

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département Hydraulique**  
**SONATRACH - Activité Transport par Canalisation**  
**Mémoire de projet de fin d'études**  
**pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique**

**Projection D'un Nouvel Oléoduc Dans Le  
Champ Pétrolier De Hassi Berkine**

**Mlle Sania Aziza TIAIBA**

**Sous la direction de M. Mohamed BENBRAIKA**

**Présenté et soutenu publiquement le 11/10/2012**

**Compositions du Jury :**

Président	Mme Saadia BENMAMAR, Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Rapporteur/ Promoteur	M. Adel NEBBACHE, Enseignant	Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	M. Salim BENZIADA, Enseignant	Ecole Nationale Polytechnique
Invité	M. Hocine BENNOUR, Enseignant	Ecole Nationale Polytechnique



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département Hydraulique**  
**SONATRACH - Activité Transport par Canalisation**  
**Mémoire de projet de fin d'études**  
**pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique**

**Projection D'un Nouvel Oléoduc Dans Le  
Champ Pétrolier De Hassi Berkine**

**Mlle Sania Aziza TIAIBA**

**Sous la direction de M. Mohamed BENBRAIKA**

**Présenté et soutenu publiquement le 11/10/2012**

**Compositions du Jury :**

Président	Mme Saadia BENMAMAR, Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Rapporteur/ Promoteur	M. Adel NEBBACHE, Enseignant	Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	M. Salim BENZIADA, Enseignant	Ecole Nationale Polytechnique
Invité	M. Hocine BENNOUR, Enseignant	Ecole Nationale Polytechnique

## ملخص:

إن الغرض من هذا العمل هو حجم خط أنابيب لنقل النفط من حقل حاسي بركين إلى حوض الحمراء كخطوة أولى، وضعنا النموذج الرياضي الذي يحكم التدفق في خطوط الأنابيب ثم قدمنا برنامج "pipephase" الذي ساعدنا في حساب فقد الحمولة في النظام بأكمله.

لقد قمنا بإعادة حساب التدفق للمحطة الموجودة (OH3) بناء على توقعات الإنتاج التي وفرتها سوناتراك بحيث أشبعنا المحطة مع احترام نقطة تشغيلها.. واستخدمنا المنتج الفائض كقاعدة لتصميم OH4 مع استخدام نفس محطات الضخ.

وجدنا أن المحطة الموجودة (شبكة ومحطة الضخ) كانت مضخمة جدا كما أن طاقة المحطة OH4 أكبر بكثير من الطاقة الإنتاجية للحقل.

بما أن هنالك انخفاض في الضغط في حقول النفط، سمحت لنا حساباتنا بإثبات أنه في كثير من الأحيان عوامل السلامة المستخدمة غير مبررة وتؤدي إلى تكاليف إضافية لا تغطيها فترة استغلال المحطة.

كلمات مفتاحية: خط أنابيب, OH4, OH3, محطة الضخ.

## Abstract :

The purpose of this work is to size a pipeline to transport oil from the oil field of Hassi Berkine Haoud El Hamra. As a first step, we have developed the mathematical model governing the flow in the pipeline and we then presented the software "PIPEPHASE" which we used for the calculation of losses in the entire system.

We recalculated the flow of the existing installation (OH3) based on production forecasts provided by Sonatrach to saturate while respecting the operating point of the installation. The surplus product was our base for the design of OH4 while trying to use the same installation existing pumping.

We found that the existing installation (network and pumping station) was oversized. The OH4 installed is far greater than the production capacity of the field.

As oil fields are depressed, our calculation has allowed us to demonstrate that the safety factors used are often not justified and bring extra costs which the amortization period is longer than the service life of the installation.

Keywords: Pipeline, Pipephase, OH3, OH4, Pumping Station.

## Résumé :

L'objet de ce travail est de dimensionner un oléoduc pour le transport de pétrole du champ pétrolier de Hassi Berkine à Haoud El Hamra. Dans un premier temps, nous avons développé le modèle mathématique régissant l'écoulement dans les pipelines et avons ensuite présenté le logiciel « PIPEPHASE » qui nous a servi pour le calcul des pertes de charge dans l'ensemble de l'installation.

Nous avons recalculé le débit de l'installation existante (OH3) sur la base des prévisions de production fournies par la Sonatrach de manière à le saturer tout en respectant le point de fonctionnement de l'installation. Le surplus de produit nous a servi de base pour le dimensionnement de l'OH4 tout en essayant d'utiliser la même installation de pompage existante.

Nous avons constaté que l'installation existante (réseau et station de pompage) a été surdimensionnée. L'OH4 installé est de loin supérieur à la capacité de production du champ.

Comme les champs pétroliers sont en dépression, notre calcul nous a permis de mettre en évidence que les coefficients de sécurité utilisés sont souvent non justifiés amenant à des surcoûts dont la durée de l'amortissement est plus longue que la durée de vie de l'installation.

Mots-clés : Oléoduc, pipeline, PIPEPHASE, OH3, OH4, station de pompage.

## Table des matières

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....	11
CHAPITRE I. DEFINITIONS ET GENERALITES SUR LE TRANSPORT PAR CANALISATIONS .....	13
1. APERÇU HISTORIQUE DE LA SONATRACH.....	14
2. LE TRANSPORT PAR CANALISATIONS (TRC) .....	15
2.1. Les Missions Assurées Par l'Activité TRC.....	15
2.2. Avantages et Inconvénients du transport par canalisations.....	16
1.1.1. Avantages .....	16
1.1.2. Inconvénients .....	16
3. GENERALITES.....	18
3.1. Définitions.....	18
3.2. PETROLE .....	21
1.1.3. Définition .....	21
1.1.4. Composition des pétroles bruts .....	21
1.1.5. Etat Chimique Des Hydrocarbures.....	21
1.1.6. Etat Physique.....	23
1.1.7. Produits Pétroliers .....	23
1.1.8. Origine et Formation du Pétrole Brut.....	24
4. PRESENTATION DU CHAMP PETROLIER DE HASSI BERKINE .....	30
4.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN DE BERKINE.....	30
4.2. HISTORIQUE DU BASSIN DE BERKINE .....	30
4.3. Présentation Des Installations Existantes :.....	30
4.3.1. L'oléoduc OH3 .....	31
4.3.2. Centre de Stockage et de Transport Hassi Berkine (C.S.T.H) .....	32
4.3.3. La Station De Pompage Intermédiaire NEZLA .....	33
CHAPITRE II. MODELE MATHEMATIQUE REGISSANT L'ECOULEMENT DU PETROLE BRUT DANS LES PIPELINES .....	34
1. Equation de Continuité (Conservation de la masse) .....	35
2. Equation de la conservation de la quantité de Mouvement.....	35

3. Etablissement des Equations Moyennes.....	36
4. Coefficient de frottement et coefficient de perte de charge .....	38
5. Zone logarithmique et sous couche visqueuse .....	39
6. Perte de charges dans une conduite circulaire.....	41
6.1. Perte De Charge Linéaires.....	41
6.2. Perte De Charge Singulières .....	44
7. Description du logiciel pipephase .....	45
7.1. Portée fonctionnelle et objectifs du Logiciel PIPEPHASE.....	45
7.2. Modes de Calcul Utilisés par le Logiciel PIPEPHASE .....	46
7.3. Méthodes de Calcul de la Perte de Charge.....	46
7.4. Applications typiques du Logiciel PIPEPHASE.....	46
7.5. Utilisation du PIPEPHASE .....	47
7.6. Données Nécessaires au PIPEPHASE .....	47
7.6.1. Données Relatives au Fluide .....	47
7.6.2. Données Relatives à l'installation .....	48
CHAPITRE III. CALCUL HYDRAULIQUE D'UN OLEODUC .....	50
1. Règles de sécurité dans le transport par Canalisation .....	51
1.1. Pression de refoulement .....	51
1.2. Résistance des matériaux .....	52
1.3. Caractéristiques de l'acier .....	52
1.4. Emplacement de la conduite .....	53
1.4.1. Coefficient de sécurité.....	53
2. DESCRIPTION DE L'OLEODUC OH3 .....	54
3. CALCUL HYDRAULIQUE DU OH3 .....	54
3.1. Calcul de la Pression Maximale de Service (PMS).....	54
3.1.1. La norme Algérienne.....	56
3.2. Calcul du Gradient Hydraulique .....	56
3.2.1. Données sur le sol : .....	56
3.2.2. Données sur le pipeline : .....	57
3.2.3. Données concernant le fluide : .....	57
3.2.4. Caractéristiques des pompes : .....	58
3.3. Courbes Caractéristiques des Différentes Pompes.....	58
3.4. Calcul des pertes de charges.....	61

3.4.1.	Calcul de la dénivelée .....	61
3.4.2.	Calcul des Paramètres Hydrauliques à Température Standard (30°) .....	63
3.4.3.	Courbes Caractéristiques de la Conduite .....	69
4.	CALCUL HYDRAULIQUE DU OH4 .....	71
4.1.	Quantités de Dimensionnement .....	71
4.2.	Calcul de la PMS .....	74
4.3.	Calcul du gradient hydraulique .....	75
4.3.1.	Données sur le pipeline : .....	75
4.3.2.	Données concernant le fluide : .....	75
4.3.3.	Caractéristiques des pompes : .....	76
4.3.4.	Courbes Caractéristiques de la Pompe .....	76
4.4.	Calcul des pertes de charges.....	77
4.4.1.	Calcul de la dénivelée .....	77
4.4.2.	Calcul des Paramètres Hydrauliques à Température Standard (30°) .....	78
4.4.3.	Courbes Caractéristiques de la Conduite .....	83
5.	CONCLUSION .....	85
	CONCLUSION GENERALE .....	87
	BIBLIOGRAPHIE.....	89
	ANNEXE 1 .....	91
	ANNEXE 2.....	98
	ANNEXE 3.....	105
	ANNEXE 4.....	124

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*  
*à ma très chère et tendre maman qui a tant fait pour moi ;*  
*à mon très cher frère qui m'a toujours soutenu et protégée ;*  
*à la mémoire de mon défunt père ;*  
*à ma très chère tante Lilas et ma cousine Melissa ;*  
*à mon adorable tante et sœur Hayette et ses enfants ;*  
*à Karim mon binôme virtuel pour son écoute et son soutien ;*  
*à Khadjidja qui m'a été d'un grand réconfort pour moi ;*  
*à toute ma famille et mes amis ;*  
*et à tous ceux que j'aime ;*  
*à mon guide spirituel..., merci ;*  
*et enfin aux phoques de terre entière et spécialement ma Focma.*



## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude, mon respect et ma reconnaissance, en premier lieu, à mon promoteur **M. Mohamed BENBRAIKA**, tout d'abord, pour avoir accepté de m'encadrer malgré toutes les difficultés rencontrées, pour m'avoir soutenue, remonté le moral dans les moments difficiles, pour tous les conseils et les enseignements qu'il m'a prodigués tout au long de cette période. Je vous remercie Monsieur, du plus profond de mon être de ne m'avoir laissée tomber à aucun moment.

Pour avoir accepté de m'encadrer, pour m'avoir souri dans les moments les plus difficiles, pour m'avoir rassurée et soutenue, mes remerciements les plus profonds et mon respect vont vers **M. A.NEBBACHE**, mon co-promoteur.

Je tiens tout spécialement à exprimer mes vifs remerciements et mon admiration à **Mlle S. BENMAMAR** pour m'avoir toujours et en tout temps ouvert sa porte, pour m'avoir soutenue, pour sa disponibilité sa gentillesse et tous les efforts dont elle m'a fait bénéficier, pour la personne juste qu'elle est et pour l'enseignante remarquable qu'elle a été pour moi et pour toute ma promotion.

Un grand Merci à tous mes enseignants pour leurs enseignements précieux et leur disponibilité.

Un remerciement du cœur à un homme de cœur, à **M. Salim BENZIADA**, pour ses conseils très précieux, sa sympathie, la présence et la patience dont il a fait preuve envers moi et mes camarades. Cher Monsieur, vous m'avez ouvert les portes qui m'ont permis une évolution tout à fait enviable dans ma vie professionnelle et pour cela je ne vous remercierai jamais assez.

Mes très sincères et très profonds remerciements s'adressent aux gens de la SONATRACH, pour leur accueil, leur confiance, leur disponibilité, le temps qu'ils m'ont accordé, leur gentillesse et leur sympathie, et en premier lieu à Mme **Y. BROURI**, son fils **K.BROURI** et **M. S. SADOUNI** de la Direction des ressources humaines, qui m'ont ouvert les portes de SONATRACH et m'ont permis de connaître une équipe d'ingénieurs compétents et très serviables malgré leurs contraintes.

A **M. Abdelkader KRABCHI**, **M. AIT-OUABDESSLAM** et **Madjid** du Département Etudes et Développement et à **M. Dj. BOUZAHER** du Département Exploitation, qui m'ont été d'une aide très précieuse et sans laquelle mon travail n'aurait probablement pas abouti.

Mes vifs remerciements s'adressent aux membres du jury **M. S. BENZIADA** et **M. H. BENNOUR**, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir évaluer ce modeste travail.

