[j-1])),4)
else:
    hd[j]=hd[j-1]
# Update variables

Lma1[j]=max(0,(TVD - Lca[j] - Lsa[j]))
Lma2[j]=0
Lmp1[j]=max(0,TVD-Lcp[j]-hd[j]-Lsp[j]-Lmp2[j])
q_avgp = qavg_pipe[j]
q_avga = qout[j]
Mp[j]=arrondi((rho_mudc*Lmp1[j]/(Ap) + rho_c*Lcp[j]/(Ap) + rho_sp*Lsp[j]/(Ap)+rho_mudd*Lmp2[j]/(Ap)),4)
Ma[j]=arrondi((rho_mudc*Lma1[j]/(Aa) + rho_c*Lca[j]/(Aa) + rho_sp*Lsa[j]/(Aa)+rho_mudd*Lma2[j]/(Aa)),4)
Gp[j]=arrondi((rho_mudc*g*Lmp1[j] + rho_c*g*Lcp[j] + rho_sp*Lsp[j]*g+rho_mudd*Lmp2[j]*g),4)
Ga[j]=arrondi((rho_mudc*g*Lma1[j] + rho_c*g*Lca[j] + rho_sp*Lsa[j]*g+rho_mudd*Lma2[j]*g),4)

```

Fluid	Flow (lpm)	Pumping time (s)	Plastic viscosity (cP)	Yield stress (lb/100ft ²)	Yield point (lb/100ft ²)	Isothermal modulus bulk (Pa)
Mud circulation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mud displacement	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lead slurry	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tail slurry	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Spacers rheology						
Fluid	Flow (lpm)	Pumping time (s)	Isothermal modulus bulk (Pa)	Plastic viscosity (cP)	Yield stress (lb/100ft ²)	Yield point (lb/100ft ²)
Preflush	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fluid	Flow (lpm)	Pumping time (s)	Isothermal modulus bulk (Pa)	Plastic viscosity (cP)	Yield stress (lb/100ft ²)	Yield point (lb/100ft ²)
Postflush spacer	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Introduire time step (s) : 0.0
 Introduire tramp (s) : 0.0
 Introduire Ppore en KPa : 0.0
 Introduire Pfract en KPa : 0.0

Figure 5-4 : fenêtre d'introduction des données dynamiques

Les résultats de cette fonction sont représentés sous forme d'un graphe de pression dynamique en fonction du temps de pompage, sur lequel sont tracés aussi les courbes de pression de fracturation et pression des pores mais aussi un graphe représentant l'évolution des différents débits en fonction du temps de pompage. Cela nous permet de vérifier si les pressions dynamiques restent dans l'intervalle limité par les pressions de fracturation et pression des pores et d'effectuer la cimentation avec les débits et temps simulés ou bien changer ces paramètres dynamiques jusqu'à atteindre la pression dynamique admissible en tenant compte des facteurs économiques (coûts de l'opération dépendant du temps de pompage).

5.7 Conclusion

Après avoir défini le programme de calcul du module de simulation conçu, expliqué sa structure et ses principaux objectifs, il est nécessaire de passer maintenant à l'étape de validation afin d'affirmer sa crédibilité, et s'assurer que ses résultats sont représentatifs et peuvent être utilisés en pratique pour des différents cas d'application.

Chapitre 6

Simulation et résultats

6. Simulation et résultats

6.1 Introduction

Une fois le développement mathématique et théorique fait et le code de calcul établi, il nous faut maintenant passer à l'exploitation de ce dernier, en faisant des simulations afin de le valider, c'est-à-dire montrer qu'il modélise correctement les phénomènes physiques qui se produisent au cours des différents cas d'application définis dans le troisième chapitre.

Ayant à notre disposition les résultats de simulation du logiciel CemCADE pour certains cas d'applications, nous allons faire à notre tour des simulations de ces mêmes cas en utilisant les mêmes données avec notre logiciel. CemCADE étant un logiciel reconnu et utilisé en pratique par un grand nombre de compagnie pétrolière, nous allons donc l'utiliser pour valider nos résultats.

6.2 Simulation

Nous allons présenter si dessous les différents cas d'application simulés pour la validation de notre code, les données géométriques, hydrauliques et dynamiques utilisées. Nous allons par la suite présenter nos résultats avant de les comparer avec ceux du logiciel CemCADE.

➤ **Cas d'application :**

Ce cas a été rencontré lors de la cimentation de la section de surface du puits de forage Aghar 4-17 dans le champ d'Aghar au Caire. L'opération a consisté à faire circuler de la boue dans le puits avec un débit de $0.017 \text{ m}^3/\text{s}$, poursuivie par le pompage d'un volume de 8.2m^3 d'eau à un débit de $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$. La cimentation a été faite en utilisant deux types de laitiers avec un volume d'excès de 50 %, le premier a été pompé pendant 48 min et le second pendant 15 min à un débit de $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dans les tableaux suivants la totalité des données utilisées pour la simulation seront présentées :

Tableau 6-1 : Données géométriques du puits et du tubage.

