

MINISTERE DE L'EQUIPEMENT ET DU LOGEMENT

(S. A. E. I.)

PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES TRANSPORTS

PAR CONDUITES EN 1985

SOCIETE D'ECONOMIE ET DE MATHEMATIQUE APPLIQUEES

P A R I S

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION	1
<u>CHAPITRE 1 - APPLICATIONS ACTUELLES</u>	3
1. Produits Energétiques	4
1.1. Pétrole brut	4
1.2. Produits raffinés	9
2. Produits chimiques	12
2.1. Gaz industriels	13
2.2. Produits intermédiaires	15
<u>CHAPITRE 2 - PROGRES TECHNIQUE</u>	20
1. Tubes, dimensions, matériaux	21
1.1. Le diamètre des tubes	22
1.2. L'épaisseur des tubes	24
1.3. Procédure de fabrication	25
1.4. Autres matériaux	26
2. Techniques complémentaires	28
2.1. Les pompes	28
2.2. Mécanisation de la pose	30
2.3. Automatisation	32
2.4. Autres progrès : les revêtements intérieurs	33
3. Techniques nouvelles	34
3.1. Isolation thermique	35
3.2. Les solides en suspension	38
3.3. Les capsules	40
<u>CHAPITRE 3 - EVOLUTION DES COUTS</u>	43
1. Coûts relatifs par type de produit	44
1.1. Le fuel lourd/brut visqueux/soufre	47
1.2. Le gaz naturel liquéfié	48
1.3. Les solides en suspension	49
1.4. Les capsules	50
1.5. Tableau récapitulatif des coûts relatifs	51

2. Evolution probable des coûts d'investissement	51
2.1. Les tendances récentes	51
2.2. Incidence à long terme du progrès technique	53
<u>CHAPITRE 4 - PERSPECTIVES EN FRANCE ET ETUDES DE CAS</u>	
<u>TYPES DE RESEAUX</u>	55
1. Applications nouvelles	55
1.1. Les produits chimiques	56
1.2. Les solides en suspension	60
1.3. Les capsules	63
1.4. Les produits alimentaires	64
1.5. Produits utilisant l'isolation thermique	66
2. Etude de cas types de réseaux	68
2.1. Définition des cas types	69
2.2. Les coûts élémentaires	71
2.3. Résultats des calculs du prix de revient en 1985	74
CONCLUSION	87

INTRODUCTION

Le Ministère de l'Équipement a confié à la SEMA une étude sur les perspectives du transport par conduite en France en 1985. Cette étude a pour but :

- de mettre en évidence l'importance actuelle de ce moyen de transport et l'économie des produits transportés, en citant des ouvrages déjà réalisés d'une part en Europe et d'autre part en Amérique du Nord.
- d'évaluer les développements technologiques, propres aux transports par conduite, d'une part dans un passé récent et d'autre part pour ceux qui pourraient être réalisés d'ici 1985.
- d'étudier ensuite les différents types de prestations prévisibles en France en 1985 et d'évaluer les coûts de transport selon un certain nombre de "cas types" de transport par conduite. Cette dernière analyse sera tentée sur la base des données techniques précisées au cours des deux premières étapes.

L'étude comportera quatre parties :

- Applications Actuelles
- Progrès Technique
- Evolution des coûts
- Perspectives en France et étude de cas types.

Dans cette étude, nous nous proposons de ne pas retenir un examen, malgré leur importance considérable, des transports d'eau et du gaz naturel

parce que ce sont deux biens qui ont été toujours acheminés par conduite et qui seront vraisemblablement assurés par ce mode de transport dans le futur. Les biens que nous voulons considérer sont, en effet, ceux qui donnent lieu à une concurrence, soit parce que la matière est en concurrence avec d'autres matières, soit parce que plusieurs modes de transport s'affrontent pour la même matière.

La recherche effectuée en France pour les trois phases de cette étude a été complétée par des entretiens et des enquêtes menées aux U.S.A. auprès de certains bureaux spécialisés et des compagnies de transport par conduite. Lors de ce voyage, il devint évident qu'une connaissance plus ou moins précise des perspectives des conduites s'avérait très difficile. En effet, il est apparu que du fait que le futur de ce moyen de transport est assuré et que les techniques actuelles sont déjà très efficaces, les compagnies de transport par conduite ont une tendance à rester très conservatrices. Même les bureaux d'engineering spécialisés dans ce domaine ne semblent pas avoir étudié toutes les capacités, les limitations et les possibilités de développement du transport par canalisation. Il convient de noter, donc, qu'il paraît très difficile de faire une estimation des coûts de transport par conduite en 1985 compte tenu d'une évolution technique qui reste très imprécise mais qui semble être assurée d'un développement rapide.

A ce stade, on peut noter également la complexité des variables dont il faut tenir compte lors de la conception d'un certain réseau de canalisations. En effet, pour un certain débit à écouler, il y a une canalisation ayant un état d'équipement optimum, ceci étant relié au rôle opposé de deux facteurs qui agissent sur le prix de revient ; c'est-à-dire :

- les charges d'investissement qui ont une importance inversement proportionnelle au débit et qui varient suivant le terrain, la nature du produit et la distance de liaison.
- les charges d'exploitation qui croissent avec le débit.

Il paraît donc évident que chaque cas individuel mérite une étude spécifique et détaillée et que la généralisation, même par type de service ou de produit, devient très délicate.

CHAPITRE 1 - APPLICATIONS ACTUELLES

Les avantages du transport par canalisation s'expriment par sa sécurité, sa facilité à s'inscrire dans le terrain, sa continuité, mais surtout par son économie vis-à-vis des moyens de transport concurrents. Néanmoins, la canalisation ne présente d'intérêt économique que si elle s'applique à des masses importantes. La spécificité, la fixité et les investissements très lourds nécessitent également des cargaisons continues et assurées d'une prévision à longue échéance. C'est pourquoi son domaine d'application par excellence est depuis longtemps celui des hydrocarbures.

Malgré cette spécialisation initiale, le niveau actuel des besoins a permis au transport par canalisation de se justifier pour de nombreuses autres liaisons industrielles. En effet, on assiste récemment à une extension de l'emploi des conduites surtout dans l'industrie chimique où elles transportent les gaz industriels et les grands intermédiaires de la chimie organique. D'ailleurs, en dehors de l'Europe, les développements techniques ont révélé qu'on peut envisager également de grandes applications pour le transport de solides en suspension ou en capsules, tels que le charbon, les phosphates ou même le blé.

Nous nous proposons néanmoins, dans cette partie de l'étude de nous limiter à un examen des ouvrages qui sont actuellement en utilisation courante; c'est-à-dire les réseaux transportant les produits liquides ou gazeux à température ordinaire, ou rendus liquides par simple compression.

Nous considérons successivement :

- les produits énergétiques ; c'est-à-dire le pétrole brut et les produits raffinés
- les produits chimiques ; c'est-à-dire, d'une part les gaz industriels, et d'autre part les produits intermédiaires

Pour chaque produit nous considérons, d'une part l'économie du produit et, d'autre part les principales canalisations existantes ou projetées. En effet, il ne peut être question d'analyser en détail tous les réseaux de conduite existants dans le monde. Il convient donc de se limiter aux cas les plus importants, en dégagant les caractéristiques principales. On se borne surtout à examiner les réseaux d'Amérique du Nord et de l'Europe.

1. PRODUITS ENERGETIQUES.

1.1. Pétrole brut.

Les produits pétroliers étaient les premiers utilisateurs des conduites. En effet, c'est le pétrole brut qui a donné naissance à ce moyen de transport il y a plus de 100 ans avec la construction en Pennsylvanie d'une canalisation de 8 km. Depuis cette date le réseau mondial s'est développé à une cadence rapide, favorisé d'une part par un fort accroissement de la demande et d'autre part par les grandes distances séparant les centres de production et de consommation.

Les unités utilisées dans le domaine des canalisations, étant le plus souvent anglo-saxonnes, nous dressons au préalable un tableau de correspondance des unités anglo-saxonnes rencontrées ici, en unités françaises.

Nature	Dénomination	Valeur en unités françaises
Longueur	Pouce (")	25,4 mm
Surface	Pouce carré	6,45 cm ²
Volume	Pied cubique (cu.ft)	0,0264 m ³
Capacité	Baril	158,98 l
Pression	Livre/pouce carré	6,894 pz

1.1.1. Situation aux U.S.A.

a) Economie du pétrole brut aux U.S.A.

Il existe aujourd'hui aux U.S.A. plus de 120.000 km de réseaux principaux à pétrole brut et quelques 130.000 km de réseaux de dessertes et collectes. Ces canalisations transportent le pétrole brut à un prix de revient sensiblement plus bas que ceux des autres moyens de transport terrestres. De ce fait, les réseaux se sont développés à une cadence rapide et forment aujourd'hui une immense toile d'araignée au maillage très complexe ; pour cette raison nous schématiserons seulement les grands courants de ce transport.