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1</b>	<i>Composition massique atomique d'un pétrole brut.....</i>	22
<b>Tableau III.1</b>	<i>Résistance des Tubes.....</i>	52
<b>Tableau III.2.</b>	<i>Coefficient de sécurité par zone d'implantation des pipelines.....</i>	53
<b>Tableau III.3</b>	<i>Données sur le Sol .....</i>	56
<b>Tableau III.4</b>	<i>Données sur le Pipeline.....</i>	57
<b>Tableau III.5</b>	<i>Données sur le Fluide.....</i>	57
<b>Tableau III.6</b>	<i>Caractéristiques des Pompes .....</i>	58
<b>Tableau III.7</b>	<i>Données Caractéristiques des Pompes fournies par le Constructeur...</i>	59
<b>Tableau III.8</b>	<i>Les Valeurs de (a1) pour les Différentes Pompes.....</i>	59
<b>Tableau III.9</b>	<i>Les Valeurs de (a2) pour les Différentes Pompes.....</i>	59
<b>Tableau III.10</b>	<i>Les Valeurs de (a3) pour les Différentes Pompes.....</i>	59
<b>Tableau III.11</b>	<i>Profil en long de l'OH3/ OH4.....</i>	61
<b>Tableau III.12</b>	<i>Prévisions de Production du Brut au Niveau du OH3 - (HBN).....</i>	71
<b>Tableau III.13</b>	<i>Données sur le Pipeline OH4.....</i>	75
<b>Tableau III.14</b>	<i>Données sur le Fluide.....</i>	75
<b>Tableau III.15</b>	<i>Caractéristiques des Pompes .....</i>	76
<b>Tableau III.16</b>	<i>Les Valeurs de (a1) pour les Différentes Pompes.....</i>	77
<b>Tableau III.17</b>	<i>Les Valeurs de (a2) pour les Différentes Pompes.....</i>	78
<b>Tableau III.18</b>	<i>Les Valeurs de (a3) pour les Différentes Pompes.....</i>	79

## Liste des Figures

<b>Figure I.1</b>	<i>Schéma De Principe De L'exploitation Des Hydrocarbures En Algérie.....</i>	17
<b>Figure I.2</b>	<i>Ensemble des hydrocarbures présents dans les pétroles bruts.....</i>	22
<b>Figure I.3</b>	<i>Différentes Coupes Pétrolières.....</i>	23
<b>Figure I.4</b>	<i>Schéma d'un système pétrolier simple (doc. IFP).....</i>	25
<b>Figure I.5</b>	<i>Principaux types de pièges à hydrocarbures.....</i>	27
<b>Figure I.6</b>	<i>Distribution des Réserves Mondiale en Pétrole 1989 – 2009.....</i>	29
<b>Figure I.7</b>	<i>Position géographique de l'oléoduc OH3.....</i>	31
<b>Figure II.1</b>	<i>Développement de la Couche Limite Turbulente dans un Conduit.....</i>	36
<b>Figure II.2</b>	<i>Représentation de la loi de paroi.....</i>	41
<b>Figure II.3</b>	<i>Diagramme de Moody.....</i>	43
<b>Figure II.4</b>	<i>Portée fonctionnelle du PIPEPHASE.....</i>	45
<b>Figure III.1</b>	<i>Carte Des Gisements Pétroliers Du Bassin de Berkine.....</i>	55
<b>Figure III.2</b>	<i>Profil en Long de l'oléoduc OH3/ OH4 – HBN à HEH.....</i>	62
<b>Figure III.3</b>	<i>Profil des Températures – OH3.....</i>	65
<b>Figure III.4</b>	<i>Tracé du Gradient Hydraulique du pipeline OH3- Hassi Berkine.....</i>	68
<b>Figure III.5</b>	<i>Courbes Caractéristiques Du Système Pompes Conduite (HBN).....</i>	69
<b>Figure III.6</b>	<i>Courbes Caractéristiques Du Système Pompes Conduite (NEZLA).....</i>	70
<b>Figure III.7</b>	<i>Schéma Synoptique du Réseau Sud de Brut dans la Région de Hassi Berkine.....</i>	72
<b>Figure III.8</b>	<i>Schéma Synoptique de la Solution Retenue pour l'Evacuation du Brut dans la Région de Hassi Berkine .....</i>	83
<b>Figure III.9</b>	<i>Profil des Températures – OH4.....</i>	80
<b>Figure III.10</b>	<i>Tracé du Gradient Hydraulique du pipeline OH4.....</i>	83
<b>Figure III.11</b>	<i>Courbes Caractéristiques Du Système Pompe Conduite OH4.....</i>	84

## Liste des Abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
<b>ANSI</b>	American National Standards Institute	-
<b>API</b>	American Petroleum Institute	-
<b>bbl</b>	Baril = 158,9 l	-
<b>C<sub>pf</sub></b>	Chaleur spécifique du fluide	<b>J/Kg K</b>
<b>H</b>	Charge	<b>m</b>
<b>h<sub>t0</sub></b>	Coefficient de convection externe	<b>W/m<sup>2</sup>°C</b>
<b>U</b>	Coefficient de convection global	<b>W/m<sup>2</sup>°C</b>
<b>h<sub>ti</sub></b>	Coefficient de convection interne	<b>W/m<sup>2</sup>°C</b>
<b>λ</b>	Coefficient de frottement	-
<b>ν</b>	Coefficient de poisson	-
<b>λ<sub>sol</sub></b>	Conductivité du sol	<b>Wcm<sup>-1</sup>C<sup>-1</sup></b>
<b>λ<sub>f</sub></b>	Conductivité thermique du fluide	<b>Wcm<sup>-1</sup>C<sup>-1</sup></b>
<b>λ<sub>m</sub></b>	Conductivité thermique du tube	<b>Wcm<sup>-1</sup>C<sup>-1</sup></b>
<b>τ</b>	Contrainte de cisaillement	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>w<sub>mass</sub></b>	Débit massique	<b>Kg/s</b>
<b>Q</b>	Débit volumique	<b>m<sup>3</sup>/s</b>
<b>ρ<sub>f</sub></b>	Densité du fluide à 30°C	-
<b>ρ<sub>i</sub></b>	Densité du fluide en chaque point du tube	-
<b>D<sub>ext</sub></b>	Diamètre extérieur de la conduite	<b>m</b>
<b>D<sub>int</sub></b>	Diamètre intérieur de la conduite	<b>m</b>
<b>D<sub>n</sub></b>	Diamètre Nominal	<b>m</b>
<b>DRA</b>	Drag Reducer Additives (Agents réducteurs de Traînée)	-
<b>HEH</b>	Haoud El Hamra	-
<b>HBN</b>	Hassi Berkine	-
<b>Hg</b>	Hauteur géométrique des bacs HBN	<b>m</b>
<b>K</b>	La résistance hydraulique de la canalisation	<b>s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup></b>
<b>MTA</b>	Millions Tonnes par An	
<b>E</b>	Module d'élasticité de l'acier	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>NZL</b>	Nezla	-
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds	-
<b>Pr</b>	Nombre Prandtl	-
<b>dh</b>	Perte de charge	<b>m</b>
<b>dp</b>	Perte de pressions	<b>Pa</b>
<b>Pk</b>	Point kilométrique	<b>Km</b>
<b>P<sub>asp</sub></b>	Pression d'aspiration	<b>bar</b>
<b>Pd</b>	Pression de design	<b>bar</b>
<b>PMS</b>	Pression maximale de service	<b>bar</b>
<b>dpt</b>	Profondeur d'enfouissement du pipeline	<b>m</b>
<b>η</b>	Rendement	<b>%</b>
<b>ε</b>	Rugosité	<b>mm</b>
<b>S</b>	Section	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Tc</b>	Température critique	<b>K</b>
<b>t<sub>sol</sub></b>	Température du sol	<b>°C</b>
<b>t<sub>i</sub></b>	Température en chaque point du pipeline	<b>°C</b>
<b>μ</b>	Viscosité dynamique	<b>Pa.s</b>
<b>μ<sub>j</sub></b>	Viscosité dynamique en chaque point du tube	<b>Pa.s</b>
<b>N</b>	Vitesse de rotation de la pompe	<b>tr/mn</b>
<b>V</b>	Vitesse d'écoulement	<b>m/s</b>

### INTRODUCTION GENERALE

Le monde est depuis toujours en continu changement, la population mondiale augmente, le développement et la technologie ne cesse d'avancer, d'inventer de jour en jour encore plus de merveilles. Bien évidemment et comme rien ne vient jamais seul, ces changements, ces grands pas en avant sont conditionnés par des besoins de tout type, avec en tête de ces derniers les besoins en énergie.

L'Algérie, pays dont la surface sédimentaire dépasse le million et demi de kilomètres carrés, présente depuis 1956 (date de découverte des plus grands gisements Hassi-R'mel et Hassi Messaoud) un potentiel important en hydrocarbures.

L'intensification des rythmes de production et des découvertes de nouveaux gisements de brut, de condensât et de gaz, se traduisent alors par une augmentation des quantités produites. De ce fait, le réseau algérien de transport d'hydrocarbures liquides, reliant par canalisations les champs sahariens de production aux sites d'exportation et de transformations implantés sur le littoral, doit satisfaire les demandes d'expédition des quantités produites.

Pour ce faire, l'état Algérien lance périodiquement plusieurs appels d'offres via la SONATRACH, dans le but de renforcer ce réseau par la réalisation de différentes extensions des réseaux existants ou la réalisation d'installations nouvelles de pompage et de transport du brut.

Dans le cadre du présent mémoire de fin d'études, nous allons étudier l'extension d'un réseau déjà existant dans la région de Hassi Berkine afin d'augmenter sa capacité de transport, dans le but d'optimiser et de rentabiliser ses installations en choisissant la meilleure solution technique.

Suite à la découverte de nouveaux gisements de brut, de condensât et de gaz en 2004, aux prévisions faites à moyen et long termes sur la base des capacités de ces nouveaux gisements sur la région de Hassi Berkine, dans laquelle un réseau de transport d'hydrocarbures existe déjà, deux questions objectives se sont posées :

- 1- Le réseau algérien de transport d'hydrocarbures liquides, reliant par canalisations les champs sahariens de stockage de Hassi Berkine aux sites de transformation et d'expédition de Haoud el Hamra, peut-il assurer dans sa configuration actuelle l'acheminement des quantités nouvelles produites à moyen et long terme ?
- 2- Quelles seraient les solutions techniques et économiques à adopter pour atteindre ces objectifs à moindre cout ?

Deux principales variantes ont été proposées :

1- *1<sup>ère</sup> Variante* :

La modification de l'installation de pompage en totalité ou en partie comme suit :

- A- Installation d'un nouvel oléoduc OH4 en parallèle de l'OH3 renforcé d'une station de pompage ;
- B- La construction d'un Loop (un tronçon de pipeline connecté en parallèle de l'OH3).

2- *2<sup>e</sup> Variante* :

Injection d'un polymère réducteur de trainée, DRA (Drag Reducer Additives), dans l'OH3 ce qui permettra à la même installation existante de véhiculer un plus grand débit.

SONATRACH a opté pour l'option A de la 1<sup>ère</sup> variante qui a été réalisée et est opérationnelle depuis plus de 5 ans maintenant. Néanmoins aujourd'hui cette même installation fonctionne avec une capacité de loin inférieure à sa capacité de production initiale ce qui nous ramène à notre problématique.

Quelles ont été les hypothèses de dimensionnement de l'OH4 ? Et pourquoi ne fonctionne-t-il pas à sa capacité nominale de production 5 ans plus tard ?

Cela est-il dû à une surestimation de la production du puits à moyen et long terme ?

Afin de répondre à ces questions, nous proposons un travail organisé en trois chapitres.

Le premier, servira à donner les différentes définitions des termes nécessaires à la compréhension du phénomène étudié ainsi que la description de l'installation actuelle de transport du pétrole brut du champ pétrolier de Hassi Berkine vers le terminal de traitement et d'expédition de Haoud el Hamra.

Un deuxième chapitre est consacré à l'établissement du modèle mathématique régissant l'écoulement du brut dans les pipelines et la description du logiciel utilisé pour le calcul des pertes de charge dans le réseau.

Le calcul de la nouvelle installation proposée est détaillé dans le dernier chapitre.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale résumant nos constatations de conception et ouvrant la porte vers le traitement d'autre sujet en relation avec l'optimisation des réseaux de transport des hydrocarbures.

**CHAPITRE I**  
**DEFINITIONS ET GENERALITES SUR LE**  
**TRANSPORT PAR CANALISATIONS**

Avant d'aborder les questions techniques, il est nécessaire de donner un bref aperçu du géant de l'exploitation, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures en Algérie plus communément connu sous le nom de la '**SONATRACH**'.

## 1. APERÇU HISTORIQUE DE LA SONATRACH

Toutes les richesses du sous-sol Algérien étaient exploitées par des compagnies étrangères jusqu'au 31 Décembre 1963, date à laquelle l'état Algérien, par le décret N° 63191, créa la **Société Nationale de Recherche, Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures**, connue sous le nom de SONATRACH.

Dès lors cette compagnie est devenue l'organe principal d'accumulation des ressources financières nécessaires au décollage économique de l'Algérie, pour finir actuellement parmi les dix (12) premiers producteurs et exportateurs des hydrocarbures dans le monde. [1]

**En 1981**, la SONATRACH fût restructurée donnant ainsi naissance à 18 entreprises nationales autonomes.

**En 1986**, une loi relative de prospection, de recherche, d'exploitation et de transport par canalisation a été adoptée et ce, pour stimuler la participation étrangère à l'exploration.

**En 1991** des amendements à la loi de 1986 ont été introduits. Ils visaient à encourager le développement de formule de partenariat entre la SONATRACH et des sociétés pétrolières étrangères ce qui a permis de conclure plus de 45 contrats avec des partenaires étrangers.

Cet accord encourage SONATRACH / British Petroleum à commercialiser conjointement les quantités de gaz produites en Algérie sur le marché européen.

La SONATRACH joue un rôle important dans l'économie du pays :

- Contribue pour une part importante du PIB (27% en 2009).
- Emploie plus de 39000 personnes.
- Assure à l'état la quasi-totalité des rentrées en devise.
- Contribue pour plus de 50 % au budget de l'état par le biais de la fiscalité pétrolière.

Les principales divisions de la SONATRACH sont : [1]

- 1- La division exploration et la division production appartenant à l'**Activité Amont SH** ;
- 2- La division transport ou **Activité Transport Par Canalisations (TRC)** ;
- 3- La division liquéfaction du gaz, raffinage du brut **Activité Avale SH** ;
- 4- **Activité Commercialisation** qui assure toutes les opérations commerciales et de trading aussi bien sur le marché Algérien qu'à l'étranger.



## 2. LE TRANSPORT PAR CANALISATIONS (TRC)

Les pipelines permettent le transport du pétrole brut et des produits pétroliers depuis les régions de production jusqu'aux zones de transformation (raffinage) et de consommation. Les pipelines sont composés de tubes, soudés les uns aux autres, d'un diamètre de quelques dizaines de centimètres à plus de 1 m. Une **canalisation enterrée (oléoduc)** est la solution la plus adaptée pour le transport massif d'hydrocarbures et limite les risques de pollution par rapport aux transports maritimes. [2]

Les hydrocarbures sont transportés sous pression, maintenue par des stations de pompage installées à intervalles réguliers. Ce type de transport est privilégié dans les pays où les distances à traverser sont importantes.

Il existe plusieurs centaines de milliers de kilomètres d'oléoducs dans le monde. Il existe aussi des pipelines sous-marins comme ceux traversant la Méditerranée entre l'Afrique du Nord et l'Europe. C'est un mode de transport très sûr mais on sait mal lui faire franchir les mers profondes, et lorsque les profondeurs sont faibles, la construction demeure difficile et coûteuse. La lourdeur de l'investissement nécessite par ailleurs l'assurance que le flux sera constant sur plusieurs dizaines d'années. Ce moyen de transport traverse des zones pétrolifères qui sont épisodiquement sujettes à des troubles politiques. Aussi, il arrive que l'utilisation de certains oléoducs soit paralysée, voire leur construction inachevée [2]. Le transport par pipeline offre moins de souplesse que le transport maritime qui permet à tout moment et selon les circonstances de dérouter un navire et de profiter ainsi d'opportunités plus favorables pour la valorisation de sa cargaison.

En Algérie comme dans tous les pays producteurs d'hydrocarbures, le transport par canalisations est devenu le moyen le plus important pour l'acheminement des hydrocarbures à grande échelle, cependant ce dit moyen n'a pas que des avantages.