	Données Géométriques
Diamètre intérieur du puits (in)	12.25
Diamètre extérieur du tube (in)	9.625
Diamètre intérieur du tube (in)	8.681
Profondeur totale du puits (m)	1137
Profondeur du tube (m)	1137
Profondeur de l'anneau (m)	1112
Top ciment du second laitier (m)	884

Tableau 6-2 : Données dynamiques et rhéologiques

Fluides		Q	μ	t	PV	y	YP	
Boue de circulation	1020	0.0170	-	0	21.16	10.15	24	1500000000
Eau	960	0.0158	5	498	-	-	-	40000000000
Laitier léger	1440	0.0132	-	2880	14.78	20.90	36	40000000000
Laitier dense	1800	0.0132	-	906	24.11	21.90	36	40000000000
Boue de chassage	1200	0.0119	-	1000	21.158	10.15	16	1500000000

- : masse volumique (Kg/m³),
- Q : Débits (m³/s).
- μ : viscosité dynamique (cP).
- t : temps de pompage (s).
- PV : Viscosité plastique (cP).
- y : Seuil de plasticité (lb/100ft²).
- YP : Limite de plasticité (lb/100ft²).
- : Module isotherme de compressibilité (Pa)

Au fond du trou, à z= 1137m on a :

- Pression de fracturation =2700 Psi.
- Pression de saturation=1500 Psi

6.3 Résultats et comparaison

Suite à la simulation réalisée avec les données d’entrée citées ci-dessus, nous avons obtenu les différentes courbes de pression, de débit et des hauteurs colonnes de fluides suivantes :

➤ Géométrie

Suivant les données géométriques du trou et le niveau des laitiers utilisés, nous avons obtenu le tracé de l’état final du puits :

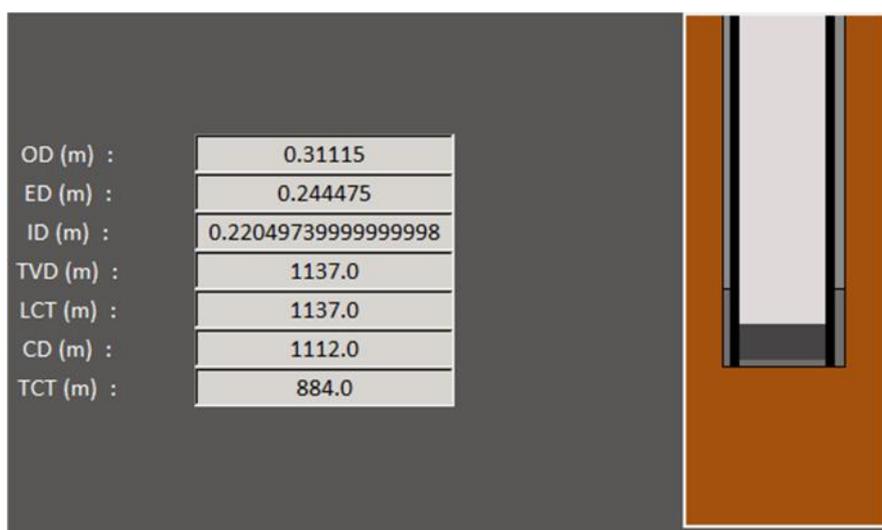


Figure 6-1 : Tracé de la géométrie du puits du premier cas d’application

➤ Volume des laitiers

Après le calcul des volumes des laitiers avec le facteur d'excès, nous avons obtenu les résultats suivants :

The lead slurry volume in m3 is :	38.58142001587595
The tail slurry volume in m3 is :	12.473918287795211

Figure 6-2 : Résultats du volume du laitier

Les volumes du premier et du deuxième laitier calculé par CemCADE sont respectivement 38.12 m^3 et 11.97 m^3 .

Ces résultats nous confortent dans l'emploi du code pour la fonction de calcul des volumes.