Les principaux gisements de pétrole brut aux U.S.A. sont répartis entre le Texas, l'Oklahoma, Le Kansas et la Louisiane ; c'est-à-dire la région du "mid-continent". A cause de la faible valeur spécifique du pétrole brut, les premières raffineries ont été implantées à proximité de ces champs de production, les produits raffinés, supportant plus facilement les frais de transports, étant distribués vers les centres de consommation par rail et route. Après 1930 deux facteurs ont eu une tendance à modifier cette situation :

- le fort accroissement de la demande des produits pétroliers, concentrée pour la plupart dans le nord-est, et
- le progrès technique dans le transport par conduite qui permettait pour la première fois l'acheminement du pétrole brut sur les longues distances à un prix de revient plus bas que celui du rail.

Ces deux facteurs ont donc stimulé la construction de nouvelles raffineries de grande capacité dans la région des Grands Lacs, alimentées par canalisation en masses considérables de pétrole brut du mid-continent. C'est ainsi que les sociétés pétrolières ont réalisé des économies d'échelle par suite de l'augmentation de la taille des unités de production et de la réduction des distances de distribution des produits raffinés.

L'alimentation actuelle des raffineries américaines en pétrole brut, des champs de production du mid-continental se compose donc de trois types de transport caractéristiques :

- transport à courte distance : c'est le cas des anciennes raffineries implantées sur les gisements; ce trafic est effectué entièrement par un réseau de canalisation de collecte.
- transport à moyenne et longue distance : en direction de la région des Grands Lacs et la Californie ; ce trafic est effectué pour la presque totalité par un réseau de conduites très dense, une faible partie étant amenée par les voies navigables.
- transport de cabotage; en direction des raffineries de New-York et de la côte est ; ce trafic est généralement assuré par pétroliers.

b) Principaux ouvrages américains.

Parmi le réseau très dense et complexe de canalisation de pétrole brut aux U.S.A., il convient de citer, à titre d'exemple, l'ouvrage le plus récent :

- Capline : Une canalisation de 1.000 km, reliant les gisements de la Louisiane à l'état d'Illinois. Cet ouvrage, d'un diamètre de 40 pouces, a été construit en commun en 1967-1968 par plusieurs sociétés pétrolières afin d'assurer une capacité initiale de 500.000 barils par jour.

1.1.2. Situation en Europe.

a) Economie du pétrole brut en Europe.

L'Europe consomme actuellement plus de 400 Mt/an de pétrole contre 600 Mt/an en Amérique du Nord. Dans très peu de temps l'Europe aura dépassé le cap de 500 Mt/an. Or, la production locale en

Europe n'excédant pas 20 Mt/an, le pétrole est importé en presque totalité, nécessitant le développement d'une infrastructure de transports et de distribution considérable. A une échelle bien différente des Etats-Unis, donc, et malgré une pénétration maritime et fluviale très profonde, l'Europe vient à son tour de prendre le départ pour construire un réseau important de canalisations, lié à un fort développement de la consommation.

Jusqu'à une date relativement récente, les raffineries européennes étaient presque toujours situées sur les côtes ou plus exactement dans les ports favorables pour la réception des pétroliers. Trois facteurs ont eu une tendance à modifier ce phénomène :

- l'augmentation de la taille des navires
- les tarifs élevés pour le transport final des produits raffinés par des moyens de transport traditionnels, et
- le niveau croissant de la consommation du pétrole, située pour la plus grande part au centre du continent.

Depuis 1960, la course au tonnage des pétroliers a été spectaculaire. En effet, le tonnage moyen d'un pétrolier en commande est passé de 40.000 tonnes d.w. en 1960 à 110.000 tonnes d.w. en 1966. De ce fait, le nombre de ports européens favorables à la réception des gros navires pétroliers est en forte diminution. De plus, la situation des ports ne permet généralement pas la construction de nouvelles raffineries au voisinage des postes de déchargement des gros pétroliers. Des stockages et des réservoirs importants doivent donc être prévus entre le navire et la raffinerie. Or, les coûts des manipulations terminales et des passages dans les réservoirs sont importants et relativement rigides de sorte que le coût de transport entre le pétrolier et les raffineries augmente avec la distance moins vite que le prix de la liaison par conduite.

Par contre, du fait de la quantité croissante des produits raffinés à transporter vers les centres de consommation, le prix de ce transport diminue plus vite lorsque les raffineries se rapprochent du marché.

Ces phénomènes donc se traduisent depuis une dizaine d'années par la construction de raffineries à l'intérieur du continent, alimentées en pétrole brut par des canalisations de grand diamètre. De ce fait, le réseau européen de conduites à pétrole brut a connu récemment une expansion spectaculaire. En effet, il existe actuellement entre 3.000 et 4.000 km de canalisations de 20 à 40 pouces, reliant les principaux ports aux raffineries.

b) Principaux ouvrages européens.

Le réseau européen de canalisations à pétrole brut comporte notamment :

- le NWO, entre Willemshaven et Cologne, d'une longueur de 390 km et d'un diamètre de 28 pouces, mis en service en 1959 avec une capacité de 18 Mt/an; il dessert actuellement sept raffineries dans la région de Cologne et sa capacité a été portée à 25 Mt/an par suite d'une augmentation du nombre de stations de pompage.
- le RRP, entre Rotterdam et la Ruhr, d'une longueur de 300 km et d'une capacité de 18 Mt/an ; cette canalisation de 24 pouces a été récemment prolongée sur Francfort et elle dessert actuellement deux raffineries en Hollande et cinq raffineries en Allemagne.
- le SPLSE (pipeline Sud Européen), d'une longueur de 750 km et d'un diamètre de 34 pouces entre Marseille et Karlsruhe, prolongée par des antennes importantes en France, en Allemagne et en Suisse; mis en service en 1963 avec une capacité initiale de 25 Mt/an, le SPLSE a été porté ensuite à une capacité de 34 Mt/an et dessert actuellement quatre raffineries en France, une en Suisse et sept en Allemagne.
- le TAL (pipeline Transalpin) d'une longueur de 450 km et d'un diamètre de 40 pouces qui a été mis en service en 1968 entre Trieste et Ingolstadt avec une capacité initiale de 25 Mt/an ; le TAL dessert actuellement quatre raffineries en Allemagne et sa capacité est susceptible d'être portée à 50 Mt/an.

1.2. Produits raffinés.

La construction des raffineries à l'intérieur des continents, alimentées par des réseaux à pétrole brut à grand débit ayant leur origine, soit dans un nombre de ports bien équipés, soit sur les gisements, n'a pas empêché, le développement parallèle de canalisations pour les produits finis. Par contre cette expansion s'effectue à une échelle beaucoup plus modeste que celle du réseau à pétrole brut, du fait que le marché des produits finis est plus complexe et dispersé. C'est ainsi que ce trafic requiert tous les modes de transport.

1.2.1. Economie des produits raffinés.

Jusqu'aux années 1930 aux U.S.A. et aux années 1950 en Europe, la distribution des produits raffinés vers les centres de consommation était effectuée pour la presque totalité par les moyens de transport traditionnels ; c'est-à-dire le rail, la voie navigable et la route. Or, en raison de l'accroissement de la demande, surtout depuis la guerre, cette situation a eu une tendance à se modifier car le coût de transport par pipeline décroît d'environ 30 % chaque fois qu'on double le volume à transporter. L'augmentation de la consommation des produits raffinés, accompagnée d'une tendance à la concentration des populations, a donc permis le développement d'un réseau important de canalisations à produits raffinés. Ces canalisations collectent généralement les produits dans plusieurs raffineries et les livrent à un certain nombre de dépôts situés près ou même dans les centres de consommation. Toute la gamme de produits raffinés, sauf les fuels visqueux, s'y succèdent en séquence, suivant un ordonnancement complexe afin de minimiser les pertes par déclassement des mélanges.

1.2.2. Le réseau américain.

Aux U.S.A. le réseau de canalisation à produits raffinés s'étend actuellement sur plus de 100.000 km et environ 70 % des produits empruntent ce moyen de transport. Les premières réalisations ont accompagné la construction avant la guerre de raffineries dans les grands centres de consommation du nord-est. En effet,

ces raffineries, alimentées en pétrole brut du mid-continent par des pipelines à gros débit, ont facilement capturé le marché des anciennes installations de l'Oklahoma, du Kansas et du Texas. Afin de survivre les compagnies pétrolières du Mid-continent se trouvaient devant une alternative :

- soit d'implanter de nouvelles raffineries dans le nord-est,
- soit d'utiliser leurs installations existantes et de construire un pipeline à produits raffinés vers les grands centres de population.

