



**HAL**  
open science

## Une application des ciments: le chemisage des puits de pétrole

Sylvie Masse

► **To cite this version:**

Sylvie Masse. Une application des ciments: le chemisage des puits de pétrole. Les Dossiers de la Galerie, 1993, 3, pp.6-12. <hal-02321187>

**HAL Id: hal-02321187**

**<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-02321187v1>**

Submitted on 24 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# UNE APPLICATION DES CIMENTS CHEMISAGE DES PUIITS DE PETROLE

*par Sylvie Masse*

E.S.C.P., laboratoire de Physique thermique

## Historique

Les premières cimentations de puits pétroliers ont eu lieu au début du siècle. A cette époque, la profondeur des puits n'excédait pas 600 mètres et la cimentation était généralement

réalisée par les foreurs eux-mêmes.

De nos jours, les puits atteignent couramment 6000 mètres de profondeur et les opérations de cimentation en sont d'autant plus difficiles. C'est pourquoi on fait maintenant appel à des

compagnies de service spécialisées. Lorsque les opérations de cimentation sont effectuées au cours du forage du puits, on dit de ces opérations qu'elles sont primaires; lorsqu'elles sont consécutives à des modifications ou à des réparations du puits, on dit qu'elles sont secondaires.

\* \* \* \*

### Les impératifs actuels

Depuis quelques années, on simule et on optimise les opérations de cimentation par modélisation sur ordinateur. Durant le pompage du laitier de ciment, des données physico-chimiques et mécaniques telles que la résistance à la compression et la viscosité sont enregistrées et analysées afin de parfaire le placement de la gaine de ciment entre la formation rocheuse et le cuvelage en acier introduit dans le trou de forage.

La réussite d'une opération de cimentation dépend essentiellement de la nature du ciment et du choix judicieux des additifs qui entrent dans sa composition.

Les ciments utilisés pour les puits pétroliers doivent résister à des conditions assez rudes; à 6000 mètres de profondeur, la température statique de fond du puits peut atteindre 200° C et la pression qui règne alors est de l'ordre de 1,5 kilobar.

Le ciment Portland est le plus utilisé des liants hydrauliques, car il prend, durcit et développe une résistance à la compression par hydratation et non par séchage. C'est la raison pour laquelle il peut prendre aussi bien à l'air que sous l'eau. Quand il est pris, il présente une faible perméabilité à l'eau et résiste donc bien à ses attaques. Il constitue donc un matériau idéal pour une utilisation dans les compléments pétroliers.

\* \* \* \*

### Utilisation du ciment au cours des forages pétroliers

Après sondage et analyse des carottes (échantillons cylindriques prélevés dans la roche et mesurant de 50 à 100 mm de diamètre et de 9 à 27 m de long), le trou est "tubé", c'est-à-dire chemisé par une série de colonnes de tubes en acier à haute résistance de 9 à 12 m de long. Les colonnes sont de trois types :

- La colonne de surface, dont la longueur est comprise entre 100 et 1000 m, est destinée à retenir les terrains de surface peu consolidés.
- La colonne technique a pour rôle, si nécessaire, d'éliminer les couches ou les fluides empêchant la bonne poursuite des opérations de