➤ Variations des pressions hydrostatiques

Les pressions hydrostatiques, la pression de fracturation et la pression de saturation en fonctions de la profondeur du trou obtenues par le module Ce Ma et le logiciel CemCADE sont représentées ci-dessous :

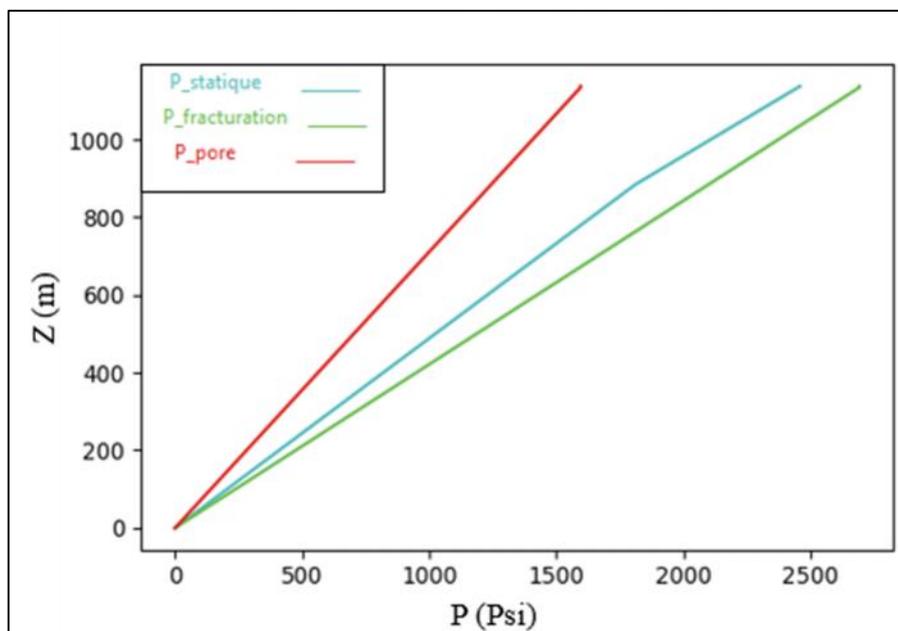


Figure 6-3 : Pressions statiques selon Cema

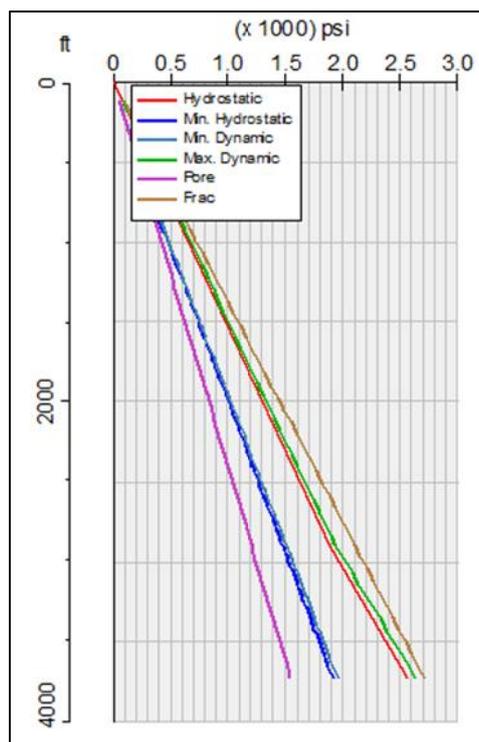


Figure 6-4 : Pressions hydrostatiques selon CemCADE

Avec :

P_{statique} : pression hydrostatique à la fin du pompage.

P_{fracturation} : pression de fracturation.

P_{pore} : pression de saturation.

En comparant les pressions hydrostatiques au fond du puits ainsi qu'au changement de pente de la droite de la pression hydrostatique, les résultats du module Ce MA sont très proches de ceux obtenus avec le logiciel CemCADE.

La pression hydrostatique est dans l'intervalle limitée par la pression de fracturation et la pression des pores.