### 2.1. Les Missions Assurées Par l'Activité TRC

Le transport par canalisation comprend les missions suivantes :

- le transport des hydrocarbures liquides et gazeux des unités de production vers les terminaux;
- le stockage des hydrocarbures liquides ;
- la livraison des hydrocarbures liquides et gazeux ;
- le chargement des hydrocarbures liquides et gazeux ;
- le développement et la maintenance du réseau de transport.

Les capacités totales de transport installées du réseau de transfert des hydrocarbures en Algérie sont de 322 millions de tonnes équivalent pétrole (MTEP) représentant une longueur totale de plus de 18 000 kilomètres constituant 19 systèmes de transport dont 7 sont réservés à

l'acheminement du pétrole brut, 2 à celui du condensât, 2 pour le GPL et 8 pour le gaz naturel dont 2 sont des gazoducs intercontinentaux reliant l'Algérie à l'Europe [3].

Du fait un pays producteur de pétrole et de gaz, l'Algérie, fait et sera appelée à faire face à l'augmentation croissante de la demande nationale en produits énergétiques et devra honorer ses engagements internationaux en lançant un ambitieux programme d'extension de son réseau de transport. La longueur totale de ce dernier, sera portée à 21 500 km à l'horizon 2012, soit une augmentation de 5 300 kilomètres, représentant les tronçons qui vont alimenter les deux (02) gazoducs qui relieront directement l'Algérie à l'Europe : [3].

- 1- le premier vers l'Italie (via la Tunisie) en traversant la Sardaigne appelé Gazoduc Enrico Mattei (GEM) ;
- 2- le second vers l'Espagne (via le Maroc) appelé Gazoduc Pedro Duran Farel (GPDF)

## **2.2. Avantages et Inconvénients du transport par canalisations**

### **2.2.1. Avantages**

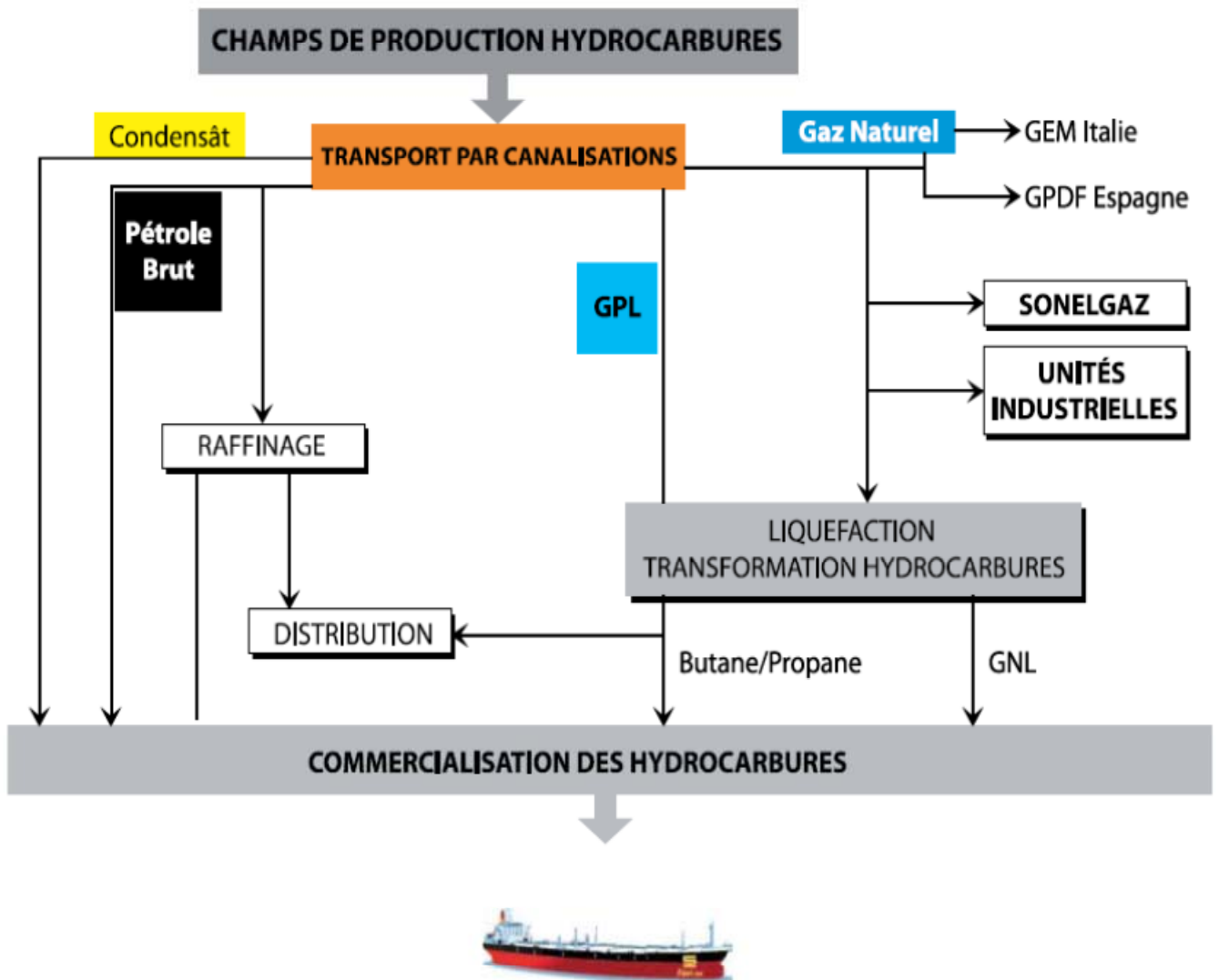
Parmi les avantages de ce type de transport on peut citer :

- C'est un moyen adapté pour les produits liquides et gazeux.
- La faible nuisance au sol de la conduite, ce qui lui donne un atout de poids dans les considérations actuelles (écologiques, et sécuritaire) ;
- L'énergie à dépenser est relativement faible puisqu'il n'y a pas de déplacement du contenant et pas de retour à vide ;
- Son transport hautement spécialisé se prête particulièrement bien à la mise en œuvre des techniques d'automatisme et autorise de ce fait une exploitation à effectif de personnel spécialement réduit ;
- Les charges d'extrémités sont réduites, la conduite évitant la rupture de charge ;
- Les quantités d'hydrocarbures transportées sont beaucoup plus importantes qu'avec d'autres moyens.

### **2.2.2. Inconvénients**

Parmi les inconvénients:

- Son investissement initial est très lourd car le seul échelonnement dans le temps porte sur des stations relais et que, de ce fait, la conduite se trouve pénalisée, notamment dans les périodes où le loyer est élevé ;
- Par sa nature, la conduite est géographiquement rigide et les courants de trafic doivent se maintenir sur une longue période ;
- Par vocation l'affectation est unique et la mutation quasiment impossible.



**Figure I.1 : Schéma De Principe De L'exploitation Des Hydrocarbures En Algérie**

### **3. GENERALITES**

#### **3.1. Définitions**

##### **3.1.1. Hydrocarbures :**

Composés chimiques dont les éléments constitutifs sont exclusivement l'hydrogène et le carbone. Les hydrocarbures sont gazeux, liquides ou solides à la température ordinaire suivant la grosseur de leurs molécules, les plus petites étant celles du gaz naturel, les moyennes celles des combustibles liquides, des huiles de graissages et les plus grosses celles du bitume.

##### **3.1.2. Réservoir :**

Formation géologique poreuse et perméable (zone de gisement) où sont accumulés les hydrocarbures, caractérisée par un système de pression unique telle que la production d'hydrocarbures d'une partie de réservoir affecte la pression du réservoir tout entier. Le réservoir peut comporter plusieurs couches productrices successives séparées par des couches stériles.

##### **3.1.3. Gisement :**

Aire géographique dont le sous-sol est constituée par un ou plusieurs réservoirs empilés qui accueillent une accumulation naturelle de matières minérales susceptibles d'être exploitées.

##### **3.1.4. Puits :**

Trou pratiqué dans le sous-sol, servant essentiellement à explorer et exploiter le pétrole. Selon le but de création de ces puits on distingue :

- Les puits d'exploration : forés dans le but de chercher un gisement d'hydrocarbures ;
- Les puits d'appréciation : forés pour évaluer les caractéristiques d'un gisement ;
- Les puits de production : ce sont les puits qui produisent des hydrocarbures ;
- Les puits d'injection : qui servent à injecter de l'eau ou du gaz afin de maintenir la pression ou remettre en pression un gisement
- Les puits éruptifs : ce sont les puits qui produisent du pétrole sans pompage, sous l'effet de la pression interne du gisement, quelle soit naturelle ou artificielle.

##### **3.1.5. Forage :**

L'ensemble des opérations qui consistent à pénétrer dans le sous-sol à l'aide d'outils appropriés, pour des études géologiques, ou pour l'extraction de fluides contenus dans les terrains traversés. Désigne également le trou résultant de l'opération de forage. On peut en distinguer plusieurs types : Forage à l'air, forage à percussion, forage au câble, forage au diamant, forage dirigé, forage Rotary.

### **3.1.6. Champ Pétrolifère :**

Zone pétrolifère d'étendue variable donnant lieu à la production d'hydrocarbures naturels, constituant une seule entité géologique, structurale et stratigraphique. Un champ peut comprendre un seul gisement ou plusieurs gisements voisins.

### **3.1.7. Champ de production :**

Se dit d'un gisement et l'ensemble de ses installations de production, de traitement et d'évacuation.

### **3.1.8. Gaz Naturel :**

Mélange d'Hydrocarbures gazeux (méthane, éthane, propane, butane, pentane).

### **3.1.9. Gazoduc :**

Canalisation destinée au transport d'un gaz (houille ou naturel). En anglais on parle souvent de '*Natural Gas Pipeline*'.

### **3.1.10. Kérogène :**

Composant organique rocheux formé par la dissociation des restes enfouis de végétaux et d'animaux. La chaleur et la pression souterraine peuvent « cuire » le kérogène et le transformer en pétrole.

### **3.1.11. Le Pétrole Brut :**

Pétrole tel qu'il est extrait d'un gisement. Sa composition est variable d'un gisement à l'autre, mais, en dehors des impuretés, se limite toujours au carbone et à l'hydrogène combinés sous la forme de nombreux et divers d'hydrocarbures : paraffines (méthane, éthane, propane, etc.) oléofines (éthylène, propylène, etc), aromatiques (benzène, toluène, etc).

### **3.1.12. Condensât :**

Les condensats sont un type de pétrole léger : il s'agit des hydrocarbures qui, gazeux dans le gisement, se condensent une fois refroidis par la détente en tête de puits.

Se dit également des gaz naturels liquéfiés utilisés comme charges en raffinage du pétrole.

### **3.1.13. Baril**

Volume de pétrole brut égal à 158,9 litres aux conditions normales de pression et de température. Il représente une unité de volume utilisée couramment dans l'industrie du pétrole, en particulier aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne.

### **3.1.14. Oléoduc**

Canalisations permettant l'acheminement par pompage de pétrole brut.

### **3.1.15. Pipeline**

Désigne la ligne de tubes dans laquelle s'écoule l'hydrocarbure liquide (pétrole et produits pétroliers) et les installations nécessaires à l'exploitation (station de pompage, bacs intermédiaires, réseau de transport, gare de racleurs, etc.).

*Nb : Le premier pipeline fut construit en 1865 en Pennsylvanie par Samuel Van Sykel. Treize ans plus tard dans le même état Américain, se fit la mise en service d'un autre pipeline de six (06) pouces de diamètre et qui assurait un débit journalier de 10 000 barils de pétrole brut.*

### **3.1.16. Raffinerie :**

Installation industrielle dans laquelle le pétrole brut est traité (raffiné) pour être transformé en produit utilisable.

### **3.1.17. Gravité API**

Ce terme est une approche du poids spécifique du pétrole brut selon la classification de l'American Petroleum Institute. La gravité API se définit comme :

141,5 – 131,5/ densité d'un brut donné à 15,6 °C. Ainsi, plus la gravité API est élevée, plus le brut est léger.

## 3.2. PETROLE

### 3.2.1. Définition

Le mot « Pétrole » est issu de deux mots latins « *petra* » et « *oleum* » et signifie littéralement « huile de pierre ». Dès l'antiquité, il pouvait être utilisé comme revêtement étanche, médicament miracle ou arme de guerre. Il était repéré au Moyen-Orient et dans d'autres parties du monde quand il suintait à la surface du sol. [4]

Depuis le forage du premier puits destiné à la production de pétrole par le « colonel Drake » en 1859 près de Titusville (Pensylvannie), le pétrole est devenu le véritable vecteur de la révolution industrielle. Dès les années 1950, il constitue la première source d'énergie dans le monde après avoir détrôné le charbon.

### 3.2.2. Composition des pétroles bruts

Les pétroles bruts se présentent sous la forme de liquides plus ou moins visqueux qui sont essentiellement constitués d'hydrocarbures de volatilité et de nature chimique variées (figure 2). La composition des pétroles est très variable et dépend du type de matière organique présente au moment du dépôt ainsi que de la maturité de l'huile et de son histoire géologique.

Les hydrocarbures contenus dans le pétrole brut renferment de 1 à plus de 50 atomes de carbone et présentent une large gamme de volatilité.

### 3.2.3. Etat Chimique Des Hydrocarbures

On peut les regrouper par « familles » :

- les hydrocarbures saturés ;
- les hydrocarbures naphthéniques ;
- les hydrocarbures aromatiques.

Ces familles présentent des structures moléculaires bien identifiées qui leur confèrent un certain nombre de propriétés mises à profit lors de leur utilisation en tant que produits pétroliers.

**Les hydrocarbures saturés** sont constitués de paraffines ou alcanes. Les **paraffines normales** ou **n-paraffines** forment des chaînes linéaires. Les isoparaffines renferment des chaînes branchées. Les paraffines qu'elles soient normales ou iso sont largement représentées dans les gaz naturels, les pétroles bruts et les produits pétroliers commerciaux. La structure de la chaîne des atomes de carbone leur confère toutefois des propriétés assez différentes. Les isoparaffines se distinguent des n-paraffines par leur tenue au froid et par leur comportement à la combustion dans un moteur essence ou diesel.