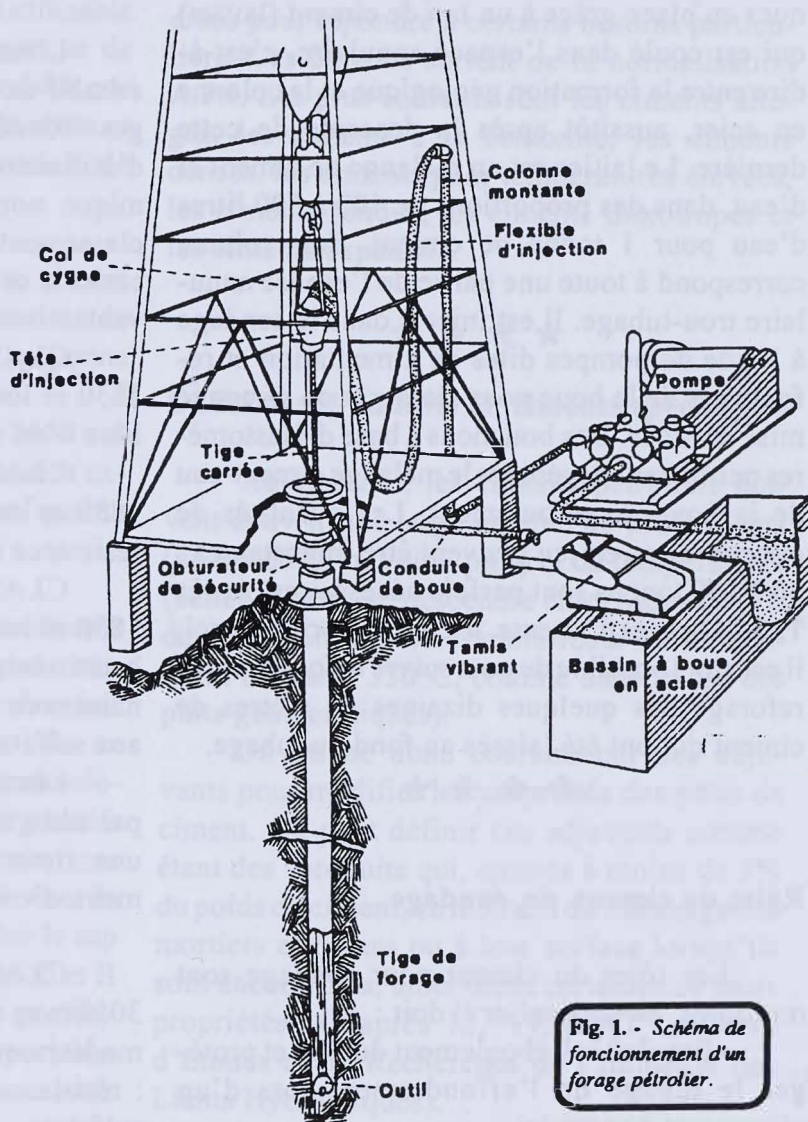


Fig. 1. - Schéma de fonctionnement d'un forage pétrolier.

forage.

- La colonne de production, si le puits est positif, permet d'isoler la zone pétrolifère. C'est dans cette colonne que sera introduit le "tubage", tube qui permettra l'écoulement du pétrole.

Les débris de roche (déblais) produits par les outils de forage (trépans à molettes dentées ou trépans diamantés) sont entraînés à la surface par circulation d'un fluide, obtenu par mélange d'eau et d'argile, et appelé boue de forage. Arrivés à la surface, ces déblais vont être analysés, afin de connaître la nature des terrains géologiques traversés.

A ce stade, les tubes sont vissés les uns aux autres et descendus dans le sondage plein de boue. Les diverses colonnes sont alors maintenues en place grâce à un lait de ciment (laitier) qui est coulé dans l'espace annulaire, c'est-à-dire entre la formation géologique et la colonne en acier, aussitôt après la descente de cette dernière. Le laitier est un mélange de ciment et d'eau, dans des proportions de 400 à 500 litres d'eau pour 1 tonne de ciment. Son volume correspond à toute une partie de l'espace annulaire trou-tubage. Il est injecté dans le sondage à l'aide de pompes dites de cimentation et refoulé par de la boue pour s'assurer de sa bonne mise en place. Des bouchons à base d'élastomères permettent de séparer le mélange ciment-eau de la boue de refoulement. Les quantités de ciment mises en jeu peuvent être importantes : 50 à 150 tonnes sont parfois nécessaires. Après 12 à 24 heures d'attente, le ciment a pris et durci ; il est alors possible de poursuivre le forage après reforage des quelques dizaines de mètres de ciment qui ont été laissés au fond du tubage.

\* \* \* \*

### Rôles du ciment de sondage

Les rôles du ciment pour sondage sont multiples ; en particulier il doit :

- Empêcher l'éboulement du trou et protéger le tubage de l'effondrement lors d'un glissement de terrain.