➤ Variations des débits

Les débits de pompage entrant dans le tube et les débits de sortie à la surface en fonction du temps obtenus par le module Ce Ma et le logiciel CemCADE sont représentés dans le graphe suivant :

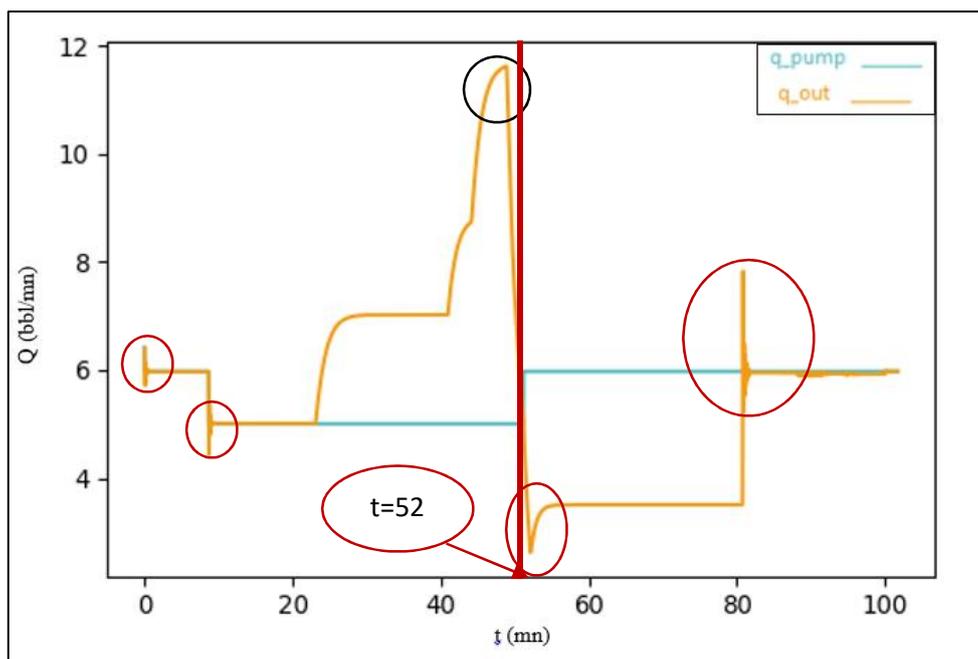


Figure 6-5 : Débits selon Ce Ma

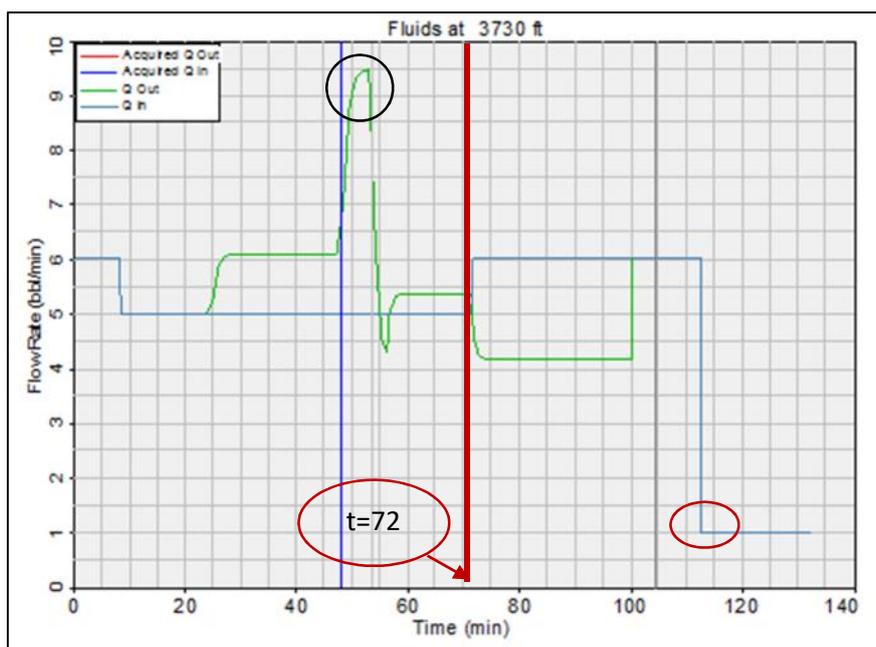


Figure 6-6 : Débits selon CemCADE

Avec : q_p étant le débit de pompage et q_{out} le débit de sortie.

On constate que les allures des deux courbes sont très similaires. Les points de différence signalés avec un cercle seront justifiés ultérieurement.

- Variation des pressions dynamiques

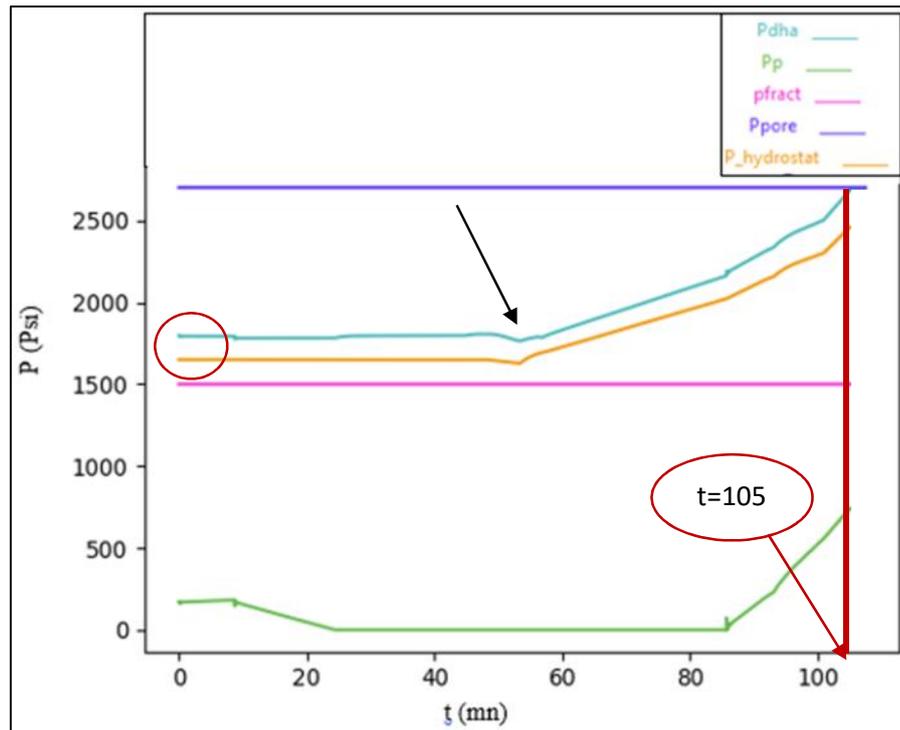


Figure 6-7 : Pressions selon Ce Ma

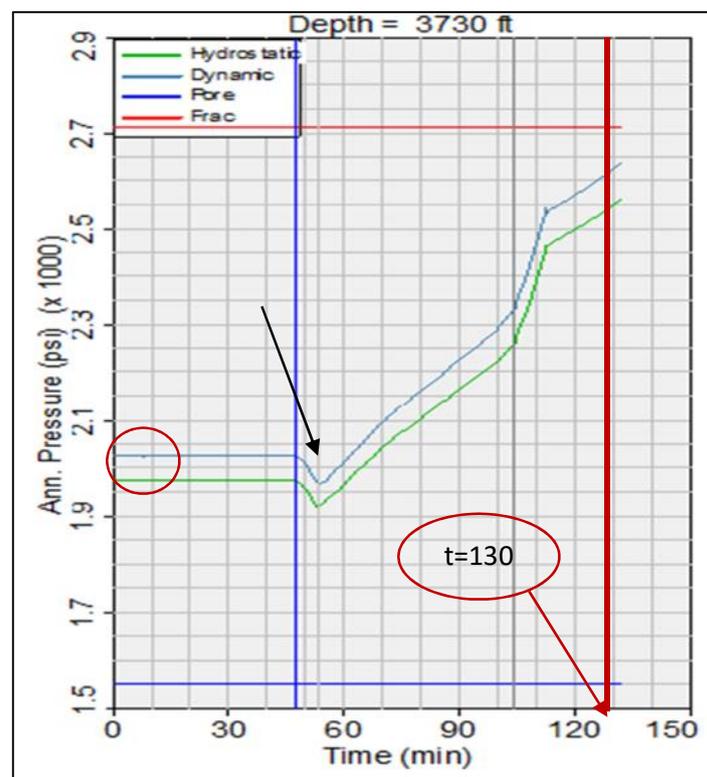


Figure 6-8 : Pressions dynamiques selon CemCADE

Avec :

Pdha : Pression dynamique au fond du trou.