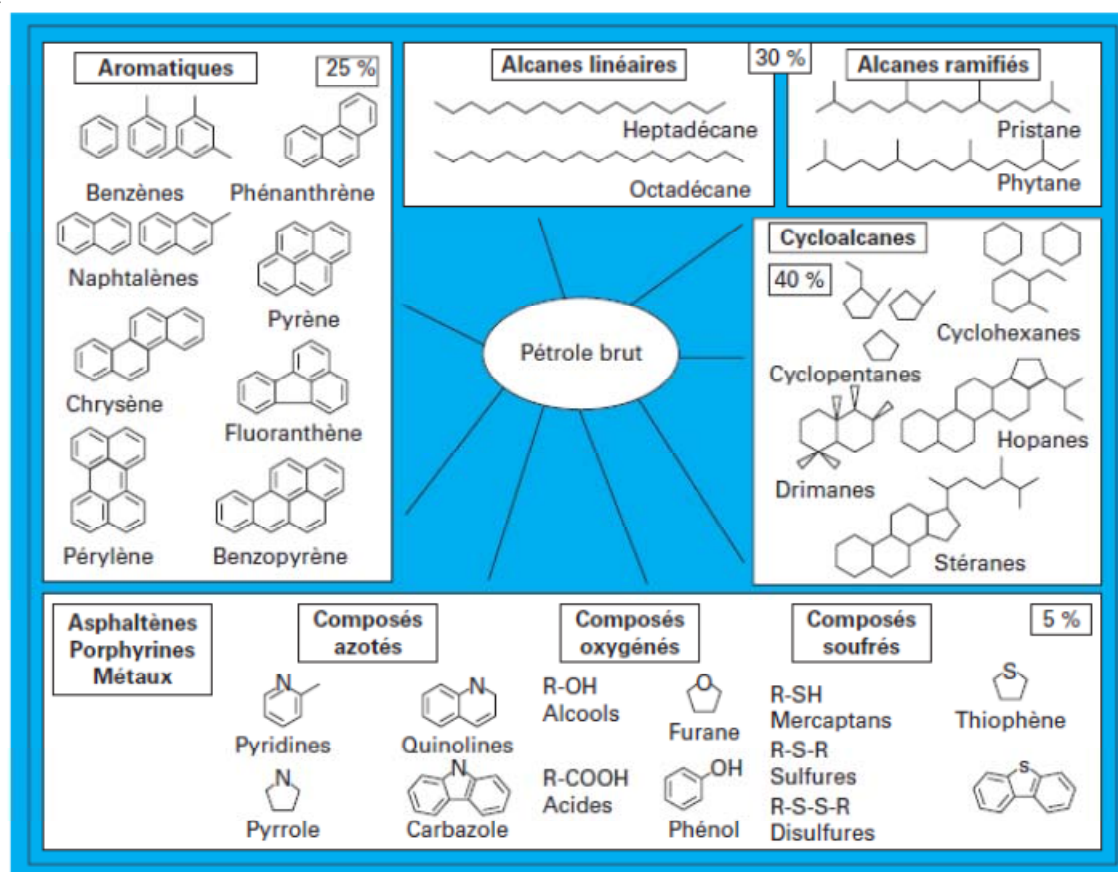
**Les hydrocarbures naphthéniques** ou cycloalcanes se caractérisent par la présence dans leur molécule de cycles saturés qui comportent le plus souvent 5 ou 6 atomes de carbone.

**Les hydrocarbures aromatiques** constituent la troisième grande famille d'hydrocarbures présents dans les pétroles bruts. Ces composés contiennent un ou plusieurs cycles benzéniques. Très appréciés dans les carburants pour moteur à essence, les aromatiques sont au contraire très néfastes à la qualité des carburants pour moteurs diesel et pour réacteurs d'avions. [4]

À noter que les acétyléniques (composés avec des triples liaisons) et les oléfines (alcènes), autres hydrocarbures insaturés, ne sont pas présents dans les pétroles bruts.

Tous ces hydrocarbures renferment en plus du carbone et de l'hydrogène (ratio hydrogène/carbone voisin de 1,85 dans l'huile brute), d'autres éléments tels que le soufre, l'oxygène, l'azote, les métaux (Ni et V) considérés comme des impuretés. Les éléments mineurs (S, N, O), constituent en général moins de 3 % de la plupart des pétroles, ils sont dans la plupart des cas contenus dans les fractions lourdes : résines et asphaltènes. [4]

Le tableau I.1 présente, à quelques exceptions près, la composition atomique type d'un pétrole brut.



**Figure I.2 : Ensemble des hydrocarbures présents dans les pétroles bruts**

Tableau I.1 - Composition massique atomique d'un pétrole brut (doc.IFP)							
C %	H %	S %	N %	O %	Métaux (%)	Eaux et sédiments (%) (1)	Sels minéraux (%)
83 a 87	10 a 14	0,05 a 6	0,1 a 2,0	0,05 a 1,5	0,005 a 0,015 (don't 75% nickel et vanadium)	0,1 a 0,6	0,002 a 0,02
(1) Pourcentage volumique.							



### 3.2.4. Etat Physique

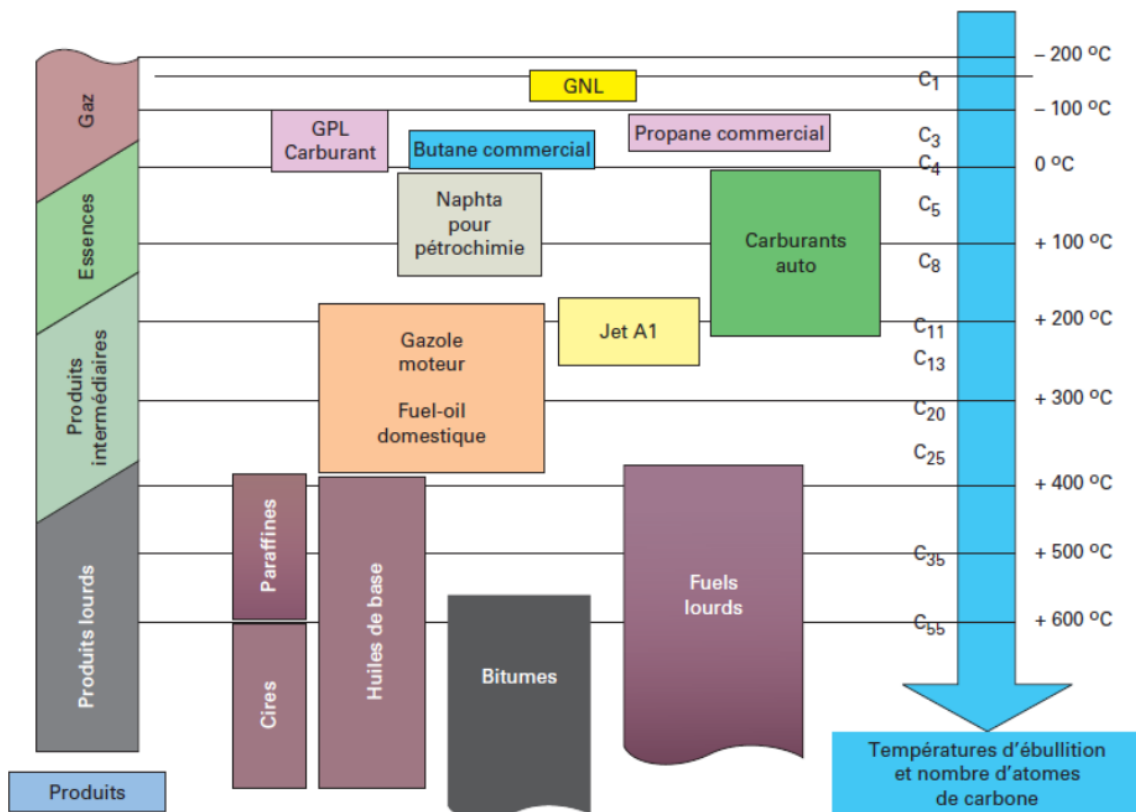
Dans les conditions normales, l'état physique des composés du pétrole varie selon la longueur de leur chaîne aliphatique. Plus la chaîne est longue, plus la masse volumique du composé est importante et plus le composé est visqueux. [4]

À pression et température ambiante, ils sont :

- à l'état gazeux quand la chaîne carbonée contient 4 atomes au plus (C1 à C4) ;
- à l'état liquide de C5 à C16 ;
- à l'état solide au-delà.

### 3.2.5. Produits Pétroliers

Chaque produit pétrolier doit répondre à un intervalle de volatilité qui est généralement imposé par ses conditions d'utilisation. À chaque produit pétrolier correspond une gamme de volatilité des hydrocarbures qui le composent comme le montre la figure I.3.



**Figure I.3 : Différentes Coupes Pétrolières**

On regroupe les produits pétroliers en trois grandes catégories :

- Les produits légers ; gaz de pétrole liquéfiés (GPL : butane et propane), carburants auto (essences) et naphtha pour la pétrochimie ;
- Les produits intermédiaires : Jet A1 (aviation), gasoil moteur et fuel-oil domestique (FOD) ;
- Les produits lourds : fuels lourds industriels, bitumes, bases pour lubrifiants.

### 3.2.6. Origine et Formation du Pétrole Brut

Le pétrole doit son existence à l'enfouissement puis à la transformation de la matière organique issue de végétaux et de micro-organismes. Sa formation peut être décrite au travers de plusieurs étapes et dure des millions d'années. [4]

#### 1. Diagenèse et formation du kérogène

Sous l'action des bactéries, de la montée en température et en pression, dans des milieux pauvres en oxygène, les sédiments et la matière organique qu'ils contiennent sont soumis à une étape importante pour la formation du pétrole appelée diagenèse. Cette diagenèse est marquée par la consolidation sédimentaire, la production de méthane biogénique, la transformation de la matière organique en kérogène et l'incorporation du soufre. Elle implique la conversion des lipides, protéines et carbohydrates, et de la lignine pour former le Kérogène qui est un mélange de macromolécules constitué de noyaux cycliques condensés liés par des liaisons chimiques. La diagenèse se déroule classiquement à une profondeur inférieure à 1 000 m, et à une température inférieure à 50 °C.

#### 2. Genèse du pétrole et accumulation dans les réservoirs

##### 2.1. Formation du pétrole

À l'issue de la diagenèse, la roche mère et le kérogène qu'elle contient continuent à s'enfouir typiquement à la vitesse de 50 m par million d'années. [4]. Ils supportent un accroissement en température de 25 à 30 °C et de 20 à 30 bars par kilomètre en pression. Quand la roche mère atteint une profondeur et une température plus élevée (environ 100°C), cela conduit à un craquage thermique et un réarrangement progressif du kérogène. Un premier craquage aboutit à la formation du bitume puis un second à la formation du pétrole.

Quelques hydrocarbures se forment aussi directement à partir du kérogène. L'intervalle de profondeurs où la roche mère produit des hydrocarbures liquides s'appelle la « **fenêtre à huile** », c'est l'étape de la **catagenèse**. [4] Pendant la catagenèse, on observe une génération continue de gaz humides (gaz hydrocarbures contenant 1 à 5 atomes de carbone) parallèlement à la formation du pétrole.

Pour produire du pétrole en quantités significatives, ce processus doit agir sur la matière organique pendant des millions, voire des dizaines de millions d'années, car il s'agit d'un processus cinétique. Le phénomène impliqué est celui du « craquage » qui, sous l'action de l'énergie thermique, se traduit par la rupture de liaisons chimiques produisant des espèces

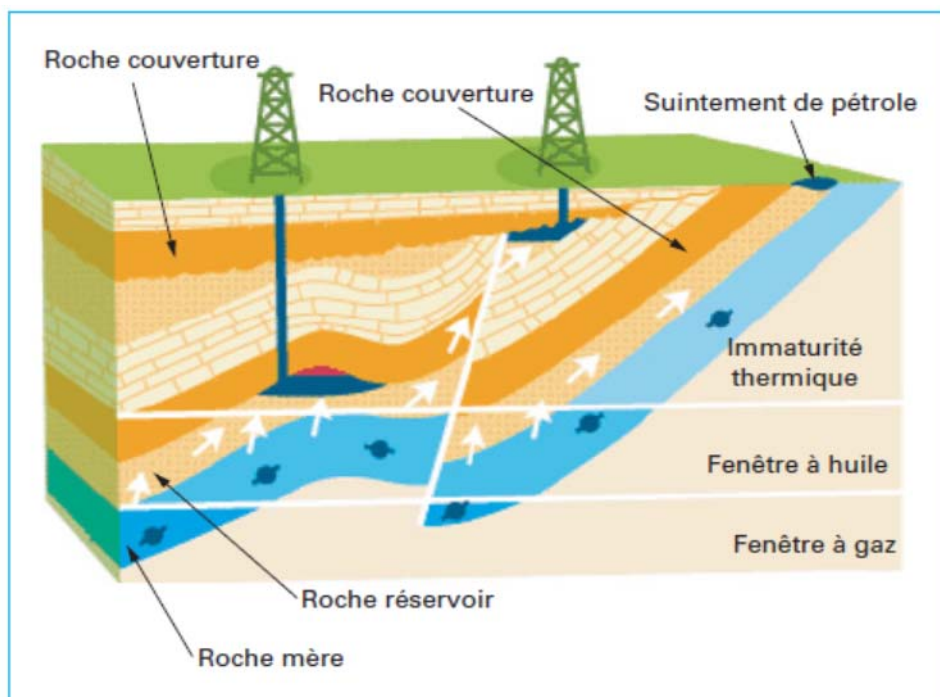
chimiques de tailles de plus en plus petites : les macromolécules caractérisant la matière organique initiale « **solide** » sont scindées en des molécules plus petites constituant un liquide, le **pétrole**, et la température augmentant, celles-ci sont elles-mêmes réduites en des molécules encore plus petites constituant le **gaz**.

Pendant la catagenèse, on observe une prédominance des hydrocarbures de masses moléculaires moyennes à basses.

## 2.2. Migration du pétrole

Lorsque la température et l'enfouissement continuent de croître, les productions d'huile et de gaz augmentent et permettent de développer un réseau continu entre les gouttelettes de micro-pétrole grâce à la différence de pression entre la roche mère et le drain. Les hydrocarbures sont alors expulsés de la roche mère vers des roches de porosité et de perméabilité supérieure, indifféremment vers le haut ou vers le bas, lors de la migration primaire.

Au cours de la migration « secondaire », le pétrole et le gaz ainsi expulsés de la roche mère se déplacent d'une manière ascendante en raison de leur masse volumique plus faible que celle de l'eau (poussée d'Archimède) les conduisant progressivement vers la surface du bassin en suivant le système de drains, et cela jusqu'à ce qu'ils rencontrent éventuellement un piège où ils vont s'accumuler et créer un gisement de pétrole (*figure 1.4 ci-dessous*). Un piège est constitué d'une roche « réservoir » et d'une « roche couverture ».