C'est ainsi que le premier ouvrage fut réalisé ; en effet, six compagnies pétrolières du Mid-continent se sont réunies pour construire en commun une canalisation d'une longueur de 2.000 km, transportant essentiellement de l'essence vers plusieurs installations terminales situées dans la région de Chicago et les Grands Lacs et sur la longueur de l'ouvrage à intervalles d'environ 150-200 km. De ces terminaux, la distribution à courte distance vers les consommateurs fut effectuée par route et par rail. Aujourd'hui ce même réseau, le Great Laker Pipeline System, transporte plus de 20 Mt/an de produits raffinés, comprenant en outre l'essence, les fuels, le kerosene et le fuel d'aviation.

Dans le réseau très dense des U.S.A. il convient de citer également deux ouvrages qui transportent toute la gamme des produits finis :

- Plantation Pipeline : L'un des plus importants réseaux à produits raffinés et également l'un des plus modernes et complexes. La longueur de cet ouvrage atteint 5.200 km dont 1.000 km d'antennes latérales, le diamètre variant entre 8 et 18 pouces. Il transporte actuellement plus de 15 Mt/an de produits raffinés des raffineries de la région de Bâton Rouge (Louisiane) en direction des grands centres industriels de l'est et du nord-est, son parcours aboutissant à Washington.

Le tracé du Plantation Pipeline se tient sensiblement à mi-chemin entre le Mississippi et la côte atlantique, de sorte qu'il entre en concurrence avec la distribution des produits par la voie navigable et par les pétroliers côtiers.

- Colonial Pipeline : Le Plantation Pipeline est maintenant en concurrence avec la plus puissante des canalisations à produits raffinés du monde, le Colonial Pipeline System, qui fut construit en 1964 sur un tracé parallèle à l'autre ouvrage sur la majeure partie du parcours. Ce géant, dont l'antenne principale télescopique varie, suivant le débit, de 30 à 36 pouces, est capable de transporter 40 Mt/an de produits raffinés. Le réseau du colonial s'étend actuellement sur une longueur de 4.000 km, dont 1.700 km d'antennes, et relie les raffineries du sud du Texas aux régions industrielles du nord-est, son point d'aboutissement étant aux portes de New-York.

1.2.2. Le réseau européen.

En Europe on trouve également le développement parallèle de canalisations de pétrole brut et de produits raffinés. Le premier ouvrage européen transportant les produits raffinés était le pipeline Le Havre-Paris (TRAPIL), desservant la région parisienne à partir des raffineries de la Basse-Seine. Mis en service en 1953 avec un diamètre de 10 pouces et une capacité de 1,5 Mt/an, l'ouvrage initial fut ensuite renforcé en raison du développement des consommations de la région parisienne. La canalisation fut doublée en 1961 par un pipeline de 12 pouces portant le débit à 2,5 Mt/an, mais cette capacité s'est avérée rapidement insuffisante et le réseau fut triplé entre 1964 et 1967 par une canalisation de 20 pouces portant la capacité à environ 10 Mt/an.

A part TRAPIL, l'ouvrage européen le plus important actuellement est la canalisation alimentant en produits raffinés la région de Ludwigshafen et Francfort à partir de la raffinerie Shell à Cologne. Cette canalisation d'une longueur de 300 km et d'un diamètre de 20 pouces double la voie d'eau du Rhin et assure une capacité de 15 Mt/an.

Il convient de citer également trois ouvrages en cours de réalisation :

- le S.P.M.R. : une canalisation de 18 pouces et d'une longueur de 300 km, doublant le Rhône et le Sud-Européen, qui reliera les raffineries de l'Etang de Berre à plusieurs installations

terminales dans la région de Lyon. Le point d'aboutissement de l'antenne principale sera à Serpaise-St-Symphorien d'où une antenne de 12 pouces menera le long de l'Isère vers Grenoble et Genève. Dans la première phase d'exploitation, on prévoit une capacité de 5 Mt/an qui sera portée finalement à 10 Mt/an.

- le S.P.S.L. : une canalisation à produits finis de 12 pouces et d'une longueur de 250 km qui reliera les raffineries de Strasbourg à la région de Nancy. La capacité maximale de cet ouvrage sera de l'ordre de 2 Mt/an.

- United Kingdom Oil Pipelines : un ouvrage de 20 pouces réalisé en commun par plusieurs sociétés pétrolières afin de distribuer les produits raffinés des raffineries de la Tamise vers l'intérieur de la Grande-Bretagne. La canalisation atteindra une longueur de 450 km et desservira trois installations terminales près de Londres et huit autres dans les régions industrialisées du centre et du nord-ouest, où les transports traditionnels commencent à devenir trop onéreux.

2. PRODUITS CHIMIQUES.

Les industries chimiques utilisent depuis longtemps les canalisations pour l'acheminement des produits liquides ou gazeux entre unités de production. Ces canalisations concernent essentiellement les tuyauteries internes qui font partie intégrale de l'usine. Les canalisations auxquelles nous nous intéressons ici sont d'un autre genre : elles servent essentiellement à alimenter l'usine en matières premières et de ce fait elles se substituent partiellement ou totalement aux moyens de transport traditionnels.

Le transport à grande distance des produits chimiques par canalisation date de la dernière guerre. En effet, depuis cette date on assiste à une croissance en volume de l'ordre de dix fois les quantités de produits utilisés dans l'industrie chimique. De ce fait, il y a un besoin pour l'acheminement en vrac des produits chimiques que le transport par canalisation peut satisfaire.

2.1. Gaz industriels.

2.1.1. Oxygène et azote.

L'oxygène et l'azote constituent actuellement les gaz industriels les plus transportés par canalisation. L'oxygène est surtout utilisé en grandes quantités dans les industries sidérurgiques et pétrolières tandis que l'azote trouve des applications dans la fabrication des engrais. Du fait que le débit d'oxygène peut atteindre de l'ordre de 1.600 tonnes par jour, les fournisseurs cherchent à implanter leurs installations près de leurs utilisateurs de base afin de réduire les coûts de transport. Or, en raison de la tendance à concentrer des unités de production, il s'avère de plus en plus nécessaire de distribuer l'excédent d'oxygène à d'autres utilisateurs d'un même complexe, cet acheminement étant effectué, soit par camion-citerne, soit par canalisation.

Le transport d'oxygène par canalisation a surtout été développé en France par la société Air Liquide. En effet, cet organisme exploite actuellement deux réseaux importants transportant l'oxygène et l'azote, l'un dans l'Est, l'autre dans le Nord :

- le réseau du Nord comporte une canalisation de 8 pouces qui relie deux unités de production, capables respectivement de 700 t/jour à Dunkerque et 200 t/jour à Denain, distantes de 125 km et desservant de nombreux utilisateurs aux extrémités et le long du parcours par des antennes latérales. La capacité de ce réseau dépasse actuellement 150.000 tonnes d'oxygène par an. Il a été complété en 1964 par une conduite de 50 km et d'un diamètre de 3 pouces transportant de l'azote entre Denain et Boussois.
- le réseau de l'Est transporte exclusivement de l'oxygène et alimente plusieurs installations sidérurgiques de la Lorraine et du Luxembourg. Construit à partir de 1958 depuis l'unité de production de l'Air Liquide à Thionville, le réseau atteint une longueur de 250 km avec une antenne principale d'un diamètre de 12 pouces. Le réseau comporte plusieurs antennes latérales

et s'est développé au Sud vers Neuves-Maisons et au Nord jusqu'à Luxembourg. Il bénéficie également, par une liaison de 45 km, de la production excédentaire d'oxygène de l'usine d'ammoniac à Carling.

Signalons également l'existence de réseaux comparables en Belgique et en Allemagne avec lesquels les canalisations du Nord et de l'Est de la France ont une tendance vers une inter-connection. En effet, on construit actuellement la plus grande usine d'oxygène européenne près de Fenne en Allemagne; cette installation produira plus de 1.000 tonnes d'oxygène par jour et alimentera à la fois le réseau allemand de la Sarre et le réseau français de l'Est dont l'inter-connection est prévue près de Karlingen à la frontière franco-allemande. C'est ainsi que les aciéries de la Lorraine, de la Sarre et du Luxembourg bénéficieront d'une centrale de haute capacité à partir de laquelle l'alimentation en oxygène se fera par un réseau de canalisation d'une longueur de 400 km.

2.1.2. Autres gaz industriels.

Il existe aux U.S.A. des canalisations transportant d'autres gaz industriels, plus particulièrement l'hélium et l'hydrogène.