Pp : Pression de la pompe.

D'après les graphes des figures (6-7) et (6-8), on peut dire que les pressions dynamiques données par CemCADE et celles données par Ce Ma ont une évolution proche. Les points différents signalés seront également justifiés par la suite.

➤ Variation de la hauteur des colonnes de fluides

Les hauteurs des différentes colonnes de fluides présentes dans l'annulaire et le tube en fonction du temps sont représentés dans le obtenu par le module Ce Ma graphes suivants :

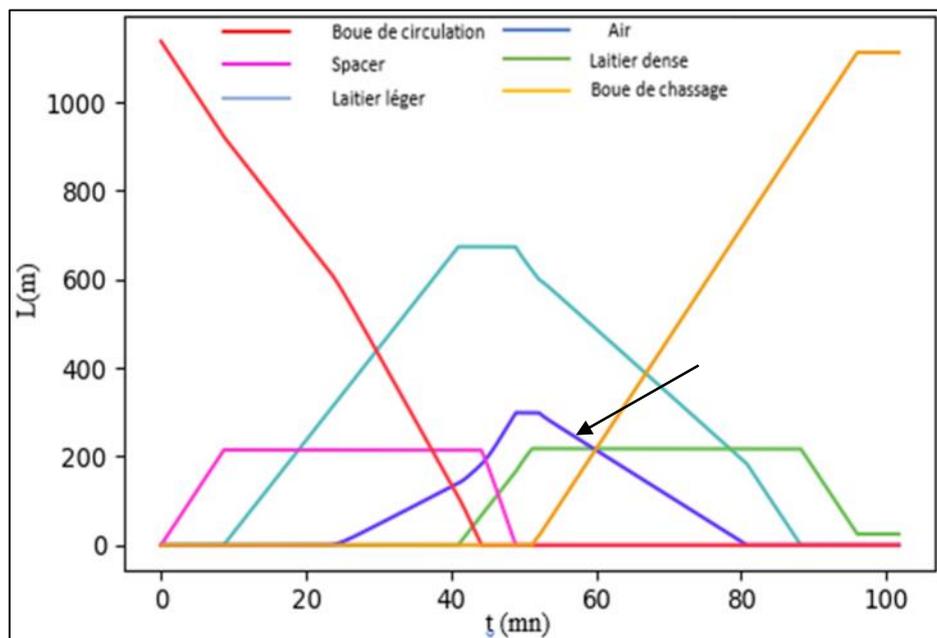


Figure 6-9 : Hauteurs des colonnes de fluides dans le tube en fonction du temps de pompage

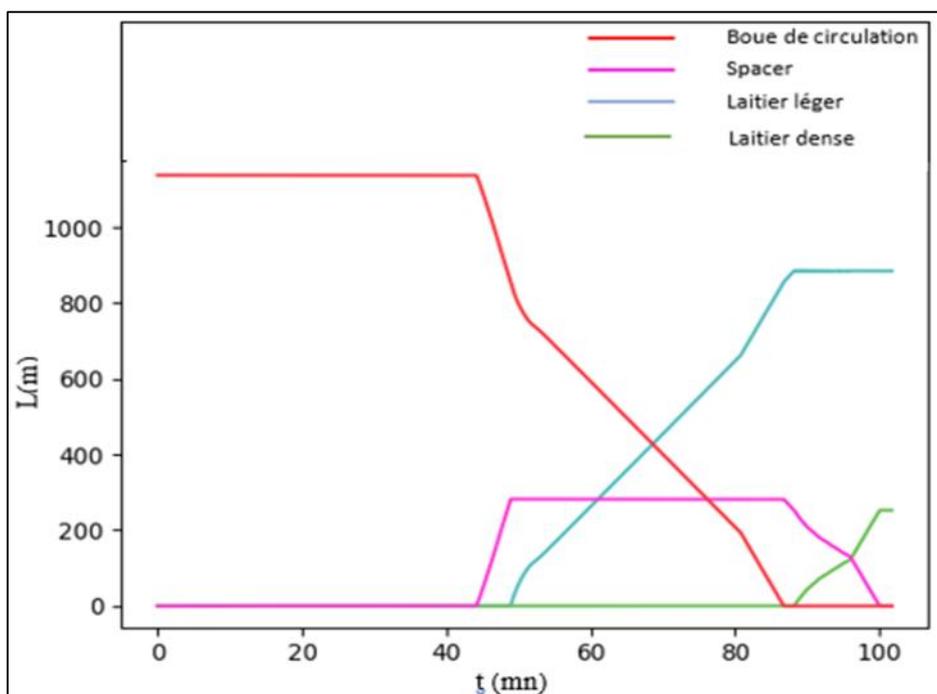


Figure 6-10 : Hauteurs des colonnes de fluides dans l'annulaire en fonction du temps de pompage

1. A l'état initial, il n'y a que la boue mise en circulation, c'est pour cela que la hauteur de la colonne de boue de circulation dans le tube et l'annulaire est égale à la hauteur totale du puits.