***Figure 1.4 : Schéma d'un système pétrolier simple (doc. IFP)***

### 2.3. Roche réservoir

La **roche réservoir** est caractérisée par une porosité et une perméabilité permettant à la fois l'accumulation de quantités importantes de pétrole mais aussi une aptitude à la mobilité. De ce point de vue, un grès composé de gros grains arrondis de taille plus ou moins uniforme est une roche réservoir idéale. Si les grains sont de taille variable, la roche sera moins poreuse et sa perméabilité probablement plus faible. Il s'agit de roches dont la porosité se situe dans une gamme large qui peut aller de 5 % à 30 % du volume de la roche alors que la perméabilité s'étend typiquement de 0,005 darcy à quelques darcys. Les roches fracturées (roche réservoir) ou les failles, qui recoupent les séries sédimentaires en les déplaçant, peuvent également jouer le rôle de drains pour les fluides pétroliers. [4]

**Nota :** le darcy (D) est une unité de perméabilité.  $1D = 9,87 \times 10^{-13} m^2$ .

### 2.4. Roche couverture

La **roche couverture** doit se situer à l'aplomb des drains. C'est une roche non perméable aux hydrocarbures (argile, sel massif, anhydrite...) et avec une géométrie en trois dimensions, permettant à une quantité importante de pétrole de s'y accumuler. [4]

### 2.5. Pièges

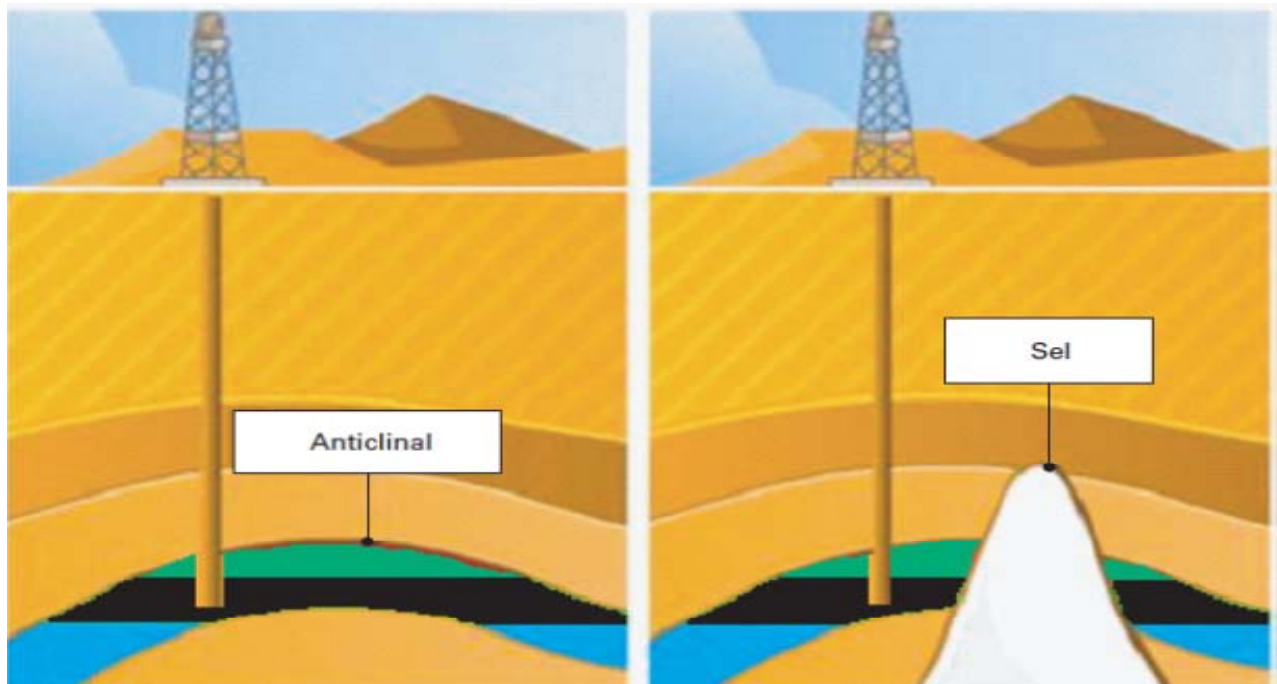
On distingue deux grands types de pièges (figureI.5) : [4]

1. Les pièges structuraux (dôme, anticlinal allongé, piège sur faille, dôme de sel) qui sont constitués par des déformations souples (plis) ou cassantes (failles) des roches ;
2. Des pièges stratigraphiques (variation de faciès, lentilles, biseaux) qui mettent en jeu la nature des roches.

Les dômes de sels sont des structures géologiques particulières qui combinent souvent les deux types de pièges car elles présentent un environnement avec des variations stratigraphiques importantes et causent des déformations notables aux roches encaissantes.

Le pétrole et le gaz non retenus par des pièges ou s'échappant de pièges, dont la couverture est insuffisamment étanche, finiront par atteindre la surface. Ces suintements (indices de surface) se rencontrent dans la plupart des provinces pétrolières où les phénomènes naturels de formation et de migration du pétrole sont actuellement actifs et sont une indication sur la possible présence en profondeur d'un gisement. Dans certains cas, cette arrivée de pétrole à faible profondeur aboutit à la mise en place d'énormes accumulations superficielles imprégnant les roches affleurantes. [4]

Les huiles qui atteignant ainsi la surface ou qui s'accumulent à de faibles profondeurs sont dégradées par des bactéries, ce qui les rend très visqueuses. C'est ce phénomène d'altération par les bactéries à faible profondeur, transformant le pétrole fluide en pétrole visqueux et en bitume qui est à l'origine des réserves de « pétrole lourd » encore appelé «pétrole non conventionnel» de la planète. [4]



***Figure 1.5 : Principaux types de pièges à hydrocarbures***



### 3. Qualité du Pétrole Brut

Il existe autant de qualités de pétrole qu'il y a de puits de pétrole dans le monde. En effet, chaque poche de pétrole a des caractéristiques qui lui sont propres et qui sont dues à l'histoire géologique de la formation du pétrole de cette poche en particulier.

Néanmoins, le pétrole est classifié suivant ses composants majoritaires et la mesure de sa viscosité par la gravité API (du nom de "[American Petroleum Institute](#)"). [4]

Ainsi un pétrole est :

1. Léger ("light") si le degré API est supérieure à 31,1 ;
2. Moyen ("medium") s'il est compris entre 22,3 et 31,1 ;
3. Lourd ("heavy") s'il est compris entre 10 et 22,3 et extra lourd ("extra heavy") s'il est inférieur à 10.

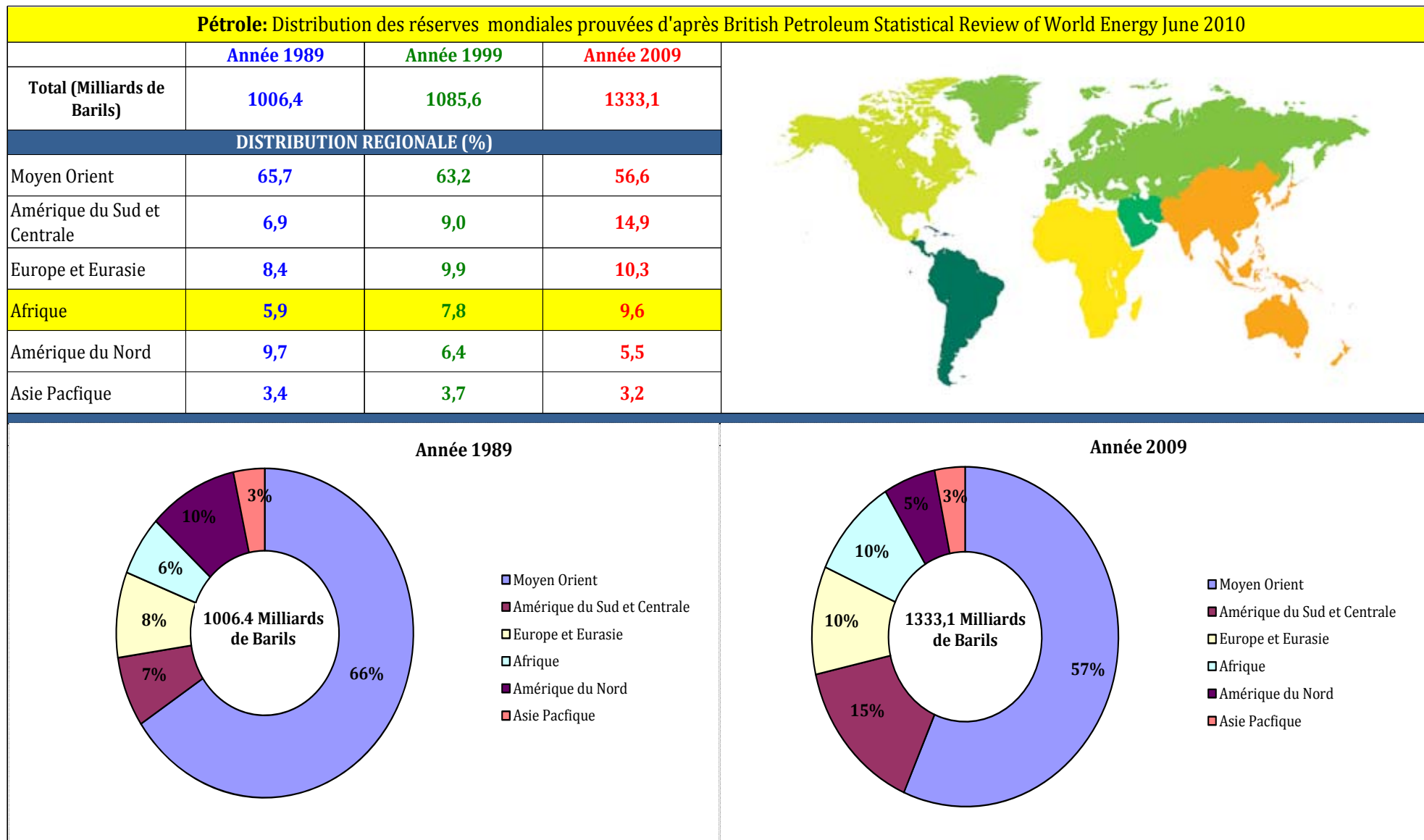
L'échelle API rend compte de la viscosité et donc de la longueur des chaînes carbonées des composés ; on en conclura que plus les chaînes sont longues, plus le pétrole est lourd et inversement.

L'exploitation de cette énergie fossile qui est le pétrole brut est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides (*fioul, gazole, kérosène, essence, GPL*) tandis que le *naphtha* produit par le raffinage est à la base de la pétrochimie, dont sont issus un très grand nombre de matériaux usuels (*plastiques, textiles synthétiques, caoutchoucs synthétiques (élastomères), détergents, adhésifs, engrais, cosmétiques, etc.*) et que les fractions les plus lourdes conduisent aux *bitumes, paraffines et lubrifiants*.

#### **4. Etat Mondial Des Réserves en Pétrole**

Sur les réserves initiales en place prouvées d'environ dix milliards deux cents millions de mètres cubes d'hydrocarbures liquides, seuls 25% d'entre elles sont considérés récupérables avec les procédés d'exploitation actuels. Plus de la moitié de ces réserves d'huile récupérables a déjà été produite (Fig.I.6). Un peu moins de 400 autres millions de mètres cubes d'huile sont aujourd'hui considérés comme réserves probables et possibles.

Les réserves en hydrocarbures découvertes en Algérie à ce jour sont renfermées dans un peu plus de 200 gisements d'huile et de gaz, dont 73 sont situés dans le bassin d'Illizi, 57 dans les bassins du Sahara Central, 34 dans les bassins de Ghadamès – Rhourde Nouss, et 31 dans le bassin de Oued Mya.



**Figure I.6 : Distribution des Réserves Mondiale en Pétrole 1989 – 2009**

## **4. PRESENTATION DU CHAMP PETROLIER DE HASSI BERKINE**

### **4.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN DE BERKINE**

Le bassin de Berkine est situé dans la partie nord de la plateforme saharienne de l'Algérie, à 320 km au Sud-Est de la ville pétrolière de Hassi Messaoud et 1200 km au Sud-Est d'Alger. [5]

Il est limité par:

- Les frontières Tunisiennes et Libyennes à l'est ;
- Le Bassin d'Ilizi au sud ;
- Le Dôme de Dahar au nord ;
- et la ville de Hassi-Messaoud à l'ouest.

Non loin de ce bassin, soit à 40 km, se trouve le champ d'Ourhoud, l'un des plus grands et des plus importants gisements miniers découverts durant la dernière décennie. [5]

### **4.2. HISTORIQUE DU BASSIN DE BERKINE**

Dans les années 80 l'état Algérien a décidé de mettre le paquet sur la région de Hassi Berkine qui a alors connu une grande métamorphose. Des blocs ont été accordés à des entreprises étrangères dans le cadre de la loi 1986-14, amendée en 1991 et qui a été à l'origine d'un véritable rush des compagnies pétrolières opérant en Algérie. C'est dans ce contexte qu'est née l'association Sonatrach-Anadarko et le groupement Berkine pour l'exploitation des gisements de ce bassin. [5]

Ce groupement (51% SH 49%Anadarko), constitué de cadres et de techniciens provenant des deux compagnies est chargée de la conduite de toutes les opérations pétrolières de l'association Anadarko Sonatrach à l'exception du gisement d'Ourhoud (ORD). [5]

Le groupement de Berkine est notamment chargé de l'exploitation du centre de production de Hassi Berkine Sud (HBNS) phase1, de la réalisation du projet d'extension du HBNS phase 2, du développement de Hassi Berkine (HBN), du développement des champs satellites du bloc 404 et enfin du développement des gisements du bloc 208.

La phase 1 de HBNS a démarré en mai 1998. Elle a été réalisée au départ pour une capacité design de 60 000 bbl/j mais elle a fini par donner plus de 75 000 bbl/j. [5]

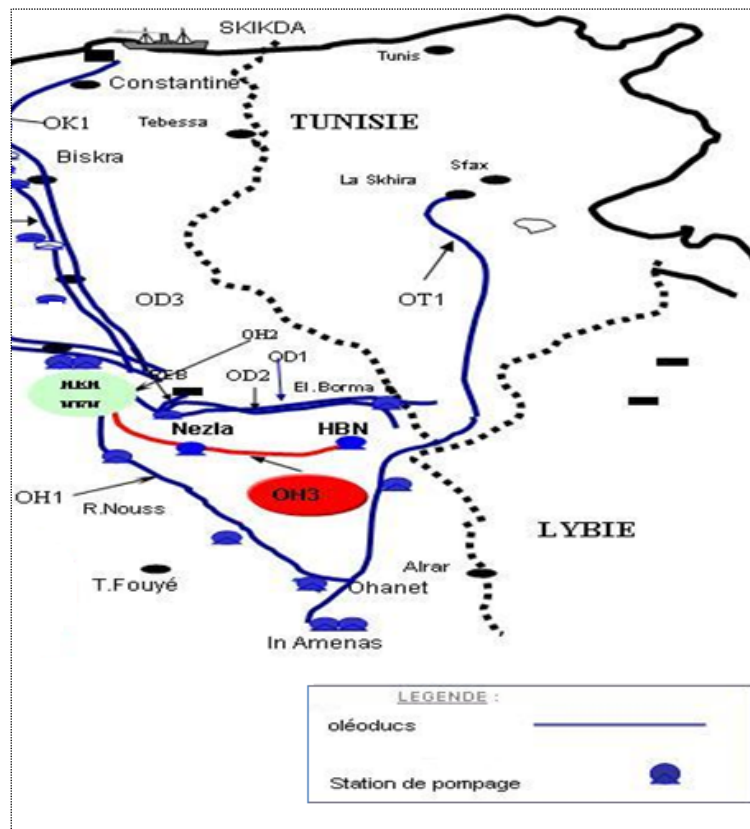
### **4.3. Présentation Des Installations Existantes :**

Notre travail portera essentiellement sur l'oléoduc OH3 dans l'optique d'étudier sa capacité de transport face à l'augmentation de la production de brut dans le bassin de Berkine et proposer des solutions en ce sens. [5]



### 4.3.1. L'oléoduc OH3

L'oléoduc OH3 a été mis en service en 1995 par la branche production de SONATRACH (DP) pour l'acheminement de 16 MTA de pétrole brut directement des champs pétroliers de Hassi Berkine vers Haoud El Hamra à 30 Km de Hassi Messaoud dans la Wilaya de Ouargla. La position géographique de l'oléoduc est représentée par la figure I.7 ci-dessous.



