Exposé de M. Arnaudeau

Les travaux de l'Institut français du pétrole dans le domaine du pompage diphasique des effluents pétroliers.

L'Industrie pétrolière utilisera dans un proche avenir des systèmes et des équipements de transfert diphasique marins ou sous-marins qui permettront la production et le transport de tout l'effluent pétrolier (huile saturée de gaz et gaz libre associé) du fond du puits jusqu'à la côte sans traitement séparé, ni brûlage de la phase gazeuse.

Les systèmes de transfert diphasique I F P ont pour but de mettre à la disposition des utilisateurs et au moindre

coût technique ce gaz associé dont la masse peut représenter 15 à 25 % de la masse d'huile.

La *figure 14* donne une photographie de la première pompe diphasique immergée pour puits pétrolier.

C'est une pompe cylindrique tubulaire entraînée par un moteur électrique lui aussi immergé dans le puits. Ce groupe moto-pompe tourne à une vitesse réglable entre 3 000 et 4 500 tr/min.

Cette pompe aspire le mélange diphasique au fond du puits et le refoule à la pression désirée jusqu'à la tête du puits.

L'effluent pétrolier peut contenir de l'eau de gisement saturée en sel, du gaz carbonique, de l'hydrogène sulfureux ainsi que des particules solides : l'équipement de pompage est réalisé pour fonctionner normalement en présence de ces fluides agressifs.

Intérêt des pompes diphasiques en production pétrolière : pompes diphasiques hors puits

On sait produire depuis plus de 100 ans le pétrole brut liquide dans de bonnes conditions techniques. Le gaz associé étant très souvent brûlé pour de multiples raisons technico-économiques. En effet la compression séparée de la phase gazeuse, obtenue après la détente complète de l'effluent diphasique, est trop onéreuse, de même l'évacuation de ce gaz par un pipe-line vers les lieux de consommation.

En mer où les investissements et les coûts d'exploitation sont très élevés et où on désire réduire au mieux la masse des équipements installés la seule solution technique est de comprimer l'effluent diphasique tel qu'il sort du puits. D'autre part, l'industrie pétrolière s'est dotée de techniques et d'outils de calculs pour définir correctement les conditions de fonctionnement des pipes-lines dans lesquels s'écoulent les mélanges huile-gaz. Citons parmi les différents travaux réalisés dans ce domaine ceux développés par l'Association I.F.P. — C.F.P. — S.N.E.A.P.

L'opération technique la plus délicate à réaliser consiste, dans ce nouveau mode de production, à communiquer au fluide diphasique la quantité d'énergie suffisante, nécessaire au pompage correct, dans le pipe-line unique, de toute la production sortant des puits.

Des pompes diphasiques telle la pompe immergée (présentée ci-dessus) de capacité diphasique modeste ($GLR = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$)* et telle la pompe diphasique hors puits dite « à forts GOR » (GOR voisin de $5 \text{ m}^3/\text{m}^3$)*, associée à un ensemble d'équipements diphasiques spécifiques réaliseront le transfert d'énergie. L'I.F.P. procède actuellement au développement théorique expérimental et industriel de ses procédés et des différents équipements nécessaires.**.

On présente en *annexe 2* différents schémas possibles de production diphasique pétrolière.

Méthodologie du développement

Les travaux de recherche ont été développés selon une méthode classique basée sur l'expérimentation diphasique et mécanique de machines modélisant physiquement les

En résumé, les étapes successives de cette recherche ont été les suivantes :

- Définition complète des modes de production diphasique nécessaires et indispensables à la récupération au moindre coût du gaz associé.
- Principe et conception des machines diphasiques : pompes et équipements associés.
- Expérimentation des prototypes de différentes dimensions :

— prototypes Echelle réduite 300 T/j basse pression sur banc d'essais permettant la visualisation des phénomènes en fluides de laboratoire;

— prototypes Echelle 1 000 T/jour sur banc d'essais haute pression en fluides pétroliers.

- Interprétation des essais et propositions de modélisation des phénomènes.

Comme pour tous les travaux de recherche dans le domaine de la mécanique des fluides diphasiques les moyens d'essais doivent être particulièrement bien adaptés.

la *figure 15* donne le schéma de principe de fonctionnement des bancs d'essais; la *figure 16* montre la pompe diphasique hors puits en cours d'essais sur banc haute pression.

Les essais des prototypes sont réalisés à des vitesses de rotation élevées 3 000 — 4 500 tr/min pour les pompes fond de puits, 4 000 — 6 000 tr/min et prochainement 8 000 tr/min pour les pompes hors puits. Ceci entraîne, parallèlement à la mise au point des hydrauliques, l'étude approfondie tant théorique qu'expérimentale des systèmes mécaniques fonctionnant en fluide diphasique; d'où la mise en place de bancs d'essais appropriés à l'expérimentation d'équipements mécaniques pour lesquels le comportement est souvent mal connu.