L'helium est utilisé surtout dans l'industrie aéronautique et spatiale et forme un constituant du gaz naturel trouvé dans l'Ouest des U.S.A. Un réseau de canalisation, d'une longueur de 700 km, a été construit en 1962 pour relier plusieurs fournisseurs privés dans le Texas, l'Oklahoma et le Kansas à un stockage souterrain à Amarillo, Texas. Ce réseau se caractérise par une antenne principale de 9 pouces, mais surtout par l'absence de stations de pompage; en effet, le gaz est livré dans l'ouvrage par les fournisseurs à une pression qui assure l'acheminement vers le stockage sans recompression.

L'hydrogène est utilisé en presque totalité par les raffineries pour la production de l'essence et des fuels d'aviation. Jusqu'à présent ce gaz fut fabriqué sur place par les utilisateurs mais l'augmentation de la taille des raffineries nécessite de plus en plus des sources continues d'hydrogène de l'extérieur. C'est

ainsi que les sociétés Elgas (Houston) et Air Products and Chemicals (Allentown, Pa) construisent un réseau d'une centaine de kilomètres reliant plusieurs raffineries et usines chimiques du sud-est du Texas à une unité de production d'hydrogène d'une capacité de 100 M cu.ft/jour.

2.2. Produits intermédiaires.

Le développement du transport à grande distance de produits intéressant la pétrochimie est plus récent que celui des gaz industriels. Implantées le plus souvent au voisinage des raffineries, les usines pétrochimiques reçoivent leurs matières premières par des canalisations qui n'ont été initialement que de simples extensions des tuyauteries internes des raffineries. Néanmoins, l'augmentation de la taille des unités de production de la pétrochimie fait que souvent une seule raffinerie ne peut plus satisfaire la demande en matières premières. C'est ainsi que les sociétés chimiques recourent de plus en plus à des accords entre plusieurs raffineries d'un même complexe. De ce fait, on assiste actuellement à une extension importante des canalisations transportant les produits intermédiaires chimiques à courte et moyenne distance.

2.2.1. Ethylène.

L'éthylène est, sans doute, le produit ayant donné naissance aux réalisations les plus importantes du fait que cette matière première est difficile à transporter par les moyens de transport traditionnels; en effet, ceux-ci nécessitent des installations coûteuses comprenant, soit une liquéfaction sous pression, soit une liquéfaction par abaissement de température, soit les deux tandis que l'éthylène est facilement transporté par conduite, soit à l'état gazeux, soit à l'état condensé.

En Europe, il existe plusieurs ouvrages et projets importants de transport d'éthylène en cours de réalisation. Parmi ces canalisations, il convient de citer :

- l'ensemble du transport d'éthylène du Lyonnais (ETEL), conçu pour transporter l'éthylène produit à la raffinerie U.G.P. de Feysin à cinq usines de transformation, une sur place, deux

dans la région de Grenoble à plus de 100 km, une dans la région de Dôle à 150 km et une située sur le tracé entre Feysin et Dôle, près de Bourg à environ 35 km de Feysin. La canalisation d'ETEL, comporte un diamètre de 6 à 8 pouces, une longueur totale de 280 km et une capacité maximale de 500.000 tonnes/an.

- En Allemagne, il existe un réseau d'environ 130 km et d'un diamètre variant entre 4 et 6 pouces qui dessert, à partir de la raffinerie de Cologne, plusieurs usines utilisatrices dans la région industrielle de la Ruhr. La capacité initiale de l'ensemble en 1958 était de 100.000 t/an et elle a été portée ensuite à 150.000 t/an. On signale, d'ailleurs, des projets pour l'expansion de ce système par la construction d'une canalisation d'une longueur de 300 km et d'un diamètre de 10 pouces qui reliera premièrement l'usine Hoechst près de Francfort et ensuite l'usine Badische Anilin und Sodafabrik A.G. à Ludwigshafen-am-Rhein. Cette extension aura une capacité de 280.000 t/an.

Parmi d'autres projets du transport d'éthylène en Europe, il convient de citer :

- une canalisation de 100 km entre les usines de production du complexe de Berre et l'usine de Pechiney à St-Auban sur la Durance avec une capacité initiale de l'ordre de 100.000 t/an.
- une canalisation de 200 km ayant son origine dans le complexe carbo-chimique de Carling, qui desservira plusieurs usines de transformation dont la plus lointaine se trouvera en Alsace à Neuf-Brisach.

2.2.2. Autres produits intermédiaires.

D'autres produits intermédiaires de la chimie organique sont actuellement transportés par canalisation mais en quantités moins importantes. En Europe, le transport de produits, tels que le butadiène et le propylène se fait le plus souvent par des canalisations conçues principalement pour l'éthylène. C'est ainsi que la Société SOCABU à Port-Jerôme est alimentée en butadiène et en éthylène

à partir de la raffinerie CFR à Gonfreville par une canalisation d'une longueur de 25 km. On peut noter aussi que le réseau d'ETEC dans la région de Lyon transporte également du propylène vers les cinq usines de transformation de SOLVAY et de PROGIL.

Enfin, il convient de noter qu'aux U.S.A. d'autres produits chimiques de base, tels que les hydrocarbures aromatiques (éthyl-benzène et cyclohexane) sont souvent transportés en "batch" par les réseaux à produits raffinés de pétrole. Ce type de transport est accompagné d'une procédure d'ordonnancement très complexe afin de minimiser les pertes de mélanges et de maintenir la qualité du produit.

Tableau récapitulatif des principaux réseaux de canalisation, existants
ou en construction aux U.S.A. et en Europe.

Nature des produits	Type de produits	Pays	Dénomination	Année de mise en service	Longueur	Diamètre	Débit
Pr. Energétiques	Pétrole brut	U.S.A.	Capline (Louisiane-Illinois)	1967-1968	1.000 km	40"	500.000 Barils/jour
		Allemagne	N.W.O. (Willemshaven-Cologne)	1959	390 km	28"	25 Mt/an
		Hollande Allemagne	R. R. P. (Rotterdam-Rhin)		300 km	24"	18 Mt/an
		France Allemagne	SPLSE (Marseille-Karlsruhe)	1963	750 km	34"	34 Mt/an
		Italie Allemagne	TAL (Trieste-Ingolstadt)	1968	450 km	40"	25 Mt/an (portée à 50 Mt/an)
Produits raffinés		U.S.A.	Great Laker Pipeline System (Chicago-Grands Lacs)		2.000 km		20 Mt/an
			Plantation Pipeline		5.200 km	8" à 18"	15 Mt/an
			Colonial Pipeline	1964	4.000 km	30" à 36"	40 Mt/an
		France	TRAPIL (Le Havre - Paris)	1953 doublé en 1961 triplé en 1964		10" 12" 20"	1,5 Mt/an 2,5 Mt/an 10 Mt/an
		Allemagne	Cologne-Ludwigshafen Franckfort		300 km	20"	15 Mt/an
		France	S.P.M.R.(construction) (Berre - Lyon)		300 km	18"	5 Mt/an 10 Mt/an
		France	S.P.S.L.(construction) (Strasbourg-Nancy)		250 km	12"	2 Mt/an
		Grande-Bretagne	United Kingdom Oil Pipelines(construction)		450 km	20"	

Tableau récapitulatif des principaux réseaux de canalisation, existants
ou en construction aux U.S.A. et en Europe (suite).

Nature des produits	Type de produits	Pays	Dénomination	Année de mise en service	Longueur	Diamètre	Débit
Produits chimiques	Gaz industriels	France	Réseau du Nord (Dunkerque-Denain) (oxygène-azote)		125 km	8"	150.000T/an
			Réseau de l'Est (oxygène)	1958	250 km	12"	
		Allemagne	Sarre-France Est (oxygène)	en construction	400 km		1.000T/jour
		U.S.A.	Ouest des U.S.A. (Hélium)	1962	700 km	9"	
		U.S.A.	Sud-Est Texas (Hydrogène)	en construction	100 km		100Mcuf./jour
Produits intermédiaires		France	ETEL - Lyon (Ethylène)	en construction	280 km	6" à 8"	500.000T/an
		Allemagne	Cologne-Ruhr (Ethylène)	1958	130 km	4" à 6"	100.000T/an passé à 150.000T/an
		Allemagne	Cologne-Franckfort Ludwigshafen (Ethylène)	Projet	300 km	10"	280.000T/an
		France	Berre-St Auban (Ethylène)	Projet	100 km		100.000T/an

CHAPITRE 2 - PROGRES TECHNIQUE

Dans le cadre d'une étude portant sur une longue période, il importe de mesurer les facteurs qui modifient l'échelle de la production. En raisonnant en terme de rendement d'échelle croissants, et c'est à juste titre celui qui nous intéresse, on peut distinguer deux types d'économie qui expriment une augmentation d'échelle.