**Figure I.7 : Position géographique de l'oléoduc OH3**

Plusieurs champs envoient leur pétrole à travers cet oléoduc, certains passent par la station de pompage de Hassi Berkine et d'autres, placés en cours de trajet y injectent leur pétrole directement.

Les champs qui acheminent leur pétrole à travers l'OH3 sont :

- Hassi Berkine Sud (HBNS),
- Menzel ledjmet Nord,
- Hassi Berkine Nord, et Nord Est,
- Hassi Berkine Sud-Est et Rhourde Berkine,
- Qobba Nord,
- Ourhoud,
- Bir Berkine et Bir Berkine Nord,
- El Merk Nord et El Merk Est,
- Menzel ledjmet nord centre et Menzel ledjmet nord-ouest,
- Menzel ledjmet Nord 3/6, Menzel ledjmet sud-est et Menzel ledjmet Ouest

Après la découverte de nouveaux champs dans cette zone et l'augmentation de la production qui a atteint 22,91 MTA ce qui correspond à 550 000 bbl/jour (presque la moitié de la production nationale qui est de 1 200 000 bbl/jour [5], ce pipeline a été donné à la branche transport par canalisations pour évacuer la quantité importante de brut en construisant des stations de pompages.

L'OH3 démarre du Centre de Stockage et de Transport de Hassi Berkine (CSTH) acheminant du pétrole Brut vers Haoud el Hamra sur un linéaire total de 295 Km. [6]

Le OH3 a un diamètre nominal de 30" soit 762mm et une épaisseur de 10,31mm, il a été conçu en acier de type API 5LX 52 S.A.W. [6]

#### 4.3.2. Centre de Stockage et de Transport Hassi Berkine (C.S.T.H)

Le C.S.T.H situé à 300Km de Hassi Messaoud dans la Wilaya de Ouargla (1200 Km d'Alger), à l'extrême Est de l'Algérie, réceptionne le pétrole des deux principaux champs Hassi Berkine Sud (HBNS) et Ourhoud, et l'achemine vers Haoud El Hamra (HEH). Pour cela le centre dispose de : [6]

- ✓ Un système de comptage à l'entrée de la station pour mesurer le volume, la température, la pression, et la densité du brut réceptionné et transfère automatiquement les données à la salle de contrôle, pour le moment seul le brut provenant du champ d'Ourhoud passe par ce système Un second système est prévu pour le champ de HBNS.
- ✓ Six bacs de stockage à toit flottant de 16m de hauteur et 61m de diamètre, pouvant contenir 41000 m<sup>3</sup> chacun.
- ✓ Un bac de détente de 3000 m<sup>3</sup> où est transféré le brut récupéré du sloap (un système qui permet de récupérer le brut des eaux huileuses purgées des bacs).
- ✓ Quatre pompes Booster reliées en parallèle dont deux en stand-by qui permettent d'élever la pression à l'aspiration des pompes principales de (1 à 7 bars), pour éviter le problème de cavitation des pompes principales
- ✓ Cinq électropompes principales reliées en parallèle dont deux en stand-by fonctionnant sous une tension de 5000Volts et ont une puissance de 2,13 MW chacune permettant d'évacuer un débit nominal de 1100m<sup>3</sup>/h pour une pression de 61 bars.
- ✓ Une sous-station électrique qui permet de baisser la tension de 30'000Volts à 5'000 Volts pour alimenter les pompes principales et à 400Volts pour les besoins des pompes anti-incendie du système de climatisation.
- ✓ Une ligne électrique aérienne d'Ourhoud au CSTH ;
- ✓ Un système de manifold (un jeu de vannes) qui permet le dispatching du brut à travers la station (des champs vers les bacs à travers les conduites d'arrivées, de bac à bac à travers

les conduites de transfert, des bacs vers la sortie en passant par les pompes à travers la conduite d'expédition).

Pour assurer la sécurité, la station est équipée d'un réseau anti-incendie se composant de :

- ✓ Deux réservoirs d'eau à toit fixe de 12'000 m<sup>3</sup> chacun, alimentés en permanence par un puits situé à l'entrée de la station
- ✓ Le réseau de lutte anti-incendie est maintenu à pression constante grâce à deux pompes Jockey ;
- ✓ Des gicleurs du type à déclenchement automatiquement sont placés au-dessus de chaque pompe principale et au-dessus de chaque pompe Booster.
- ✓ D'un système de refroidissement qui permet de réduire la température des parois des bacs et empêcher une probable explosion due à une température trop élevée ;
- ✓ De quatre lances à incendie pour chaque bac.
- ✓ De deux pompes électriques principales qui se déclenchent automatiquement en cas d'incendie ;
- ✓ De deux pompes principales diesels qui se déclenchent automatiquement en cas de coupure de courant.
- ✓ De bouches d'incendies distribuées dans toute la station selon leur rayon d'action, afin que chaque point de la station soit couvert par la protection anti incendie.

Toutes les opérations sont contrôlées au niveau de la salle de contrôle grâce à un système de télécommande et télé contrôle géré par des ingénieurs qui travaillent 24h/24h, 7j/7j et des opérateurs qui vérifient le bon déroulement des opérations sur site.

#### **4.3.3. La Station De Pompage Intermédiaire NEZLA**

Elle se situe à 150 Km de HBN à mi-parcours entre HBN et HEH, elle dispose de : [6]

- ✓ Cinq électro-pompes principales munies chacune d'un variateur de vitesse ;
- ✓ Un bac de détente ;
- ✓ Une sous-station électrique ;
- ✓ Un système de télécommande et de télé contrôle ;
- ✓ Une ligne électrique aérienne de Nezla.

**CHAPITRE II**

**MODELE MATHEMATIQUE REGISSANT**

**L'ECOULEMENT DU PETROLE BRUT DANS**

**LES PIPELINES**

Le but de ce chapitre est d'étudier et analyser le mouvement du pétrole brut dans les conduites et établir ainsi le modèle mathématique de l'écoulement de ce fluide dans les pipelines qui est à l'origine du dimensionnement des installations de transport des hydrocarbures liquides.

Pour ce faire, on devra employer les principes de la dynamique des fluides. Ceci consiste à déterminer en chaque point de la masse fluide, en fonction du temps, de la température, et des forces agissantes sur les particules fluides, la vitesse de l'écoulement  $V$ , est définie par ses trois composantes  $(u,v,w)$ , la pression  $P$ , et le débit  $Q$ , à partir des équations de la dynamique des fluides incompressibles.

## 1. EQUATION DE CONTINUTE (CONSERVATION DE LA MASSE)

Pour notre étude, l'écoulement est supposé incompressible, stationnaire et axisymétrique. Le fluide est mis en mouvement par l'effet de la différence de pression statique imposée aux extrémités du conduit. L'écoulement est considéré comme turbulent.

Les équations de conservation de la masse s'écrivent alors sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{V} = 0 \quad (1)$$

## 2. EQUATION DE LA CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT

Sous les mêmes hypothèses que celles du point I, l'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit sous la forme suivante :

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \text{grad} \vec{V} \right) = \text{div } \rho \quad (2)$$

Pour le cas étudié dans ce chapitre, il convient d'utiliser pour la mise en équations, les coordonnées cylindriques. L'équation de conservation de la masse s'écrit alors :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Avec : 
$$\frac{1}{r} \frac{\partial \rho r V_r}{\partial r} = \frac{\rho V_r}{r} + \frac{\partial \rho V_r}{\partial r} \quad (*)$$

L'équation (3) devient :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} + \frac{\rho V_r}{r} = 0 \quad (4)$$

(4) : Equation de continuité pour un écoulement d'un fluide incompressible dans un conduit cylindrique.

Considérons la direction  $z$  définie par l'axe de symétrie du conduit, et écrivons l'équation générale instantanée de conservation de la quantité de mouvement.

$$\rho \frac{dV_z}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \Delta V_z$$

L'écriture de cette équation sous la forme conservative donne :

$$\frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_r V_z}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{\rho V_\theta V_z}{r} \right\} + \frac{\partial \rho V_z^2}{\partial z} + \frac{\rho V_\theta V_z}{r} = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right\} \quad (5).$$

(5) : Equation de conservation de la quantité de mouvement pour un écoulement d'un fluide incompressible dans un conduit cylindrique.

### 3. ETABLISSEMENT DES EQUATIONS MOYENNEES

Les équations moyennées sont obtenues en appliquant la décomposition de Reynolds. Les composantes de la vitesse et de la pression sont donc décomposées en une partie moyenne et une partie fluctuante :

$$V_z = \bar{U} + u_z ;$$

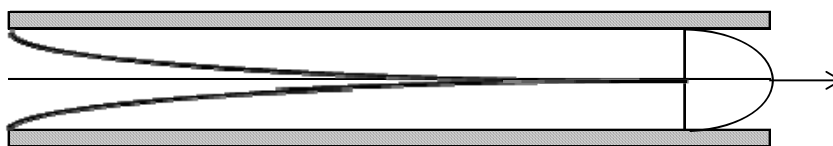
$$V_r = \bar{V} + v ;$$

$$V_\theta = \bar{W} + w$$

et  $P = \bar{P} + p.$

Si le conduit est suffisamment long, à une certaine distance du plan d'entrée, la couche limite turbulente qui se développe sur la paroi interne du conduit occupe tout l'espace disponible.

Il s'ensuit que les composantes des champs de vitesse moyens et fluctuants ne dépendent que de  $r$ .



**Figure II.1 : Développement de la Couche Limite Turbulente dans un Conduit.**

Et le champ de vitesse est tel que :  $\bar{U}(r)$  ;  $\bar{V} = \bar{W} = 0$

$\overline{uw} = \overline{vw} = 0$  et les autres tensions de Reynolds fonction de r seul.

On peut aisément montrer que les contraintes visqueuses et turbulentes calculées à partir de ces champs de vitesse n'induisent pas de forces surfaciques produisant une perte de système de l'écoulement.

Les hypothèses d'incompressibilité et de stationnarité associées à la forme des champs de vitesse moyens et fluctuants définis précédemment, permettent de réduire l'équation moyennée de conservation de la quantité de mouvement suivant z à un équilibre entre les forces de pression, les forces de viscosité et les forces induites par la turbulence : [7]

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} - \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial \bar{U}}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial r} (\rho \overline{uv}) + \rho \frac{\overline{uv}}{r} = 0 \quad (6)$$

Ce qui peut aussi s'écrire :

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} - \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial \bar{U}}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r \overline{uv}) = 0 \quad (7)$$

Suivant la même démarche et sous les mêmes hypothèses introduites précédemment, l'équation moyennée de la conservation de la quantité de mouvement selon la direction radiale, il découle de cette équation que la pression est uniforme dans la section :

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} = \frac{dP_w}{dz} \quad \text{où } P_w \text{ est la pression au niveau pariétal.}$$

En reportant ce résultat dans l'équation précédente, nous obtenons :

$$\frac{dP_w}{dz} - \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial \bar{U}}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r \overline{uv}) = 0 \quad (8)$$

En multipliant les deux membres de cette équation par r, puis en intégrant entre 0 et r (i.e. de l'axe au point M considéré) :

$$\frac{1}{2} r^2 \frac{dP_w}{dz} - \mu r \frac{\partial \bar{U}}{\partial r} + \rho r \overline{uv} = 0 \quad (9)$$

En divisant par r et puis en introduisant le changement de variable :  $y = R - r$

Où y caractérise la distance normale du point considéré à la paroi. Dans ce nouveau repère l'équation (9) s'écrit :

$$\frac{1}{2}r \frac{dP_w}{dz} - \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \rho r \overline{u'v'} = 0 \quad (10)$$

On déduit directement l'expression de la contrainte de cisaillement à la paroi en fonction du gradient longitudinal de pression :

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = \frac{1}{2}R \frac{dP_w}{dz} \quad (11)$$

Cette dernière expression s'exprime couramment en grandeurs adimensionnelles.

#### 4. COEFFICIENT DE FROTTEMENT ET COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE

On introduit usuellement le coefficient de frottement et le coefficient de perte de charge comme suit : [7]

- le coefficient de frottement :  $C_f = \frac{\tau_p}{P_{ref}}$

- le coefficient de perte de charge :  $\lambda = -\frac{D}{P_{ref}} \frac{dP_w}{dz}$

Où :

D représente le diamètre du conduit.

✓  $P_{ref}$  est généralement défini par :  $P_{ref} = \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$

✓  $U_{ref}$  est la vitesse moyenne débitante :  $U_{ref} = \frac{2\pi}{S} \int_S U(r) dr$

En reportant ces expressions dans la relation donnant la contrainte de cisaillement à la paroi, nous obtenons :

$$C_f = \frac{\lambda}{4} \quad (12)$$

Cette dernière relation qui relie linéairement le coefficient de frottement au coefficient de perte de charge permet une caractérisation 'macroscopique' des écoulements laminaires ou turbulents se développe dans les conduites. Le coefficient de perte de charge est usuellement relié au nombre de Reynolds au travers de relations empiriques telles que :

✓ Pour les écoulements laminaires :  $\lambda = \frac{64}{Re}$

✓ Pour les écoulements turbulents en conduites hydrauliquement lisses :



✓  $\lambda = 0,3164 Re^{-\frac{1}{4}}$  \_\_\_\_\_ **formule de Blasius.**

Le nombre de Reynolds, rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité caractéristiques de cet écoulement en conduite, est calculé par la relation :

$$Re = \frac{\rho U_{ref} D}{\mu} = \frac{U_{ref} D}{\nu}$$

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  : viscosité cinématique (m<sup>2</sup>/s).

Selon la valeur du nombre de Reynolds, deux cas sont à considérer

1<sup>er</sup> cas :  $Re < 2300$  Ecoulement Laminaire ;

2<sup>nd</sup> cas :  $Re > 2300$  Ecoulement Turbulent.

On introduit alors la notion de longueur d'entrée ou longueur d'établissement du régime d'écoulement,  $l_e$ , distance au bout de laquelle la couche limite laminaire ou turbulente se rencontre.