- Ancrer les colonnes de tubage sur lesquelles sont fixés les équipements de sécurité en

tête de puits.

- Réduire la corrosion des tubes attaqués par les fluides de forage agressifs.

- Permettre la mise en tension des tubes.

- Avoir une faible perméabilité afin d'éviter les fuites de gaz et de fluide vers la formation et protéger les niveaux aquifères supérieurs.

- Avoir une bonne adhérence vis à vis de la formation rocheuse et du cuvelage en acier.

- Conserver ces propriétés dans les conditions de fond en température et pression, et résister aux vibrations du tubage qui surviennent lors du forage.

\* \* \* \*

### Différents types de ciment Portland

L'American Petroleum Institute (A.P.I.) a établi un classement des ciments pour sondages fondé principalement sur la profondeur d'utilisation (en admettant un gradient géothermique normal de 3°C par 100 mètres). Ce classement, ainsi que quelques définitions des ciments correspondants (de A à J), est le suivant :

CLASSE A : ciment utilisé de la surface à 1830 m lorsqu'aucune caractéristique particulière n'est demandée.

CLASSE B : ciment utilisé de la surface à 1830 m lorsque les conditions nécessitent une résistance modérée aux sulfates.

CLASSE C : ciment utilisé de la surface à 1830 m lorsque les conditions nécessitent une haute résistance initiale (existe en type ordinaire et en types à résistance modérée ou élevée aux sulfates).

Les ciments de classe C sont caractérisés par une granulométrie plus fine, ce qui permet une vitesse d'hydratation plus grande du ciment, d'où une résistance initiale plus élevée.

CLASSE D : ciment utilisé de 1830 m à 3050 m en conditions de température et pression modérément élevées (existe dans les deux types : résistance modérée et résistance élevée aux sulfates).

CLASSE E : ciment utilisé de 3050 m à

4270 m dans des conditions de température et pression élevées (existe dans les deux types : résistance modérée et élevée aux sulfates).

**CLASSE F** : ciment utilisé de 3050 m à 4880 m dans des conditions de température et pression très élevées (existe dans les deux types : résistance modérée et élevée aux sulfates).

**CLASSE G** : ciment utilisé comme ciment de base pour cimenter de la surface à 2440 m, tel quel ou avec des accélérateurs ou des retardateurs, afin de couvrir une large gamme de profondeurs et de températures (existe dans les deux types : résistance modérée et élevée aux sulfates).

Ce ciment a été étudié pour être utilisable dans une large gamme de températures et de pressions du fait qu'il peut être modifié par l'ajout des accélérateurs ou des retardateurs proposés par les sociétés de service de cimentation.

**CLASSE H** : ciment similaire au ciment de classe G mais prévu pour des densités de laitier supérieures (existe en qualité moyenne résistance aux sulfates).

**CLASSE J** : ciment utilisable de 3660 m à 4880 m pour des températures et pressions extrêmement élevées. Existe seulement en qualité à haute résistance aux sulfates.

D'un point de vue historique, les ciments de classes A, B et C ont été créés les premiers, dans les années 1950. Utilisés pour chemiser des puits de moins de 1830 mètres, ils ne suffirent bientôt plus face à l'avancée technologique. Dix ans plus tard, l'utilisation d'additifs chimiques permet de restreindre les limitations en profondeur : c'est la naissance des ciments de classes D, E, F et J, qui nous font franchir le cap des 4880 mètres. Les ciments de classes G et H permettent d'obtenir une gamme de profondeurs encore plus vaste grâce à l'incorporation d'additifs; leurs spécifications sont très strictes mais leur comportement d'autant plus prévisible.

classe du ciment	rapport eau/ciment	C3S (%)	B-C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)	finesse (cm <sup>2</sup> /g)
A	0.46	45	27	11	8	1600
B	0.46	44	31	5	13	1600
C	0.56	53	19	11	9	2200
D	0.38	28	49	4	12	1500
E	0.38	38	43	4	9	1500
F	0.38	-	-	-	-	-
G	0.44	50	30	5	12	1800
H	0.38	50	30	5	12	1600
I	-	-	-	-	-	-

Il existe de plus des ciments spéciaux créés pour répondre à certains besoins particuliers. Ces ciments sortent de la normalisation A.P.I. Les plus courants sont les ciments allégés, les ciments à la bentonite, les ciments denses, les ciments pour températures élevées, les ciments fondus, les ciments thixotropes et les ciments expansifs.