2. Une fois le spacer pompé, la hauteur de la colonne de la boue de circulation dans le tube diminue et celle du spacer augmente avec la même vitesse jusqu'à ce que tout le volume de ce dernier soit pompé.
3. A ce moment, on lance le pompage du premier laitier par conséquent la hauteur de la colonne du spacer reste constante et celle du laitier augmente jusqu'à ce que tout son volume soit pompé.
4. La même chose se produit lors du pompage du deuxième laitier.
5. Au moment de la sortie d'un fluide du tube vers l'annulaire, on remarque une diminution de la hauteur de sa colonne dans le tube (figure 6-10) et son augmentation dans l'annulaire (figure 6-9).
6. A $t=30$ min, on remarque l'augmentation de la hauteur de l'air dans le tube jusqu'à $t=85$ min. C'est-à-dire qu'à ce moment-là, le poids des colonnes de fluides dans le tube est plus important que celles présentes dans l'annulaire plus les pertes de charge totales.

6.4 Analyse :

- La présence des pics dans le graphe des débits (6-5) signalés en cercle rouge, est due à la variation du débit de pompage occasionnant ainsi un changement du débit de sortie du puits qui aura tendance à osciller autour d'un point d'équilibre jusqu'à ce qu'il soit égal au débit de pompage.
- Le décalage de la valeur du pic entre les deux graphes signalés en cercle noir dans la figure (6-5), est dû à la différence des pertes de charge calculées par CemCADE et Ce Ma.
- Le retard sur le changement du débit de pompage observé sur la figure (6-6) par rapport à celui observé sur la figure (6-5) est causé par le fait que CemCADE prend en compte le volume d'excès en augmentant le diamètre du trou ce qui diminue les pertes de charges, et augmentera le temps de pompage nécessaire des laitiers. N'étant pas convaincu de cette alternative, nous n'avons pas pris en compte l'augmentation du volume en faisant l'hypothèse qu'il n'y ait pas de perte de fluide.
- Pour l'instant le module que nous avons développé ne permet pas de prendre en compte l'ajout d'une autre séquence de boue qui a été prise en considération lors de la cimentation avec le logiciel CemCADE, c'est la raison pour laquelle le changement de débit de pompage signalé dans la figure (6-6) n'est pas observé dans la figure (6-5).
- La différence des valeurs des pressions remarquées à partir des graphes (6-7) et (6-8) est due aussi à la différence de la valeur des pertes de charge.
- Les pertes de charges sont différentes car nous avons utilisé un modèle de calcul des frottements de Herschel-Bulkley unifié alors que CemCADE utilise les autres modèles.
- Les résultats obtenus dans les graphes des figures (6-5), (6-7) et (6-10) illustrent parfaitement le phénomène de chute libre signalé avec une flèche noire. Lors du

déroulement de ce phénomène la chute est plus importante que la pression de pompage c'est pour cela que cette dernière est mise volontairement égale à 0 comme on peut le voir dans la figure (6-7).

- Tous les décalages cités précédemment ont provoqué un déphasage dans la fin de la simulation observés à partir des deux figures (6-7) et (6-8).

6.5 Conclusion

A partir de la comparaison faite entre les résultats obtenus par le module Ce Ma et le logiciel CemCADE, nous avons remarqué certaines petites différences mais qui ont été justifiées et argumentées. On peut donc conforter les fonctions principales du module Ce Ma. On pourra alors envisager de l'utiliser comme un outil de calcul ou de comparaison.