Cette valeur dépend de nombreux facteurs, tels que le régime de l'écoulement ou la forme du profil des vitesses à l'entrée du conduit et est donnée par la relation suivante :

✓  $l_e = 0,02 \frac{D^2 U_{ref}}{\nu}$  en régime Laminaire ;

✓  $l_e = 1,5 \sqrt[4]{Re}$  en régime Turbulent ;

L'hypothèse de l'écoulement uniforme et permanent ne peut donc être valable qu'à une distance supérieure à la longueur d'établissement  $l_e$ , mais comme celle-ci est généralement petite vis-à-vis de la longueur du conduit, cette restriction est négligée en pratique.

## 5. ZONE LOGARITHMIQUE ET SOUS COUCHE VISQUEUSE

Ces relations empiriques permettant d'évaluer le coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds, mettent en évidence que à nombre de Reynolds égal, la perte de charge est largement supérieure dans le cas turbulent que dans le cas laminaire.

On s'intéresse maintenant au comportement de l'écoulement dans la couche limite turbulente.

On introduit usuellement pour cela de nouvelles grandeurs caractéristiques bien adaptées à la caractérisation de la région proche de la paroi :

✓ La vitesse de frottement définie par :  $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}}$

✓ L'échelle de longueur :  $l_+ = \frac{\nu}{U_\tau}$

On définit les variables adimensionnelles suivantes : [7]

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau}; \quad y^+ = \frac{y}{l_+} = \frac{yU_\tau}{\nu}.$$

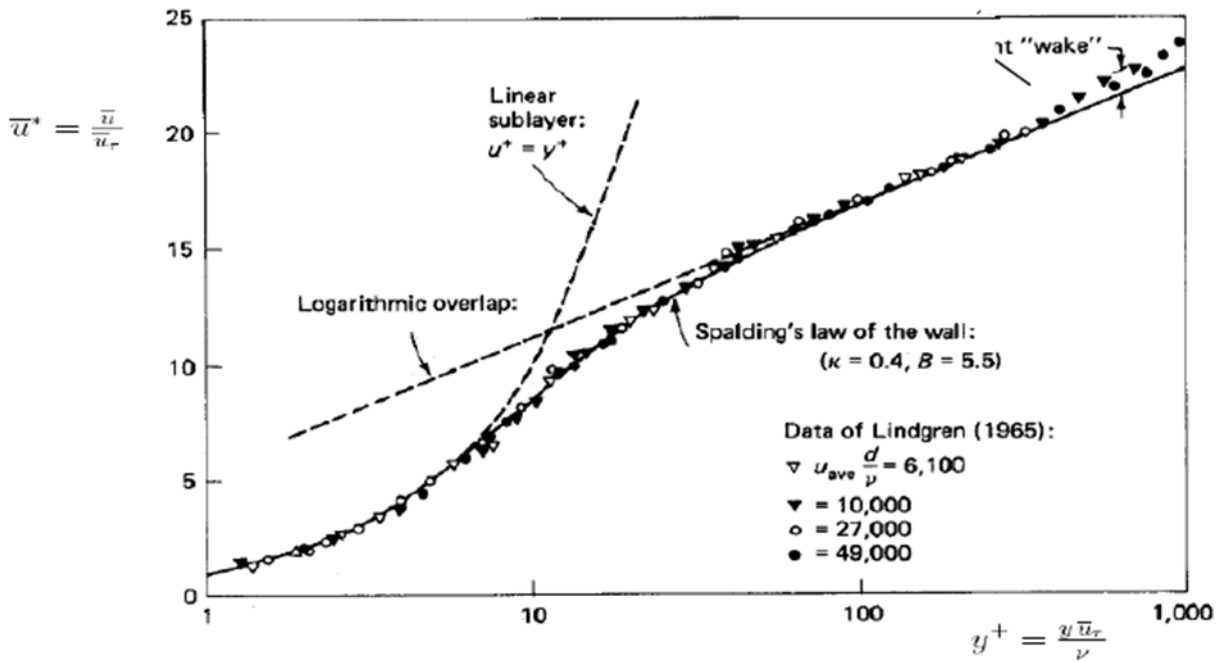
Il s'ensuit :  $\frac{r}{R} = \frac{dU^+}{dy^+} - \frac{\overline{u'v'}}{U_\tau^2}$

On distingue dans la couche limite turbulente, la sous couche visqueuse qui est la région de l'écoulement adjacente à la paroi. Elle correspond à des valeurs de  $y^+$  comprise entre 0 et 10 (environ). Dans cette région, la turbulence n'existe plus, la condition d'adhérence est obtenue par effet de viscosité.

$$\frac{dU^+}{dy^+} \longrightarrow 1 \quad \longrightarrow \quad U^+ = y^+$$

La zone logarithmique dans laquelle les effets de la turbulence prennent le pas sur les effets visqueux. Le déficit de vitesse qui doit apparaitre compte tenu de la présence de la paroi est obtenu par l'effet d'une augmentation de la contrainte turbulente qui, sur le plan théorique est obtenue par une modélisation appropriée de la turbulence.

$$-\frac{\overline{u'v'}}{U_\tau^2} \longrightarrow 1 \quad \longrightarrow \quad -\overline{u'v'} = U_\tau^2$$



**Figure II.2 : Représentation de la loi de paroi.**

## 6. PERTE DE CHARGES DANS UNE CONDUITE CIRCULAIRE

La perte de charge est définie comme étant l'énergie dissipée par le frottement du fluide contre la paroi de la canalisation, elle traduit la résistance à l'écoulement provoquée par ce frottement et est souvent exprimée sous la forme d'une pression, bien qu'elle soit représentative d'une dissipation d'énergie.

Il existe deux (02) types de pertes de charge :

- ✓ Les pertes de charge linéaires ;
- ✓ Les pertes de charge singulières.

La perte de charge totale étant :  $\Delta H = \Delta H_l + \Delta H_s$

### 6.1. Perte De Charge Linéaires

Elles sont essentiellement dues au frottement intérieur des fluides. Considérons un tronçon de canalisation de longueur L et le diamètre constant D, les pertes de charge linéaires sont alors

exprimées par :

$$\Delta H_l = \frac{\lambda L V^2}{D 2g}$$

Où  $\lambda$ , Coefficient de pertes de charge linéaires est une fonction du nombre de Reynolds  $Re$  (et donc du régime d'écoulement) et de la rugosité relative donnée par  $\frac{\varepsilon}{D}$  :

$$\lambda = \lambda\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

Avec

$\varepsilon$  : Hauteur moyenne des aspérités ou rugosité absolue

$V$  : la vitesse moyenne d'écoulement du fluide dans le tronçon de canalisation de longueur  $L$  ;

$g$  : l'accélération de la pesanteur.

Des formules de calcul du coefficient de perte de charge  $\lambda$ , sont données dans le point (IV. *Coefficient de Frottement et Coefficient de Perte de Charge pour le régime laminaire et le régime turbulent*).

Il est cependant important de noter que la formule de Blasius pour le coefficient de perte de charge n'est satisfaisante que pour des valeurs de  $Re < 10^5$ .

$2300 < Re < 10^5$  : la turbulence est encore modérée. L'épaisseur de la sous-couche limite laminaire est suffisante pour englober toutes les aspérités de conduite, qui se comporte dès lors comme un tuyau lisse.  $\lambda$  Ne dépend que de  $Re$ .

$$\lambda = (100 \text{ Re})^{-0,25} \text{ Formule de BLASIUS}$$

A des nombre de Reynolds trop élevés,  $Re > 10^5$ , la turbulence devient très importante et ne dépend plus que de  $\frac{\varepsilon}{D}$ .

$$\text{On aura alors } \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71D}\right).$$

Tous les résultats de ces travaux sont résumés dans la formule de COLEBROOK :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left[\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}}\right]$$

Cette formule correspond sensiblement aux écoulements turbulents de l'abaque de Moody ci-après.

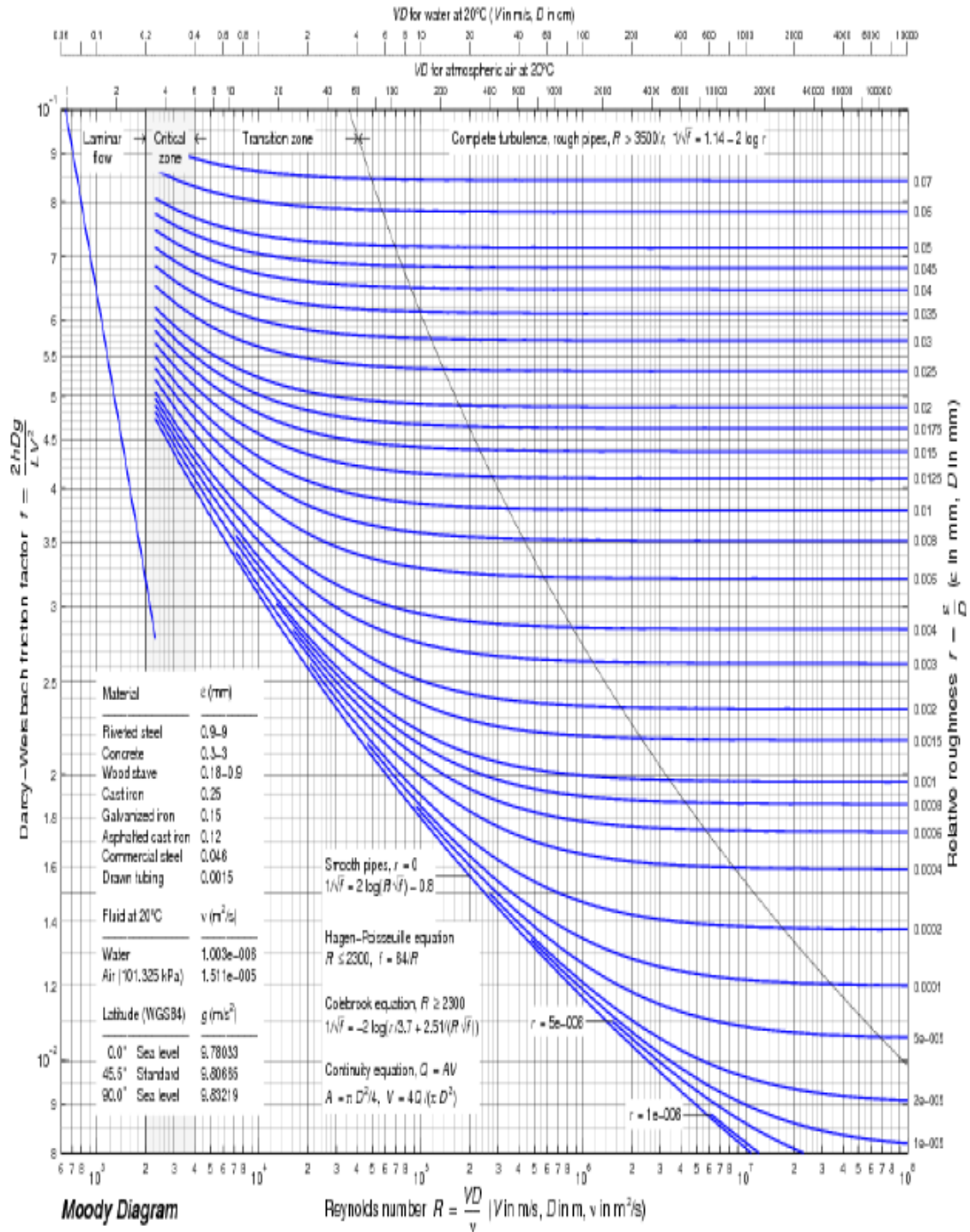


Figure II.3 : Diagramme de Moody.

## 6.2. Perte De Charge Singulières

Ce sont des pertes dues aux changements dans la forme de la conduite (rétrécissements, élargissements, coudes, vanne...etc.).

$$\Delta H_s = \xi \frac{U^2}{2g} = \xi \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (**)$$

On aura donc

$$\Delta H = \Delta H_l + \Delta H_s = \frac{\lambda L}{D} \frac{Q^2}{2gA^2} + \xi \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (13)$$

Les pertes de charge singulières sont généralement estimées de 8% à 10% des pertes de charges linéaires totales, la perte de charge totale sera donc :

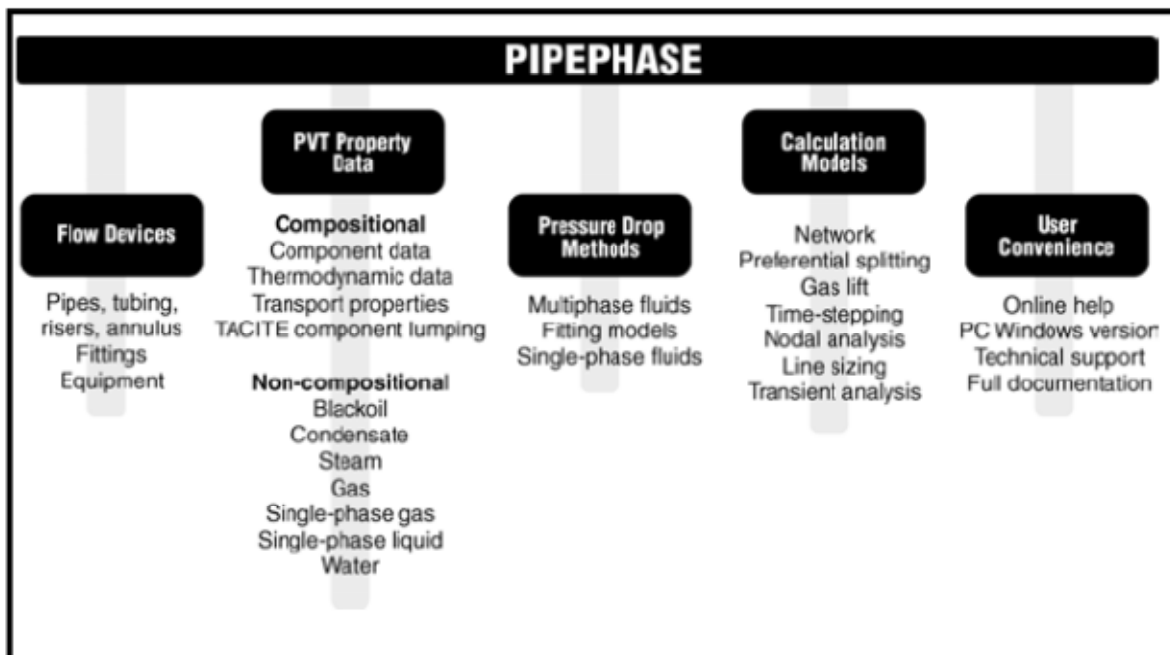
$$\Delta H = 1,10 * \Delta H_l$$

## 7. DESCRIPTION DU LOGICIEL PIPEPHASE

Le but de cette partie est de décrire le logiciel PIPEPHASE, utilisé dans le présent travail essentiellement pour le calcul de la perte de charge. On parlera ici de la portée, les objectifs, les applications et les capacités de PIPEPHASE, puis on présentera des concepts utilisés dans le calcul des pipelines, des puits de forage, et de l'analyse du réseau.