\* \* \* \*

#### Utilisation d'additifs et ciments spécifiques

Aujourd'hui, les ciments pétroliers doivent couvrir une large gamme de profondeurs (de 0 à 6000 m, voire plus) et de températures (celles-ci peuvent descendre en-dessous de 0°C dans les zones dites «Permafrost» ou au contraire dépasser 350°C, comme dans le cas des puits géothermiques).

On utilise donc couramment des adjuvants pour modifier les propriétés des pâtes de ciment. On peut définir ces adjuvants comme étant des "produits qui, ajoutés à moins de 5% du poids du ciment, au moment du malaxage des mortiers et bétons ou à leur surface lorsqu'ils sont encore frais, améliorent certaines de leurs propriétés" (d'après M. VENUAT - Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques).

On peut classer ces additifs en 8 grands types:

- Les accélérateurs.
- Les retardateurs.
- Les étendeurs.
- Les agents alourdissants.
- Les dispersants.
- Les agents de contrôle de perte de fluide.
- Les agents de contrôle de perte de circulation.
- Les additifs spéciaux.

Les *adjuvants*, classés selon leurs effets primaires, manifestent souvent parallèlement des propriétés secondaires; cela explique pourquoi on peut trouver un même adjuvant utilisé pour deux applications. Souvent, il faut tenir compte des effets secondaires d'un adjuvant et les compenser par l'effet d'un autre.

Les *accélérateurs* et les *retardateurs* sont des produits chimiques qui agissent en modifiant la solubilité et donc la vitesse de dissolution des différents constituants des ciments. Leur action est souvent très complexe et parfois difficile à expliquer. En règle générale, il en faut des doses assez élevées (1 à 3%) pour accélérer les phénomènes de prise et de durcissement, et au contraire des doses extrêmement faibles (0,1%) pour les retarder. Paradoxalement, un même adjuvant peut jouer le rôle d'accélérateur ou de retardateur selon la dose de produit et la nature du ciment.

Les *accélérateurs* entrent dans la composition des ciments pour puits peu profonds et à basse température (ce qui va souvent de pair). Ils augmentent les vitesses de réaction des premiers stades de l'hydratation et réduisent ainsi le temps de prise du ciment. Ils peuvent aussi être incorporés au laitier de ciment pour compenser les effets retardateurs d'autres additifs comme les dispersants et les agents de contrôle de filtrat. Ils sont en général introduits dans des proportions de 2 à 5% du poids du ciment. L'accélérateur de loin le plus utilisé est le chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$ .

Les *retardateurs* sont au contraire utili-

sés pour différer la prise du ciment et permettre ainsi d'avoir suffisamment de temps pour pomper et placer la colonne de ciment dans les puits profonds et chauds. Sans les retardateurs, le ciment prendrait avant même d'atteindre le fond du puits; l'opération de pompage serait donc stoppée, le chemisage du puits interrompu, et le puits serait inexploitable dans ces conditions. Beaucoup de retardateurs manifestent parallèlement des propriétés de fluidifiants ou d'entraîneurs d'air. Les retardateurs sont introduits dans des proportions extrêmement faibles, de l'ordre de 0,1% du poids du ciment. Ce sont généralement des dérivés de la pulpe de bois (des sels de calcium et de sodium des acides lignosulfoniques) ou des dérivés de sucres tels que la cellulose, l'amidon, le saccharose ou le glucose.

Les *étendeurs* sont des additifs destinés à réduire la densité du laitier de ciment et/ou la quantité de ciment par unité de volume. Une réduction de la densité de laitier permet en effet d'abaisser la pression hydrostatique durant la cimentation, ce qui a pour conséquence d'éviter les pertes de circulation de fluide qui peuvent survenir à la suite de fracturations dans les formations faibles. D'autre part, ces produits étant moins chers que le ciment lui-même, la réduction de la quantité de laitier nécessaire permet à l'utilisateur de réaliser des économies substantielles.