Conclusion générale et perspectives

Ce projet a été une occasion de prouver nos compétences en tant qu'ingénieur tant sur le plan technique qu'organisationnel puisqu'il s'agissait d'un travail d'équipe où une grande autonomie nous a été demandée. D'abord, il a fallu bien comprendre la problématique afin de fixer l'objectif de notre étude et définir les axes de recherches. Puis nous sommes passées à l'étape des recherches bibliographiques, étape longue et essentielle dans tout projet. Ensuite nous avons dû passer du temps à la réalisation du modèle mathématique pour une éventuelle application dans le cas de la cimentation d'un puits de forage et enfin à l'exploitation de ce dernier par un algorithme, la partie la plus importante pour relier des résultats numériques à la physique du phénomène de superposition de fluides de différentes densités.

D'un point de vue technique, ce projet nous a permis de nous confronter à un code relativement complexe. Il nous a été nécessaire de s'informer sur la programmation sous python et d'apprendre sa syntaxe. Enfin, nous avons pu constater l'utilité des simulations numériques pour étudier un phénomène physique, en termes de gain de temps, de précision des résultats et de commodité (pas d'expérience à mettre en place, un ordinateur suffit) même si évidemment, toute simulation numérique se doit d'être complétée d'une phase d'expérimentations si l'on veut pousser une étude.

Le module CeMa sert à simuler les écoulements de plusieurs séquences de fluides suivant le cas d'application. En pratique, c'est un outil d'aide à la décision dans le domaine pétrolier en particulier dans la cimentation des puits de forage car il permet de vérifier la sécurité de l'opération tout en optimisant le temps de pompage de l'opération.

Néanmoins les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour une étude plus approfondie. Ainsi, les perspectives futures sont dans un premier temps la validation du modèle mathématique par des données expérimentales, apporter ainsi un calibrage pour une meilleure modélisation. On propose de tenir compte des pertes de fluides et de la déviation du tube afin d'estimer au mieux le volume du laitier de ciment nécessaire. Il serait aussi intéressant de développer un modèle rhéologique propre aux différents fluides en tenant compte des différents paramètres tels que la température et la pression appliquée sur les fluides.

Finalement, ce projet a été l'occasion de comprendre toutes les qualités que doit avoir un ingénieur spécialisé en mécanique des fluides numérique : un sens de l'organisation et des méthodes de travail propres à tout ingénieur, une maîtrise des outils numériques et enfin un savoir théorique en mécanique des fluides.

Références bibliographiques

BEKKEN, Ø. et Ullsfoss, E. H., (2017). *Managed Pressure Cementing simulations of Pressure and Flow Dynamics during Cementing Using Applied BackPressure and Dual Gradient*. Thèse de Master: Department of Geoscience and Petroleum: Norwegian University of Science and Technology, 101 pages.

BIRD, R. Byron, Stewart, Warren, E., Lightfoot Edwin, N., (200). *Transport phenomena: Second Edition*, John Wiley & Sons: Wisconsin, USA .2002 .898 pages, ISBN 0-471-41077-2

BOURGOYNE, Adam.T, Millheim, K.Keith, Chenevert. Martin.E, Young.F.S. *Applied Drilling Engineering*, SPE, Richardson Texas, 1991 ISBN 1-55563-001-4

Comité des techniciens de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, (1982). *Drillingmud and cement slurry rheology manuel*, Paris: Technip, 107pages, ISBN 978-94-010-9248-7

DWIGHT K. Smith, *Cementing*, SPE, Richardson TX USA, 1989, 254pages, ISBN 978-1-55563-006-5

DOWNEY. Allen *Think Python : How to Think Like a Computer Scientist*. (2012). Edition : Green Tea Press. Massachusetts. (2012).

GUCUYENER, L.H., *A rheological model for drilling fluids and cement slurries*, Middle East Technical University, Mars, 1983, SPE, n°11487, p 389-393

KAASA, G. O., Stamnes, Ø. N., Imsland, L., & Aamo, O. M. (2012). Simplified Hydraulics Model Used for Intelligent Estimation of Downhole Pressure for a Managed-Pressure Drilling Control System. Society of Petroleum Engineers.

Disponible sur :

https://www.researchgate.net/publication/241794526_Simplified_Hydraulics_Model_Used_for_Intelligent_Estimation_of_Downhole_Pressure_for_a_Managed-Pressure-Drilling_Control_System

KHOSHNAW, F. Jaf, P. Farkha, S. Pore, *Abnormal Formation and Fracture Pressures Prediction*. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*. July 2015, Vol.2, n° 7.