- une économie interne liée à la dimension de la firme, à sa structure, à l'accroissement de sa capacité, et de ses différents paramètres techniques.
- une économie externe, liée d'une part au progrès technologique, lui permettant d'abaisser ses coûts de transport, et d'autre part à une meilleure organisation d'ensemble de l'entreprise, autorisant une diminution des coûts de conception et de réalisation des différents projets de canalisation.

Si le premier aspect est plus d'ordre global et structurel, le second marque la tendance et les grands traits du progrès technique dans un secteur donné.

A cet effet, il se caractérise en deux points :

- une amélioration continue des techniques actuelles
- des recherches dans les techniques nouvelles.

On constate aussi qu'une diminution des coûts de transport par canalisation peut être liée à deux facteurs différents :

- augmentation des diamètres des tubes : c'est l'effet de dimension
- progrès réalisés dans les techniques complémentaires : usage des pompes, pose des tubes, etc ...

Dans ce chapitre nous envisageons l'évolution récente, ainsi que les tendances de ces deux aspects :

- les tubes : dimensions et matériaux
- les techniques complémentaires.

Nous examinerons ensuite la recherche dans les techniques nouvelles, Nous traiterons l'influence de l'organisation et de la spécialisation dans le chapitre sur l'évolution des coûts.

1. TUBES, DIMENSIONS, MATERIAUX.

Nous savons que la fonction de production résume sous une forme mathématique, les informations technologiques concernant l'entreprise. Elle exprime la relation existant entre les quantités de facteurs utilisés et les quantités de facteurs produits. Les différents paramètres techniques qui interviennent ici, et que nous allons développer, sont le diamètre des tubes, l'épaisseur et la nature des matériaux, ainsi que la procédure de fabrication.

D'autre part l'objectif fondamental, qui se traduit dans la fonction des coûts, est la minimation des coûts totaux. Il s'exprime ici, en terme de coût de transport le plus faible possible.

La partie la plus importante des investissements d'un réseau de canalisation est liée à la canalisation elle-même; c'est-à-dire de l'ordre de 40 à 60 % des investissements totaux. Il est donc évident que l'on cherche surtout à améliorer cet élément fondamental. En effet, les recherches assurant une meilleure utilisation de l'acier se traduisent par des économies considérables dans les coûts de transport par conduite. On constate que ce progrès technique porte principalement sur deux phénomènes :

- l'augmentation des diamètres des tubes
- la diminution de l'épaisseur des tubes.

1.1. Le diamètre des tubes.

L'importance du diamètre est reliée à deux facteurs principaux :

- les investissements
- le coût d'exploitation.

Nous allons d'abord considérer l'incidence du diamètre sur ces deux facteurs.

Les coûts d'investissements sont sensiblement proportionnels au diamètre de la conduite.

$$I_n = K.D.$$

Par exemple, une conduite de 12 pouces demande un investissement de 20 % plus élevé que celui d'une conduite de 10 pouces.

D'autre part, le débit d'une canalisation est une fonction croissant avec le carré du diamètre soit :

$$Q = K.D^2$$

C'est ainsi que les coûts d'investissements augmentent moins rapidement que la capacité :

$$\frac{I_n}{Q} = \frac{K}{K} \cdot \frac{D}{D^2}$$

soit : $\frac{I_n}{Q} = K \cdot \frac{1}{D}$

A titre d'exemple, on peut citer les coûts d'investissement d'une canalisation à pétrole brut. Un tel ouvrage, avec un diamètre de 20 pouces et une capacité de 4 millions de tonnes par an, coûte environ 300.000 F/Km. tandis qu'une canalisation de 24 pouces avec une capacité des 8 millions de tonnes/an coûtera environ 450.000 F/km. La capacité est ainsi doublée avec seulement une augmentation de l'investissement de 50 %.

Par contre, on peut noter que les coûts d'exploitation d'une canalisation, dans sa zone normale d'utilisation varient en raison inverse du diamètre. En effet, si l'on fait l'analyse des différents postes inclus dans les frais d'exploitation, on constate que tous ces postes, sauf un, sont pratiquement indépendants du diamètre : les frais de personnel, d'entretien, de loyer, d'assurance, frais généraux etc ..., sont sensiblement égaux pour un débit annuel donné, et pour un diamètre de tube compatible avec ce débit.

Il y a donc un poste qui caractérise la variation dans les frais d'exploitation : l'énergie. En effet, l'énergie absorbée pour un même débit varie comme l'inverse de la puissance cinquième du diamètre, soit :

$$E \simeq K. \frac{1}{D^5}$$

C'est ainsi qu'une variation relativement faible du diamètre peut avoir une influence importante sur l'énergie consommée.

Ainsi quand il s'agit de choisir un diamètre pour une quantité donnée, deux influences plus ou moins contradictoires se manifestent :

- une augmentation du diamètre pour réduire les dépenses d'énergie ($E \simeq K. \frac{1}{D^5}$)
- ce qui entraîne à la suite, une augmentation des investissements rapportés à la tonne transportée, ceux-ci sont néanmoins inversement proportionnels au diamètre. ($\frac{I_n}{Q} = K. \frac{1}{D}$)

Il y a donc, pour un débit donné un diamètre optimal qui traduit l'équilibre à rechercher entre ces deux facteurs. Il en résulte que l'on a très sensiblement une variation du prix de revient inverse de celle du diamètre, soit :

$$Pr \approx K. \frac{1}{D}$$

La conséquence de cette constatation donne une tendance tout à fait normale à se trouver vers les diamètres élevés. En effet, pendant les années 1930, le diamètre moyen des ouvrages n'était que de l'ordre de 8 pouces, avec un maximum de 12 pouces. Or, pendant ces vingt dernières années, on assiste à une augmentation considérable des dimensions des tubes - de 20 à 24 pouces pendant la guerre aux canalisations de 36 à 40 pouces que l'on réalise actuellement.

On constate que cette évolution des diamètres a été très régulière dans le passé et qu'elle a eu une tendance à suivre l'évolution des débits maxima. En prolongeant donc les tendances que l'on observe depuis 1930 vers l'horizon de notre étude, on peut ainsi prévoir des diamètres maxima en 1985 de l'ordre de 55 pouces (graphique 4).

Cette évolution dépend néanmoins de certains seuils technologiques relatifs à la fabrication des tubes de gros diamètres ; ces aspects seront donc examinés par la suite.

1.2. L'épaisseur des tubes.

Les recherches effectuées sur les matériaux des tubes ont permis une amélioration continue de la nuance des aciers. En 1959, la limite supérieure de nuance était de X-63, c'est-à-dire pouvant supporter une pression de 63.000 livres/pouce carré. Par contre, des essais sont maintenant en cours pour mettre au point des techniques de fabrication et de pose de tubes en acier de nuance X-100.

Cette évolution des aciers a permis une réduction des épaisseurs des tubes, fabriqués par soudure longitudinale, notamment pour les grands diamètres qui ont des pressions de service relativement faibles.

Cette tendance vers une diminution des épaisseurs entraîne par la suite une réduction du poids unitaire des tubes et une diminution relative des investissements.

Les épaisseurs actuelles des tubes se situent entre 6 et 14 mm, l'épaisseur minimum étant limitée par la fragilité relative des tubes. De ce fait, il semble qu'actuellement on atteigne un seuil technologique relatif au diamètre maximum des canalisations; en effet, en raison des difficultés de manutention et de pose, les tubes de très grand diamètre (au-dessus de 45 pouces) ne supporteront pas d'épaisseurs très faibles.

1.3. Procédure de fabrication.

La plupart des tubes utilisés actuellement sont fabriqués à partir des tôles par soudure longitudinale. On constate que cette procédure de fabrication tend à limiter les dimensions des tubes en raison de la taille des tôles que l'on peut rouler actuellement. A moins que l'on puisse faire des doubles soudures longitudinales, il semble en fait que cette méthode limitera les tubes à des diamètres de l'ordre de 45 pouces.

Il existe néanmoins deux autres méthodes de fabrication :

- laminage pour la fabrication de tubes sans soudure
- soudure spirale

Les techniques de fabrication de tubes sans soudure sont actuellement limitées à des diamètres de 24 pouces. On peut noter en plus que les coûts de fabrication sont élevés par rapport aux tubes soudés et que la qualité est souvent très variable en épaisseur. Les tubes fabriqués par cette méthode ne sont en général utilisés que pour les liaisons sous l'eau où on doit minimiser la probabilité de fuite.

On fabrique actuellement une part croissante de tubes par soudure spirale dont les techniques ont été progressivement mises au point pendant les 20 dernières années.