Pour l'interprétation des essais réalisés, la modélisation des phénomènes est pratiquement la même que celle utilisée par les chercheurs étudiant le fonctionnement des pompes de centrales nucléaires (travaux précédemment présentés) : on compare le comportement des pompes fonctionnant en fluide diphasique d'une part, et en liquide d'autre part.

On doit ici souligner la complexité des phénomènes fondamentaux : apport de quantité de mouvement et dégradation de l'énergie.

Résultats

Dans le cadre de cette recherche, l'I.F.P. a pour mission :

- de mettre en évidence la validité des concepts et d'établir son dossier de brevets;
- d'aider au développement industriel des motopompes fond de puits (contrat I.F.P. — C.F.P.L.S.P.G. : industrialisation et commercialisation en cours);
- de mettre au point les systèmes de transfert et de pompage diphasique hors puits.

(*) Voir définition à l'annexe 1.

(**) Procédés et équipements diphasiques brevetés par l'I.F.P.

Figure 14 — La première pompe diphasique immergée pour puits pétrolier.

Figure 15 — Banc d'essai de transfert diphasique : circulation des fluides et mesures.

Figure 16 — La pompe diphasique en cours d'essais sur banc haute pression.

Figure 17 — Courbes caractéristiques débit-pression d'une pompe diphasique fonds de puits.

La figure 17 donne les courbes caractéristiques débit-pression d'une pompe diphasique fond de puits type 35 HA, qui regroupent deux faisceaux de courbes :

- à GOR constant et à vitesse variable : courbes type « BB » ;
- à vitesse constante et à GOR variable : courbes type « AB ».

A noter qu'un système diphasique ne fonctionne de manière stable que s'il est associé à un système de régulation parfaitement défini : ainsi dans le cas de la pompe fond, le gisement d'une part et le tubage de production d'autre part sont les systèmes amont et aval de régulation.

Le rendement pratique de la compression diphasique est acceptable; ce rendement est exprimé par le rapport entre la somme des travaux de compression du gaz et du liquide et le travail mécanique développé sur l'arbre moteur. Si l'on compare le rendement de la pompe diphasique fonctionnant à un débit volumique liquide-gaz donné, au rendement de cette même pompe refoulant du liquide à un débit égal au débit volumique diphasique ci-avant, on constate que ces deux valeurs sont voisines. Le transfert de la quantité de mouvement est réalisé sans dégradation notable de l'énergie. En revanche, l'obtention d'un gain de pression suffisamment élevé pour nos applications industrielles réelles, ne peut être obtenu que par un fonctionnement de ces pompes à vitesses élevées; d'où cette nécessité d'opérer avec des prototypes « modèles physiques » parfaitement adaptés hydrauliquement et mécaniquement.

Débat final et clôture de la table ronde

1) **REMARQUE DE MONSIEUR BONNIN.** — La similitude des turbomachines doit être appliquée avec une grande prudence en régime diphasique. Si, en monophasique, des degrés de liberté existent, il en va tout autrement en diphasique : le respect des déséquilibres thermodynamiques et mécaniques de l'écoulement impose un nombre surabondant des conditions. Seule la solution triviale : échelle 1 est alors acceptable.

En pratique, on supprime une des conditions de déséquilibre et on tombe sur différentes échelles, suivant le cas où l'on se place.

RÉPONSE DE M. LE PRÉSIDENT. — Cette remarque générale sur la notion de similitude est justifiée.

2) **QUESTION DE M. HUFFENUS.** — Dans son exposé sur CATHARE, M. ROUSSEAU était d'accord pour penser avec moi que les modélisations monodimensionnelles actuelles ne peuvent être qu'imparfaites car elles reposent sur des expériences faites le plus souvent en régime établi.

Cette imperfection est plus grave dans les pompes où les différents éléments se succèdent très rapidement. Et cependant, ces modélisations fournissent des résultats intéressants. Pourquoi ?

RÉPONSE DE M. GRISON. — J'ai été le premier surpris, utilisant le modèle monodimensionnel de CATHARE, de trouver une dégradation qualitativement correcte :

Les courbes se dégradent avec le taux de vide et remontent ensuite, simplement en introduisant une corrélation de glissement entre phases. Mais en réalité ce n'est pas très étonnant parce que cette dégradation est liée à l'échange d'énergie en sortie de pompe, et le fait qu'il y ait une vitesse « vapeur » et une vitesse « liquide » très différentes introduit évidemment cette dégradation.

En réalité, il y a des phénomènes bi et tridimensionnels liés en particulier au niveau des pertes, au niveau des recirculations, au niveau des pertes d'incidences, qu'on ne prendra jamais en compte. Mais je crois que la base du phénomène reste valable et qu'on peut donc quand même arriver à quelque chose.

Même si la modélisation développée n'est pas généralisable (par exemple au cas des pompes axiales), elle donne une bonne idée des phénomènes physiques.