On peut classer les étendeurs en 3 sous-familles :

- Les étendeurs d'eau, tels que les argiles et autres agents viscosifiants, autorisent l'addition d'un excès d'eau dans le laitier. L'exemple le plus fréquent est celui de la bentonite qui doit contenir au moins 85% de montmorillonite, un minéral argileux du groupe des smectites et ayant pour formule  $\text{NaAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ .

- Les agrégats à densité plus faible que le ciment Portland, tels que les pouzzolanes, des matériaux siliceux ou alumino-siliceux qui tirent leur nom de formations volcaniques meubles, et qui sont obtenus, soit naturellement à partir des cendres volcaniques ou des terres de diatomées (diatomites), soit artificiellement à partir de certaines cendres volantes ou de fu-

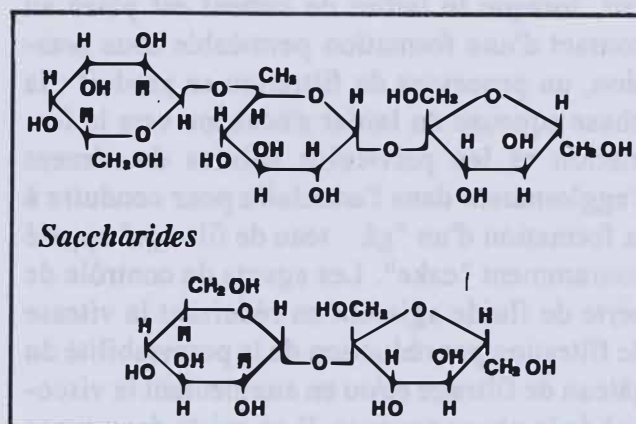
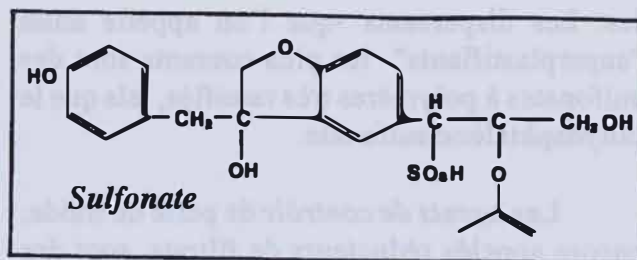
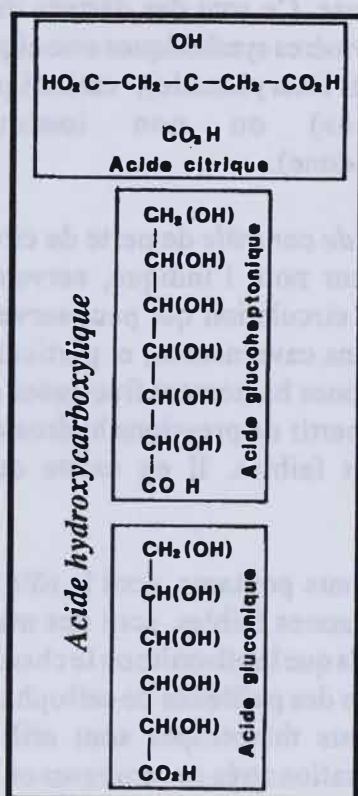


Fig. 2 . - Structure moléculaire de quelques retardateurs.

mées de silice (de la silice finement divisée).

- Les étendeurs gazeux, ou "entraîneurs d'air", contenant de l'air ou de l'azote, peuvent être utilisés pour préparer des ciments-mousses qui peuvent présenter de très faibles densités.