En effet, avec les techniques actuelles, on réussit à fabriquer des tubes de caractéristiques tout-à-fait comparables aux tubes soudés. Les principaux avantages de cette méthode portent sur :

- investissements d'unité de production de l'ordre de la moitié des tubes classiques.
- des coûts de main-d'oeuvre également de l'ordre de la moitié pour la même production de tubes classiques.

Pour les tubes fabriqués par soudure spirale, les spécifications de l'A.P.I. limitent actuellement les diamètres à 42 pouces mais cette limite sera bientôt portée à 48 pouces. On peut envisager néanmoins la production par cette méthode de tubes de 50 pouces et au-delà.

Il semble donc qu'en raison de ces avantages, cette méthode soit appelée à remplacer progressivement les tubes fabriqués par soudure longitudinale. A long terme, on peut envisager que cette méthode pourra réduire les coûts des tubes de l'ordre de 5 à 10 % avec des possibilités de fabrication des tubes de diamètres au-dessus de 50 pouces.

1.4. Autres matériaux.

A ce stade, il convient de noter qu'actuellement, des recherches sont en cours concernant l'utilisation d'autres matériaux de tube, notamment des alliages d'aluminium et les plastiques.

En ce qui concerne l'aluminium, il semble que ce métal n'apportera pas de grandes économies dans le domaine des tubes. Ceci tient essentiellement à deux facteurs :

- des coûts de matériaux de l'ordre de 5 à 6 % plus élevés que ceux des aciers utilisés actuellement
- des coûts de manutention et de pose qui sont estimés à 16 % supérieurs à ceux des aciers en raison de la fragilité relative des tubes.

Les plastiques trouvent actuellement des applications très diverses, notamment dans le domaine des tuyauteries spéciales, telles que les dessertes urbaines en eau ou en gaz. On y trouve plusieurs avantages :

- la légèreté
- la facilité d'installation
- la résistance contre la corrosion
- faible coefficient de frottement.

Par contre on constate néanmoins des limitations suivantes :

- une nuance sensiblement inférieure à l'acier et qui est très variable selon la température et le temps
- coefficient d'expansion élevé
- coûts élevés du matériel (de 1 à 2 fois supérieurs à l'acier selon le type de plastique)
- diamètres limités à l'ordre de 16 pouces.

C'est surtout pour les coûts d'installation qu'on trouve des économies dans l'utilisation des plastiques. En effet, ceux-ci sont de l'ordre d'un tiers des coûts d'installation d'un tube en acier de mêmes dimensions. Il apparaît néanmoins que les coûts totaux sont souvent très proches des coûts d'une installation conventionnelle et le choix du plastique revient finalement à une considération de la nature du produit à transporter ; c'est ainsi que les conduites en plastiques sont utilisées presque exclusivement pour des produits corrosifs ou des produits alimentaires. Finalement, on peut croire que l'application des conduites en plastique sera limitée à des réseaux à pressions d'exploitation faibles ; c'est le cas en général des dessertes urbaines ou des réseaux de collectes pour le gaz naturel ou le pétrole brut.

2. TECHNIQUES COMPLEMENTAIRES.

Nous examinerons successivement :

- les pompes
- la mécanisation de la pose
- l'automatisation
- autres progrès.

2.1. Les pompes.

En dehors des tubes, une canalisation est équipée d'installations munies essentiellement de pompes et de moteurs dont la technique et la fabrication sont parfaitement au point depuis longtemps.

Le choix de la source d'énergie est dicté par des considérations d'ordre économique : elle peut être soit l'énergie électrique fournie par un réseau de distribution, soit un carburant pétrolier qui est en général celui transporté dans la ligne. Bien que les moteurs électriques soient facilement adaptés au contrôle automatique, ceux-ci ne sont en général utilisés que dans les régions bénéficiant de sources de courant à bon marché. On trouve surtout, soit des moteurs diesel ou à gaz, soit des turbines alimentées à gaz ou à pétrole brut.

Les recherches faites depuis les 10 dernières années ont apporté des économies considérables aux stations de pompage, notamment dans le domaine des turbo-compresseurs. En effet, on utilise de plus en plus des turbo-compresseurs, type centrifuge; plutôt que des pompes diesel classiques, type alternatives, les avantages de la turbine portent principalement sur :

- la souplesse d'exploitation; la vitesse peut être facilement modifiée, sans influencer le rendement de l'appareil, permettant ainsi l'écoulement optimum des liquides à poids-spécifiques différents,
- la facilité de contrôle automatique,

- les coûts d'installation rapportés à la puissance de l'ordre de 50 % inférieurs.

Il convient de noter, néanmoins, que les rendements des turbines n'atteignent guère les 2/3 ou la moitié de ceux des bons moteurs diesel, mais elles nécessitent par contre un entretien réduit. Les meilleurs rendements sont obtenus pour des puissances importantes (5 à 6.000 ch.), mais on a réussi à développer ces dernières années des turbines de puissance beaucoup plus faible (1.000 ch et même 600 ch.) avec des rendements acceptables. C'est ainsi que ce type d'installation se prête actuellement à presque toute la gamme de capacités de canalisation.

En termes économiques, le problème posé aux constructeurs de pompes est de minimiser le rapport :

$$\frac{F + V}{W}$$

F = charges fixes

V = charges variables

W = puissance installée.

On a réduit F en remplaçant les pompes classiques par des turbines. Mais en utilisant les turbines on a augmenté les charges variables, qui tiennent principalement aux dépenses de carburant.

On a cherché donc à augmenter W (puissance unitaire ou multiplication d'unités) pour réduire le rapport. Or, nous sommes actuellement à un stade où il devient difficile de pousser plus loin la puissance des stations de pompages en raison des limites de sécurité et des pressions maximales d'exploitation. Nous sommes donc au point où les techniques actuelles ont presque atteint leur optimum; sans l'apparition donc d'un nouveau type de machine, on peut croire qu'à long terme il n'y aura pas d'améliorations significatives dans le domaine des stations de pompages.

A titre indicatif, on peut noter que le prix moyen unitaire du cheval installé d'une turbine a baissé progressivement de \$ 220/cv en 1955 à \$ 200/cv en 1964. Il semble néanmoins que ce coût unitaire tende à se stabiliser actuellement en raison des facteurs techniques décrits ci-dessus. On peut croire donc que le prix du cheval installé sera effectivement du même ordre en 1985 que le prix actuel.

2.2. Mécanisation de la pose.

La pose est un élément fondamental d'un réseau de canalisation : le poste représente 40 à 60 % des coûts totaux selon le diamètre et les conditions de pose.

Les problèmes relatifs à cette opération concernent essentiellement deux aspects :

- le choix du tracé
- les techniques de soudure et de mise en place des tubes.

Nous ne considérerons pas en détail les problèmes posés par le choix du tracé. Il suffit simplement d'indiquer que les moyens importants mis en œuvre maintenant pour la pose des canalisations font éviter aux tracés les zones congestionnées, les terrains difficiles, etc ..., tout en cherchant à maintenir une ligne droite à travers la campagne. Bien que peu d'obstacles ne puissent être franchis par le matériel dont on dispose actuellement, c'est toujours une question de prix de revient de l'opération et les facteurs économiques sont déterminants dans ce domaine.

Les opérations de soudure revêtent une grande importance parce que la résistance de l'ouvrage dépend de leur qualité. D'autre part, la construction des grosses canalisations nécessite des opérations de soudure considérables sur place, faisant appel à une main-d'œuvre très spécialisée et parfois difficile à trouver. En plus, c'est la soudure qui détermine essentiellement les vitesses d'avancement d'un "circuit" - c'est-à-dire l'ensemble des machines qui assurent la totalité des opérations de pose.

On assiste depuis une vingtaine d'années à une amélioration continue des techniques de soudure. On y reconnaît deux méthodes principales:

- soudure électrique
- soudure automatique (électron-beam).

La soudure électrique est actuellement la méthode la plus rapide et la plus facile à contrôler. La soudure étant effectuée en plusieurs passes et protégée contre la contamination par des gaz inertes ou plus récemment par le CO₂. Cette méthode est néanmoins très exigeante du point de vue main-d'oeuvre et, d'autre part, elle n'offre guère de possibilités d'améliorations significatives.

C'est pourquoi, on cherche actuellement à mettre au point des nouvelles procédures de soudure, notamment, la soudure automatique par "electron-beam". Cette méthode a été déjà testée aux U.S.A. et en Europe mais on constate qu'à présent la qualité de la soudure est souvent variable et l'opération est peu rentable.

On pense néanmoins que la soudure automatique est appelée à progresser considérablement dans les années à venir. En effet, on suppose que cette méthode aboutira finalement à des économies significatives relatives aux opérations de soudure. Ces économies tiendront principalement aux facteurs suivants :

- coûts de main-d'oeuvre sensiblement réduits
- soudure en une seule passe ; vitesse d'avancement de la pose accélérée
- contrôle de qualité.