Disponiblesur : [://www.researchgate.net/publication/301496565_Pore_Abnormal_Formation_and_Fracture_Pressure_Prediction](https://www.researchgate.net/publication/301496565_Pore_Abnormal_Formation_and_Fracture_Pressure_Prediction)

KREYSZIG.E, Kreyszig. H, Edward J.Normintion,(2011), *Advanced engineering mathematics*, Vol: 10 Editions, 130 pages, ISBN 978-0-470-45836-5

LAVROV, Alexandre et Torsæter, Malin, (2016). *Physics and Mechanics of Primary Well Cementing* Springer Briefs in Petroleum Geoscience & Engineering, Edinburgh, UK. 108 pages, ISBN 978-3-319-43165-9 (eBook)

LEONOV, E. et Isaev, V. I. *Hydro aeromechanics in oil and gas drilling*. John Wiley & Sons, Inc Hoboken, New Jersey, 2010. 443P. Translated from Russian into English by Emmanuil G. Sinaiski. ISBN 978-0-470-48756-3

NELSON, Erik B et Dominique. Guillot, Schlumberger, *Well Cementing: Second Edition*, Texas, 2006, ISBN-13: 978-097885300-6, 773 pages

NGUYEN, J.P., (1993). *Technique d'exploitation pétrolière : Le forage*, Paris : Technip, 378 pages, ISBN 2-7108-0631-2.

SATKAN, Comert. *Equivalent circulating density contribution to the plastering effect of casing while drilling technology: analysis of annular fluid velocity and annular pressure through computational fluid dynamics*. (2013). Thèse de Master: Petroleum Engineering: Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines, 123 pages.

STAMNES, Ø. N., Mjaavatten, E., & Falk, K. (2012). A Simplified Model for Multi-Fluid Dual Gradient Drilling Operations. *IFAC*.

Disponible sur :

<http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/offshore-control-2012/papers/0010.pdf>

ZAMORA Mario, Sanjit Roy, and Ken Slater. American Association of Drilling Engineers, National Technical Conference: *Comparing a Basic Set of Drilling Fluid Pressure-Loss Relationships to Flow-Loop and Field Data* à Houston, Texas, sponsored by the Houston. , 5-7 Avril, 2005. AADE-05-NTCE-27.

Annexe



Annexe1 : Unité de cimentation



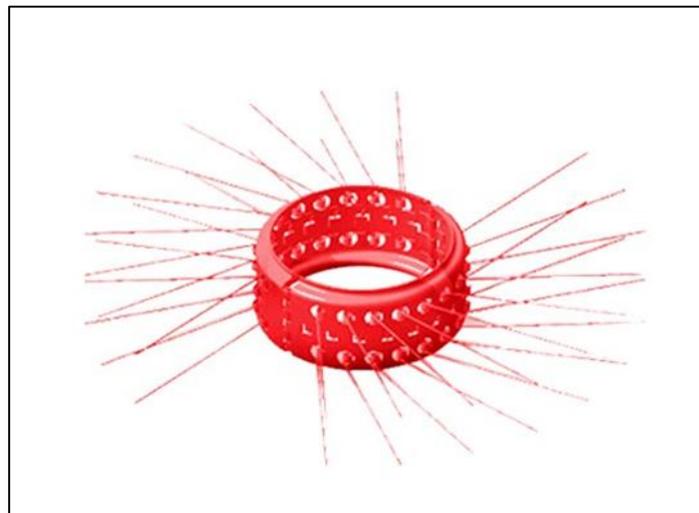
Annexe 2 : Bouchons (Source : <http://www.kinglandpetro.com/category/cementing-tools>)



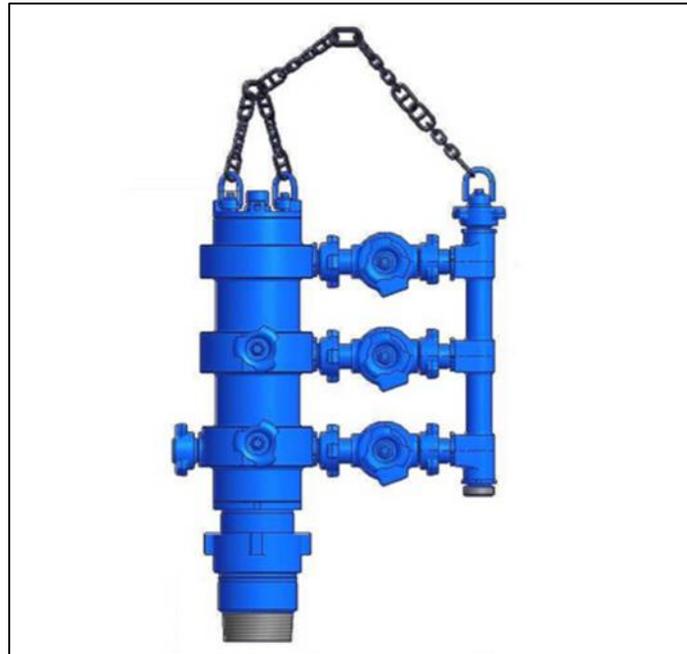
Annexe 3 : Centreurs

Annexe 4 : Sabot

(Source : <http://www.kinglandpetro.com/category/cementing-tools>)



Annexe 5 : Gratteur (Source : <https://www.cementingtool.com/stop-collar/wire-bristle-scratcher.html>)



Annexe 6 : Tête de cimentation (Source : <https://www.cementingtool.com/cementing-head1/ultra-high-pressure-double-plug-cementing-head.html>)



Annexe 7 : Ombrelle de cimentation (source : <https://www.cementingtool.com/cementing-basket/slip-on-cement-basket.html>)