Les *agents alourdisants* sont au contraire des matériaux utilisés pour augmenter la densité du laitier de ciment. Ils sont employés pour la cimentation des puits à haute pression de gaz ou dont les parois sont instables, car, dans ces cas, la pression hydrostatique est très élevée. Un premier moyen pour augmenter la densité du laitier consiste à réduire la quantité d'eau nécessaire au gâchage. Mais il faut alors veiller à ce que la pompabilité soit maintenue... Aussi ajoute-t-on au laitier des dispersants (voir plus loin). Un second moyen pour obtenir un laitier de plus haute densité consiste à lui incorporer des minéraux de forte densité comme l'ilménite  $\text{FeTiO}_3$ , donnant un matériau granuleux noir, l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que

l'on utilise sous forme de granules cristallins rouges, ou la barite  $\text{BaSO}_4$ , sorte de poudre blanche.

Les *dispersants* sont utilisés pour contrôler la rhéologie des laitiers de ciment et pour permettre la réduction de leur teneur en eau sans les rendre trop visqueux pour être pompés. En effet, la bonne pompabilité du laitier est indispensable à la mise en oeuvre des régimes de pompage turbulents nécessaires à l'obtention d'une circulation de boue de forage correcte. Or, c'est cette dernière condition qui sanctionne le succès d'une opération de cimentation. Les laitiers de ciment sont en fait des suspensions hautement concentrées de particules solides en milieu aqueux : la phase solide d'un laitier peut en représenter jusqu'à 70%. Il semble donc prévisible que des interactions de nature électrostatique soient mises en jeu entre ces particules solides chargées. Le rôle des dispersants est aussi de neutraliser les charges de ces particu-

les. Les dispersants -que l'on appelle aussi "superplastifiants"- les plus courants sont des sulfonates à polymères très ramifiés, tels que le polynaphtalène sulfonate.

Les agents de contrôle de perte de fluide, encore appelés réducteurs de filtrats, sont des matériaux qui contrôlent la perte de la phase aqueuse du ciment à travers la formation. En fait, lorsque le laitier de ciment est placé au contact d'une formation perméable sous pression, un processus de filtration se produit : la phase aqueuse du laitier s'échappe vers la formation et les particules solides du ciment s'agglomèrent dans l'annulaire pour conduire à la formation d'un "gâteau de filtrage" appelé couramment "cake". Les agents de contrôle de perte de fluide agissent en réduisant la vitesse de filtration par réduction de la perméabilité du gâteau de filtrage et/ou en augmentant la viscosité de la phase aqueuse. Il en existe deux types :

- Les matériaux constitués de particules finement divisées telles que de la bentonite, des poudres de carbonates, des résines thermoplastiques, des asphaltènes ou des petites particules sphériques de polymères. Ces particules peuvent se loger entre les particules de ciment du gâteau de filtrage et réduire ainsi sa perméabilité.

- Les polymères solubles dans l'eau agissent à la fois en réduisant la perméabilité du gâteau de filtrage et en augmentant la viscosité

de la phase aqueuse. Ce sont des dérivés de la cellulose, des polymères synthétiques anioniques (copolymères de l'acrylamide), cationiques (polyalkylamines) ou non ioniques (polyvinylpyrrolidone).

Les agents de contrôle de perte de circulation, comme leur nom l'indique, servent à éviter la perte de circulation qui peut survenir dans les formations cavernueuses, et particulièrement dans les zones hautement fracturées qui peuvent casser à partir de pressions hydrostatiques relativement faibles. Il en existe deux types :

- Les matériaux pontants, dont le rôle est de consolider les zones faibles, sont des matériaux granuleux tels que la gilsonite ou le charbon granulaire, ou bien des paillettes de cellophane.

- Les ciments thixotropes sont utilisés dans le cas de formations très cavernueuses où les matériaux pontants ne sont plus suffisamment efficaces. Après leur mise en place, ces ciments se gélifient et bouchent ainsi les fissures de la formation, ce qui permet de bloquer la perte de fluide.

Certains matériaux ajoutés au laitier de ciment n'entrent dans aucune des catégories précédemment énumérées. On les regroupe sous le terme d'additifs spéciaux : ce sont, par exemple, des agents anti-mousse, des matériaux fibreux, des traceurs radioactifs, des décontaminants de boue, etc.