A plus long terme, il est indispensable de noter que l'on s'intéresse actuellement aux possibilités de fabrication de tubes sur place, évitant ainsi une grande partie des opérations de soudure classique. Une telle machine utilisant une procédure de soudure spirale a déjà été construite aux U.S.A. et les applications montrent que cette procédure pourrait apporter des économies considérables. Les avantages

concernent essentiellement :

- les économies dans les coûts de transport des tubes de l'usine au chantier ; ce phénomène est dû au fait que les tôles roulées occupent moins de place que les tubes, permettant ainsi des réductions dans les coûts de transport de l'ordre de \$ 40 à 60 par tonne.
- coûts de main-d'oeuvre sensiblement réduits ; l'effectif des soudeurs sera en particulier réduit puisque les opérations de soudure pour fixer bout à bout les tubes sont de l'ordre d'un dixième de celles de la pose classique.

Il semble donc qu'une machine permettant la fabrication des tubes sur le chantier est capable de résoudre un certain nombre de problèmes relatifs à la pose et à la main-d'oeuvre. Il est donc tout à fait vraisemblable que cette procédure sera bientôt mise au point et qu'elle remplacera progressivement les méthodes de pose classique. Dans cette hypothèse et compte tenu :

- des économies des coûts de transport du matériel,
- de la main-d'oeuvre réduite sur le chantier,
- des coûts de fabrication par soudure spirale qui sont inférieurs aux coûts de production actuels,

nous estimons que le montant des investissements relatifs à la canalisation et à la pose pourrait être de 10 à 20 % inférieurs en 1985.

2.3. Automatisation.

Les réseaux de canalisation ont eu une tendance à devenir de plus en plus automatisés pendant les dernières années. Le degré de contrôle automatique tend à varier selon le type de service et les compagnies mais il y a actuellement bien peu d'ouvrages réalisés sans un certain niveau d'équipements automatiques. Cet équipement intéresse surtout les réseaux complexes, tels que les canalisations à produits raffinés; aux U.S.A. on trouve 70 % des réseaux à produits raffinés équipés

d'installation de contrôle automatique par rapport à 45 % pour le réseaux à pétrole brut.

L'utilisation des ordinateurs sert surtout à augmenter la souplesse d'un réseau en assurant son fonctionnement optimum par une gestion centralisée. Par ordre d'importance, le contrôle automatique commande actuellement les postes suivants :

- les installations de pompage; contrôle de vitesse, performance, etc ...
- analyses d'informations concernant l'exploitation de la ligne
- détection d'interfaces dans les conduites à produits divers
- contrôle des débits de livraison aux installations terminales.

Il convient de noter que le but final de l'automatisation concerne la programmation automatique des débits ; c'est-à-dire un ordonnancement des produits divers selon d'une part, la demande et, d'autre part, l'optimisation du fonctionnement du réseau. Il est évident que ce développement se fera suivant des impératifs économiques donc soumis à une optimisation. Bien que les économies de cette fonction sont moins importantes qu'à d'autres postes, il semble néanmoins que les investissements nécessaires soient justifiés en raison des économies dans le domaine d'exploitation.

2.4. Autres progrès : les revêtements intérieurs.

Il convient de citer finalement d'autres améliorations progressives concernant la technique de transport par conduite mais qui ont une incidence moins importante sur l'économie du transport que les éléments que nous venons d'examiner. Ces progrès concernent essentiellement les revêtements intérieurs.

On a procédé récemment à l'étude de revêtements intérieurs dans le but d'améliorer le coefficient d'écoulement et d'éviter l'utilisation de pistons raclers. A la suite des recherches faites par les compagnies de transport et les bureaux d'engineering, on dispose actuellement

de revêtements intérieurs généralement sous forme de couches fines de matières plastiques. Bien que l'on évalue actuellement l'ensemble des effets de ce genre de revêtement, il est évident que ceux-ci ont une tendance à améliorer le coefficient d'écoulement de quelques pourcents et contribuent également à diminuer la corrosion interne.

L'acceptation et l'utilisation de ces revêtements intérieurs sont évidemment basées sur la question du prix de revient de l'opération et des facteurs économiques; en effet, les investissements nécessaires doivent être évalués en comparaison avec d'autres méthodes assurant la même augmentation de capacité.

3. TECHNIQUES NOUVELLES.

Les recherches faites pendant les dernières années ont montré que le domaine du transport par conduite peut s'étendre au-delà des produits classiques, tels que les liquides newtoniens et les gaz. En effet, le progrès technique réalisé récemment nous permet d'envisager des applications aux produits "difficiles", c'est-à-dire les liquides visqueux et les solides. Par rapport au transport par conduite classique, ces applications nouvelles se caractérisent essentiellement par des installations spéciales qui ont une tendance à modifier à la fois le concept et l'économie de ce mode de transport. On peut distinguer trois types d'applications nouvelles :

- application avec isolation thermique, soit pour maintenir une haute température (hydrocarbures visqueux), soit pour maintenir une basse température (gaz liquéfiés),
- le transport des solides en suspension tels que le charbon et les minerais,
- le transport de produits en capsules ou en forme de capsule.

3.1. Isolation thermique.

Les possibilités de ce genre d'application intéressent surtout :

- les hydrocarbures visqueux ; c'est le cas du fuel lourd et du pétrole brut visqueux (transport à haute température)
- le soufre (transport à haute température)
- le gaz naturel liquéfié (transport à basse température).

Bien que ce genre d'application intéresse à la fois les produits à haute température et les produits à basse température, les problèmes relatifs à la technique et à l'économie du transport sont néanmoins analogues. Ces problèmes concernent essentiellement deux aspects :

- l'isolation extérieure des tubes
- les stations de chauffage ou de réfrigération.

Pour un certain diamètre de tube et une certaine qualité d'isolation, il existe, en effet, un optimum économique concernant la quantité d'isolation nécessaire et le nombre de stations intermédiaires de chauffage ou de réfrigération. C'est essentiellement le coût de ces deux équipements supplémentaires de l'ouvrage qui déterminent la rentabilité d'une conduite à isolation thermique.

3.1.1. Les hydrocarbures visqueux.

Il existe actuellement une douzaine de conduites, plus ou moins expérimentales, transportant soit le fuel lourd, soit le pétrole brut visqueux; ces ouvrages sont de courte distance et ne comportent en général qu'une seule station de chauffage à l'entrée de l'ouvrage en raison des coûts élevés de ces installations. Il existe, en effet, une distance maximum au-delà de laquelle le coût de transport devient plus cher par la nécessité d'installer une station de chauffage supplémentaire. On constate que cette distance modulaire a eu une tendance à évoluer en raison

des améliorations progressives dans le domaine de l'isolation : elle est, actuellement, de l'ordre de 100 km pour le fuel lourd.

Parmi les ouvrages qui existent à présent, il convient de citer :

- une conduite italienne longue de 81,2 km, d'un seul module, reliant la raffinerie ANIC de Pavia à une centrale thermique de Turin. Cette canalisation de 10 pouces, capable de transporter 1,2 Mt/an de fuel lourd, est isolée par une couche de polyuthérane de 50 mm d'épaisseur, la température variant entre 85°C à l'entrée et 45°C à la sortie.
- l'ouvrage de la Tidewater Oil Company en Californie ; c'est une conduite de 20 pouces, longue de 280 km, qui relie les gisements de Coalinga à des raffineries de la région de San Francisco. L'ouvrage est isolé par une couche de polyuthérane et comporte trois modules successifs.

3.1.2. Le soufre.

Les techniques de transport du soufre liquide sont essentiellement les mêmes que pour les hydrocarbures visqueux. On doit maintenir néanmoins une température légèrement plus élevée ce qui se traduit par des revêtements plus coûteux.

Il existe actuellement une seule canalisation transportant le soufre sous forme liquide :

- l'ouvrage de la Freeport Sulphur Company, long de 12 km, reliant les gisements du Golfe du Mexique au continent américain. Le diamètre de la canalisation est de 6 pouces. Elle est elle-même entourée d'un autre tube de 14 pouces. Entre les deux tubes se trouvent une couche épaisse de polyuthérane et une gaine dans laquelle circule de la vapeur.

3.1.3. Le gaz naturel liquéfié.

Bien qu'il existe actuellement des exemples de transport des hydrocarbures visqueux par canalisation, le transport de gaz naturel liquéfié est toujours dans la phase de recherche. Les études effectuées par la Battelle Memorial Institute montrent néanmoins que le transport de ce produit est maintenant réalisable du point de vue technique.