RÉPONSE DE M. DE CRÉCY. — Les résultats qu'on obtient sont toujours beaucoup plus mauvais dans le second quadrant que dans le premier et dans le troisième, c'est-à-dire que les résultats sont beaucoup plus mauvais lorsqu'effectivement on est beaucoup moins monodirectionnel.

3) **QUESTION DE M. FELL.** — Pourrait-on avoir la référence des différents travaux auxquels il a été fait allusion au cours de la table ronde ?

RÉPONSE DE M. GRANDJEAN. — Aucun résultat du programme EVA n'a été publié.

RÉPONSE DE M. DE CRÉCY. — Une partie de l'étude que je vous ai présentée (stratification) a fait l'objet d'un document présenté à l'European Two Phase Flow Meeting de juin 1983 à Zurich.

D'autres papiers, actuellement internes au C.E.A. feront peut-être l'objet d'une future publication.

RÉPONSE DE M. ARNAUDEAU. — Pour des raisons de secret et d'accords industriels, entre sociétés pétrolières, aucune publication n'a été faite.

4) **CLOTURE DE LA TABLE RONDE PAR M. SÉMÉRIA.** — Je vais conclure très brièvement l'ensemble de nos trois sessions et de cette table ronde, en vous remerciant de votre assiduité et en vous remerciant d'avoir participé activement aux discussions.

Le Président de la S.H.F. tirera peut-être des conclusions plus générales tout à l'heure. Quant à moi, j'espère que vous avez pu voir que les modélisations diphasiques qui sont actuellement

développées et qui sont relativement lourdes sur le plan du coût des calculs et de la difficulté de les établir, ne pourront qu'être de plus en plus faciles dans l'avenir. Il faut penser que dans 5 ou 10 ans ce genre de modélisation devrait devenir beaucoup plus courant et ceci même en dehors de l'industrie nucléaire et de l'industrie pétrolière.

Je crois qu'il est normal que les branches industrielles qui ont affaire à des systèmes diphasiques, avec des écoulements diphasiques permanents et transitoires, pensent à développer la modélisation de leurs systèmes dans la mesure où cela peut être utile pour une meilleure exploitation et pour une meilleure analyse de la sûreté.

En ce qui concerne la physique des pompes, vous avez pu voir que les modèles physiques qu'on est appelé à retenir sont parfois rustiques, même par rapport au degré des connaissances actuelles. Mais lorsqu'on analyse assez finement le comportement d'un composant, on s'aperçoit que nos connaissances en physique ne sont pas suffisantes : en ce qui concerne l'analyse des comportements des volumes en régime diphasique par exemple nous n'avons qu'un nombre restreint d'expériences. Le domaine des singularités est extrêmement mal dominé : on a des résultats globaux, mais on a des difficultés à faire un modèle tout à fait crédible sur le plan de la physique.

Vous pouvez en tirer la conclusion que notre connaissance en physique est loin d'atteindre un degré de maturité suffisant pour considérer qu'on peut se reposer un peu et faire des acrobaties numériques sur une physique bien établie... Nous sommes loin du compte, et nous pensons bien que nos collègues, dans les Universités, au C.N.R.S., dans la Recherche Appliquée, à E.D.F. doivent continuer leurs études pour nous permettre d'améliorer nos connaissances en physique.

Je vous remercie.

Annexe 1

Pompe diphasique fond de puits

- Pompe développée par l'Institut Français du Pétrole (I.F.P.) et la Compagnie Française des Pétroles (C.F.P.)
- Pompe fabriquée par la Société Moteurs Leroy-Somer — Pompes Guinard sous licence I.F.P.
- Expérimentation sur site C.F.P. en 1984.
- Caractéristiques générales

— Débit nominal	1 000 t/jour
— GOR (1) de l'effluent	0,3 m ³ /m ³
— GLR (2) de l'effluent	0,5 m ³ /m ³
— Vitesse de rotation ..	3 000 à 4 500 tr/mn
— Gain de pression : (adapté au GOR et à la vitesse)	30 à 70 bars
— Diamètre	160 mm
— Longueur	4 à 6 mètres
— Puissance	150 à 300 CH

Nota (1) — GOR : Rapport volumétrique gaz libre-huile saturée mesurée à la pression et à la température d'aspiration de la pompe.

(2) — GLR : Rapport volumétrique gaz libre — huile + eau dans les mêmes conditions.

Annexe 2

Schémas possibles de production diphasique pétrolière

1. Le gaz associé est brûlé.

2. La pression puits est très grande. On peut produire directement tout l'effluent.

3. La pression décroît. Il faut fournir de l'énergie à l'effluent diphasique.

4. Si la profondeur d'eau est grande, il est préférable d'utiliser une plateforme semi-sous-marine.

5. L'équipement est immergé. La puissance électrique est fournie à partir de la « péninsule de service ».

6. L'exploitation diphasique de l'huile et de son gaz associé est sous-marinisée.