Les avantages du transport de gaz liquéfié résident essentiellement dans le fait, qu'à diamètre égal, 3 fois plus de gaz peut être transporté sous forme liquide. Les économies faites dans les coûts de transport résultants, doivent néanmoins être considérées par rapport aux coûts d'installation élevés, liés aux aspects d'isolation, de réfrigération et à la nécessité d'utiliser des matériaux cryogéniques (tubes en aluminium ou en acier spécial).

Les recherches ont porté sur deux formes d'isolation :

- isolation mécanique
- isolation par vide.

En ce qui concerne l'isolation mécanique, on estime que les produits classiques, type polyuréthane, sont acceptables sous forme de couches variant entre 2 et 6 pouces selon le diamètre des tubes. Pour un tube de 10 pouces à isolation mécanique, les études de distance modulaire montrent que celle-ci sera de l'ordre de 40 km pour les stations de chauffage et de réfrigération.

L'isolation par vide consiste essentiellement en deux tubes concentriques séparés par un vide. En raison du coefficient de conductivité très bas, la distance modulaire pour les stations de réfrigération est ainsi portée à 600 km. Le nombre de stations de réfrigération est ainsi sensiblement réduit mais en revanche les coûts d'installation sont beaucoup plus élevés que pour les tubes à isolation mécanique.

D'après les études de Battelle et avec les techniques actuelles, le transport de gaz naturel liquéfié par canalisation pourrait concurrencer le transport de gaz classique sur certains types de liaison; c'est le cas en particulier de la distribution de base à grande capacité et à moyenne et grande distances entre une région productrice et un grand centre consommateur.

3.2. Les solides en suspension.

Le transport de solides en suspension par canalisation est appliqué depuis longtemps sur de très courtes distances notamment dans les mines et dans les activités de dragage. Il existe également quelques réalisations qui prétendent entrer en compétition avec les moyens de transports traditionnels sur de longues distances.

La plus importante, tant par sa longueur que par l'intérêt technique qu'elle présente, est une canalisation de 10 3/4 pouces transportant du charbon en suspension sur une distance de 170 km entre une mine et une centrale thermique dans l'état d'Ohio. Cet ouvrage, qui est capable de transporter 1,2 Mt/an de charbon dans une suspension de 50 % fut construit en 1956 après des études très détaillées. L'installation avait apparemment donné toute satisfaction jusqu'en 1964, date à laquelle elle fut mise hors service à la suite d'un abaissement du taux de fret pratiqué par les chemins de fer concurrents sur la même liaison. On peut noter que les dépenses d'énergie nécessaires pour l'écoulement de la suspension sont tout à fait comparables à celles du transport de pétrole brut à diamètre égal.

La deuxième réalisation en tant que longueur, est un pipeline de 6 pouces transportant le gilsonite entre les villes de Bonanza (Utah) et Grand Junction (Colorado), sur une distance de 120 km. Cette réalisation qui transporte 320.000 t/an est néanmoins moins intéressante que l'installation précédente en raison de la faible densité du produit et de la facilité du transport.

Parmi d'autres ouvrages qui existent actuellement on peut citer :

- une canalisation de 100 km transportant du minerai de fer en Tasmanie.

- une canalisation de 10 3/4 pouces et d'une longueur de 100 km transportant de la chaux entre une carrière et une cimenterie à Rugby, en Angleterre.

Il convient de signaler également que des recherches menées au Canada montrent la possibilité du transport des autres produits, notamment :

- le soufre sous forme de granulés
- les copeaux de bois
- les minerais de potasse et de cuivre.

La technique du transport des solides en suspension pose plusieurs problèmes particuliers par rapport au transport de liquides. Ces problèmes concernent essentiellement :

- la préparation de la mixture et séparation du produit
- la lutte contre l'abrasion ou corrosion
- les matériels.

Les ouvrages terminaux nécessaires à la préparation et la récupération du produit solide représentent une part très importante du coût de l'ouvrage; c'est-à-dire environ 20 à 30 % des investissements annuels, cette part étant de l'ordre de 5 % pour le transport de liquides. C'est ainsi que ces installations conditionnent souvent la rentabilité de l'ouvrage.

A l'entrée de la canalisation on trouve les installations de concassage, broyage et mise en suspension. A la sortie se trouvent les installations de séparation et de séchage. On peut noter que pour la livraison de charbon à une centrale thermique, le traitement terminal peut être simplifié par l'utilisation de brûleurs capable de recevoir le produit humide; c'est le cas de l'ouvrage américain dans l'état d'Ohio.

L'importance de l'abrasion varie selon la nature du solide à transporter.

L'expérience acquise sur la canalisation à charbon américaine permet d'affirmer que l'abrasion peut être abaissée à une valeur raisonnable, grâce à l'utilisation d'une granulométrie fine. Il paraît souhaitable néanmoins d'augmenter légèrement l'épaisseur des tubes, surtout sur le fond et aux virages, et d'ajouter à la mixture un inhibiteur chimique pour lutter contre la corrosion chimique qui peut résulter même d'une abrasion très faible.

Le choix des matériels de pompe, plus particulièrement les vannes, pose le même genre de problème que pour les tubes. On utilise surtout des pompes de type centrifuge dont les constructeurs cherchent à réduire l'usure et l'abrasion par l'utilisation des aciers au nickel ou des revêtements spéciaux. Le coût des stations de pompage a une tendance donc à être légèrement plus élevé que celui des pompes classiques utilisées pour le transport de liquides.

En tenant compte de ces facteurs spéciaux relatifs au transport de solides en suspension, il semble évident que les coûts de transport seront toujours plus élevés que ceux du transport de liquides. De plus, il existe pour chaque matière solide un seuil minimum de coût unitaire de transport qui dépend essentiellement des opérations de préparation et de récupération. Par contre, ce seuil n'existe pas pour le coût de transport des liquides car celui-ci décroît progressivement lorsque le volume augmente.

Bien qu'il existe actuellement quelques projets importants du transport de solides, notamment pour le charbon et le soufre, il semble en général que le prix de transport a une tendance à se rapprocher de celui des moyens classiques. On peut donc conclure que le transport de solides en suspension doit s'affirmer moins dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement, en raison de la faiblesse de l'infrastructure ferroviaire et routière, il constitue l'investissement le plus immédiatement rentable.

3.3. Les capsules.

L'utilisation de capsules ou de containers comme moyen de transport hydraulique est un domaine tout à fait nouveau. Bien qu'il n'existe pas d'exemples opérationnels, les techniques et les problèmes de ce genre de transport ont été étudiés profondément par des organismes

canadiens notamment le Research Council of Alberta.

Les investigations sur le comportement d'un train de capsules poussé par un liquide transportateur nous ont menés à une connaissance exacte des problèmes hydromécaniques relatifs à ce mode de transport. L'un des principaux résultats de ces recherches montre que lorsque le diamètre de la capsule se rapproche du diamètre du tube, la capsule a une tendance à avancer plus vite que le liquide en régime laminaire. Ce phénomène se traduit par des dépenses d'énergie sensiblement plus faibles que celles du transport de solides en suspension ou même de liquides.

Il existe par contre plusieurs problèmes particuliers relatifs au transport de capsules qui augmentent les coûts d'installation d'un tel ouvrage :

- le revêtement intérieur de la conduite
- le "by-pars" des pompes
- la fourniture et le retour des capsules.

Du soin doit être apporté en particulier à l'installation de la conduite et surtout aux soudures afin de minimiser le frottement des capsules contre les parois. D'autre part, il paraît indispensable de revêtir l'intérieur de la conduite d'une couche de matière plastique assurant ainsi un meilleur coefficient d'écoulement.

Les stations de pompage sont appelées à être plus complexes que les mêmes installations pour des conduites à liquides. Il est en effet nécessaire d'établir un système d'écluses permettant le passage des capsules. Par contre, les coûts d'exploitation des pompes elles-mêmes seront plus bas que ceux pour le transport d'un liquide seul, en raison des pertes de charge plus faibles.

Un aspect d'importance considérable est celui de la capsule elle-même. On peut envisager plusieurs types de capsules, variant selon la nature de la cargaison, entre des containers rigides et des sacs en matière plastique. Dans le cas où on est amené à utiliser les

capsules "permanentes", des provisions seront nécessaires pour leur retour à l'origine de l'ouvrage, le coût de cette opération devant être assimilé au prix de revient.

Par la nature même du transport de capsules, on peut facilement envisager des applications à une gamme très large de produits solides. Bien que ce genre de transport soit mieux adapté aux solides en vrac, tels que le blé et les minerais, il est tout à fait raisonnable d'envisager son utilisation pour des cargaisons mixtes (pièces détachées, colis postaux, produits pharmaceutiques, etc ...)