### 7.1. Portée fonctionnelle et objectifs du Logiciel PIPEPHASE

PIPEPHASE est un programme de simulation qui prédit l'état d'équilibre de la pression, des profils de température de liquides présents dans les puits, des conduites d'écoulement, des systèmes de collecte, et d'autres configurations des réseaux de canalisations, puits, pompes, compresseurs, séparateurs, et d'autres installations. Les types de fluides qui peuvent être traités par PIPEPHASE comprennent les liquides, les gaz, les vapeurs et surtout les mélanges multiphasiques (gaz-liquide).



**Figure II.4 :** *Portée fonctionnelle du PIPEPHASE.*

## **7.2. Modes de Calcul Utilisés par le Logiciel PIPEPHASE**

PIPEPHASE peut être utilisé pour concevoir de nouveaux systèmes de pipeline ou évaluer ceux déjà existants afin de trouver des points d'optimisation.

Toute topologie de piping peut être abordée par ce logiciel, de la simple liaison fournissant le dispositif d'écoulement jusqu'aux réseaux les plus complexes de pipelines et de puits, y compris toutes injections de produit ou sorties multiples et tout degré de looping. Dans les configurations de réseau, le logiciel nous donne la possibilité de fixer presque n'importe quelle combinaison de pressions et de débits et PIPEPHASE permettra de résoudre toutes les inconnues restantes à condition que le système soit solvable (nombre d'inconnues égal au nombre de données).

Les pressions des lignes, la distribution du débit dans les loops, les effets de transfert de chaleur (effets de Joule-Thomson), les régimes d'écoulement dans les pipes, les vitesses de liquides et de vapeurs et les phases préférentielles de fractionnement au niveau des Tés pour les systèmes à vapeur sont déterminés avec précision.

## **7.3. Méthodes de Calcul de la Perte de Charge**

PIPEPHASE résout les équations de chute de pression et de bilan énergétique, tout en exécutant simultanément des calculs rigoureux de transfert de chaleur. On peut ainsi choisir parmi plus d'une vingtaine de corrélations standards utilisées dans l'industrie pour évaluer la chute de pression et la rétention du liquide. Une liste complète des corrélations utilisées par ce logiciel est fournie en Annexe 3.

## **7.4. Applications typiques du Logiciel PIPEPHASE**

Le calcul des installations neuves aussi bien que le diagnostic des installations existantes est possible à réaliser avec PIPEPHASE. Pour les nouveaux systèmes, PIPEPHASE peut être utilisé pour dimensionner les différents pipes et loops, pour déterminer la pompe requise / puissance du compresseur et refroidisseur d'appareil de chauffage, et évaluer la pression, la température, la vitesse, le débit, et les distributions du régime d'écoulement pour l'ensemble du système.



Pour les pipelines destinés au transport des hydrocarbures, PIPEPHASE peut simuler ou prévoir les profils de pression et de température d'un système existant qui se compose de pipelines de différents diamètres, pour les pompes, les séparateurs et autres équipements.

Le logiciel réalise ces calculs et diagnostics en utilisant une ou plusieurs corrélations standards de l'industrie pour l'estimation de la perte de charge et son mécanisme d'équilibre thermique. Une fois que la pression et les profils de température sont calculés, ils peuvent être comparés avec les données mesurées. De cette manière, on peut cerner le problème et chercher des solutions dans ce sens par le biais d'autres simulations plus poussées.

### **7.5. Utilisation du PIPEPHASE**

Dans le cadre du présent mémoire de fin d'études, le logiciel PIPEPHASE a été utilisé essentiellement pour le calcul des pertes de charge.

L'utilisation de ce logiciel reste très facile en pratique mais elle nécessite une bonne connaissance un certain nombre de données sans lesquelles on ne pourra pas le manipuler ni même créer notre simulation.

### **7.6. Données Nécessaires au PIPEPHASE**

#### **7.6.1. Données Relatives au Fluide**

Les données nécessaires au PIPEPHASE sont les caractéristiques essentielles du fluide étudié à savoir le type de ce dernier (hydrocarboné, gazeux, eau), ainsi que sa composition qualitative et quantitative. Une fois le fichier de la manipulation crée, il faudra tout d'abord fournir les données suivantes :

- Les proportions en pourcentage de (liquide, vapeur, eau) composant le fluide ;
- L'enthalpie,
- La chaleur spécifique à pression constante ;
- La chaleur latente ;
- Masse volumique ;
- Viscosité ;
- Un minimum de deux points de température et les viscosités qui leur correspondent ;

### 7.6.2. Données Relatives à l'installation

Le logiciel nécessite aussi des données sur le type d'installation à savoir le système de pipelines, des équipements sur pipeline, les pompe...etc.

Dans cette deuxième étape, il faudra tout d'abord insérer les différents composants du réseau à commencer par la source et l'arrivée de la canalisation en fixant le débit et la pression d'un coté et sélectionner leur estimation de l'autre.

Puis on dessine la ligne reliant la source (Terminal de départ) au point d'arrivée (terminal d'arrivée) ainsi que les points intermédiaires (jonctions), ensuite on clique sur les différents tronçons reliant les points intermédiaires pour y intégrer les équipements sur canalisation (vanne, pompe, vanne de control, injection...). Il faudra ensuite donner le diamètre intérieur de chaque tronçons de canalisation, la rugosité relative et absolue du tronçon de canalisation, son profil altimétrique (longueur ; dénivelé), le mode de la pose de canalisation (aérienne, enterrée, sous-marine), la profondeur d'enfouissement de la canalisation pour les pipeline enterrés et enfin choisir la corrélation de calcul de la perte de charge souhaitée (Moody, Hazen Williams ...) un tableau est fourni en Annexe 4 pour la liste de corrélations modélisées dans le PIPEPHASE.

Une autre fenêtre doit être renseignée en y intégrant les données suivantes :

- La température ambiante ;
- Le nombre maximal d'itération (en général de l'ordre de 30 itérations pour le pétrole brut) ;
- La tolérance sur le calcul des pressions pour permettre de pousser la précision des résultats autant que souhaité ;
- Le nombre de Reynolds (**Re**) de transition du régime ;

Pour les pompes, il faudra renseigner les points suivants :

- La pression à la sortie de la pompe ;
- Les limites de fonctionnement de la pompe en termes de pression maximale en (bar), puissance maximale en (KW) et vitesse de rotation maximale en (rpm) ;

Il est aussi possible de saisir de points de l'équation caractéristique de la pompe afin de dessiner sa courbe caractéristique ou encore donner sa puissance.

Une fois le logiciel paramétré et les données correctement saisies on passe à l'exécution de la simulation.

Le logiciel commence par vérifier la solvabilité du système (nombre d'inconnues égal au nombre de données), dans le cas contraire il affiche un message d'erreur pour prévenir l'utilisateur, sinon, on peut lancer le calcul itératif par le biais d'une autre commande.

Une fois que la simulation est exécutée, le logiciel nous donne la main sur les résultats qu'on souhaite afficher, à savoir, la pression et le débit au niveau des différentes jonctions, le profil de la pression, le profil de température, le profil altimétrique de la canalisation.

Aussi, il nous donne la main pour éditer tous les résultats sous format (xls), on peut donc avoir en chaque point de la canalisation en fonction de la longueur et l'élévation de chaque tronçon, la pression, la vitesse d'écoulement, le nombre de Reynolds, le nombre de Prandtl, la viscosité, la masse volumique, le coefficient de perte de charge, la perte de charge en bar et en mètre.

**CHAPITRE III**  
**CALCUL HYDRAULIQUE D'UN OLEODUC**

Au cours de ce chapitre nous allons tout d'abord établir les propriétés physiques et chimiques du pétrole brut influençant l'écoulement dans le conduit, puis nous allons introduire la notion de transfert de chaleur qui constitue un aspect très important dans le transport des hydrocarbures par canalisations. On mettra aussi en évidence, les paramètres qui contrôlent le transport par canalisation du pétrole brut afin de pouvoir déterminer le diamètre, le profil de pressions et de vitesse ainsi que les caractéristiques de l'oléoduc OH4 selon les nouveaux débits à évacuer et le profil en long de ce dernier qui sera parallèle à l'OH3.

Le OH4 évacuera les quantités supplémentaires de pétrole brut que le OH3 dans sa configuration actuelle, n'a pas pu supporter, mais avant toute chose, il nous faudra justement mettre en évidence les limites d'efficacité de ce dernier et bien connaître les règles de sécurité dans le transport par canalisations.

## **1. REGLES DE SECURITE DANS LE TRANSPORT PAR CANALISATION**

Dans le but d'une exploitation maximale et fiable des oléoducs, le règlement de sécurité a fixé les règles essentielles, applicables à la construction et l'exploitation de ces derniers.

Ces règles de sécurité touchent essentiellement aux paramètres suivants : [1]

- La Pression de refoulement.
- La Pression maximale de service.
- La Résistance des matériaux.
- L'emplacement de la canalisation.

### **1.1. Pression de refoulement**

Au départ d'une station de pompage la pression maximale de refoulement ne doit pas dépasser la pression maximale de service admissible pour les tubes et accessoires de la conduite. [1]

$$P_{\text{ref}} < PMS$$

La pression maximale de service est définie comme étant la pression maximale dans des conditions d'exploitation normale. Elle tient compte aussi des surpressions accidentelles et passagères causées par des incidents inopinés. [1]

Pour cela, le règlement de sécurité autorise une tolérance de 10 % au-delà de cette valeur en cas de surpression maximale de service et elle est définie comme :

### 1.2. Résistance des matériaux

Le calcul mécanique consiste à déterminer la contrainte maximale de service PMS, qui s'écrit en fonction de l'épaisseur, du diamètre extérieur, et de la contrainte admissible de l'acier.

Cette dernière est définie selon les conditions de sécurité adoptées ou imposées aux pipelines. Elle est choisie sur la base de la limite d'élasticité  $\sigma_e$  et la limite à la rupture  $\sigma_r$  [1]

Avec  $\sigma_{ad} = \min(k_r \sigma_r, k_e \sigma_e)$ .

$k_r, k_e$  : Sont des coefficients donnés dans le règlement de sécurité.

$\sigma_e, \sigma_r$  : Sont déterminées selon le type et les caractéristiques du matériau constituant de la canalisation, pour notre cas «l'acier».

**Tableau III.1 Résistance des Tubes**

Spécification (A.P.I)	Grade	Limite d'élasticité ( $\sigma_e$ ) (bar)	Résistance à la rupture ( $\sigma_r$ ) (bar)
5L	A	2070	3310
5L	B	2410	4140
5LX	X42	2900	4140
5LX	X46	3170	4340
5LX	X52	3590	4550
5LX	X56	3860	4900
5LX	X60	4130	5500
5LX	X65	4480	5310
5LX	X70	4830	5650
5LX	X70a	4830	5860
5LX	X80	5520	6210

### 1.3. Caractéristiques de l'acier

Dans la construction des pipelines, on utilise en général des aciers définis dans deux spécifications de l'A.P.I (American Petroleum Institute), dénommés : [1] [7]

- 5L : pour les tubes sans soudage.
- 5LS : pour les tubes soudés en spirales.
- 5LU : pour les tubes à très haute résistance.
- 5LX : pour les tubes soudés longitudinalement.

Les tubes choisis pour notre étude sont les tubes soudés longitudinalement soit le type **5LX**.

### 1.4. Emplacement de la conduite

L'emplacement de la conduite le long du parcours est très délicat car en cas d'accidents cela pourrait provoquer des dégâts considérables et ceci en fonction du produit transporté. Pour cela, le règlement Algérien de sécurité des hydrocarbures liquides définit trois (03) zones : [1]

- **Zone I** : comprend les emplacements se trouvant dans les agglomérations urbaines ou près des locaux isolés à usage d'habitation occupés par du personnel à poste fixe ou fréquentés par le publique.
- **Zone II** : Comprend les emplacements situés dans les zones rurales, les pâturages, les terrains de culture, les forêts et les approches d'agglomérations.
- **Zone III** : Comprend les emplacements dans les régions désertiques.

Vu la région dans laquelle le projet est implantée, il est considéré comme étant dans la **zone III** sur toute sa longueur.

#### 1.4.1. Coefficient de sécurité

On a associé à chacune de ces trois zones un coefficient de sécurité qui varie selon les conditions du tracé (densité de population, relief, marécages ... etc). Ce coefficient est le rapport maximal autorisé entre les tensions créées dans l'acier par la pression maximale de service du fluide qui circule, à la limite élastique de l'acier utilisé pour la fabrication des tubes.

**Tableau III.2. Coefficient de sécurité par zone d'implantation des pipelines**

Catégories	$K_c$		$K_r$	
	Enterré ou non	Enterré	Air libre	
<b>Zone I</b>	0,675	0,740	0,440	
<b>Zone II</b>	0,750	0,590	0,440	
<b>Zone III</b>	0,820	0,650	0,650	

## 2. DESCRIPTION DE L'OLEODUC OH3

La figure (III.1) représente le pipeline étudié (OH3) ainsi que les champs y injectant leur pétrole.

Le terrain est relativement accidenté, la nature du sol est variée, allant de la roche dure en terrain plat aux dunes de sable.

Le pipeline est en acier de type API 5L X60. Il a un diamètre extérieur de 30" soit 0,762 m, une épaisseur de 10,31 mm et transporte le pétrole brut du Centre de Stockage et de Transport de Hassi Berkine jusqu'au terminal de Haoud El Hamra en passant par la station de pompage de Nezla sur un linéaire total de 295 Km.

## 3. CALCUL HYDRAULIQUE DU OH3

Le calcul hydraulique de cet oléoduc comporte plusieurs étapes :

### 3.1. Calcul de la Pression Maximale de Service (PMS)

Selon la norme internationale ANSI, la PMS est donnée par la formule suivante :

$$PMS = \frac{2e\sigma_{ad}}{D_{ext}}$$

Avec

- ♦  $e = 10,31$  mm..... Epaisseur de la conduite ;
- ♦  $D = 762$  mm..... Diamètre extérieur de la conduite ;
- ♦  $\sigma_{ad}$  est la contrainte admissible

$$\sigma_{ad} = \min(k_r \sigma_r, k_e \sigma_e) = \min(3386,6 ; 3575,0) \text{ bars.}$$

$$\sigma_{ad} = \mathbf{3386,6 \text{ bars.}}$$

Donc la PMS selon ANSI est de :

$$\mathbf{PMS = 91,64 \text{ bars.}}$$

**Remarque :** La valeur de la PMS peut être dépassée, et atteindre jusqu'à 10% de plus que sa valeur soit **Pd = 1,10 PMS**. [1]et [7]

$$\mathbf{Pd = 100,806 \text{ Bars.}}$$



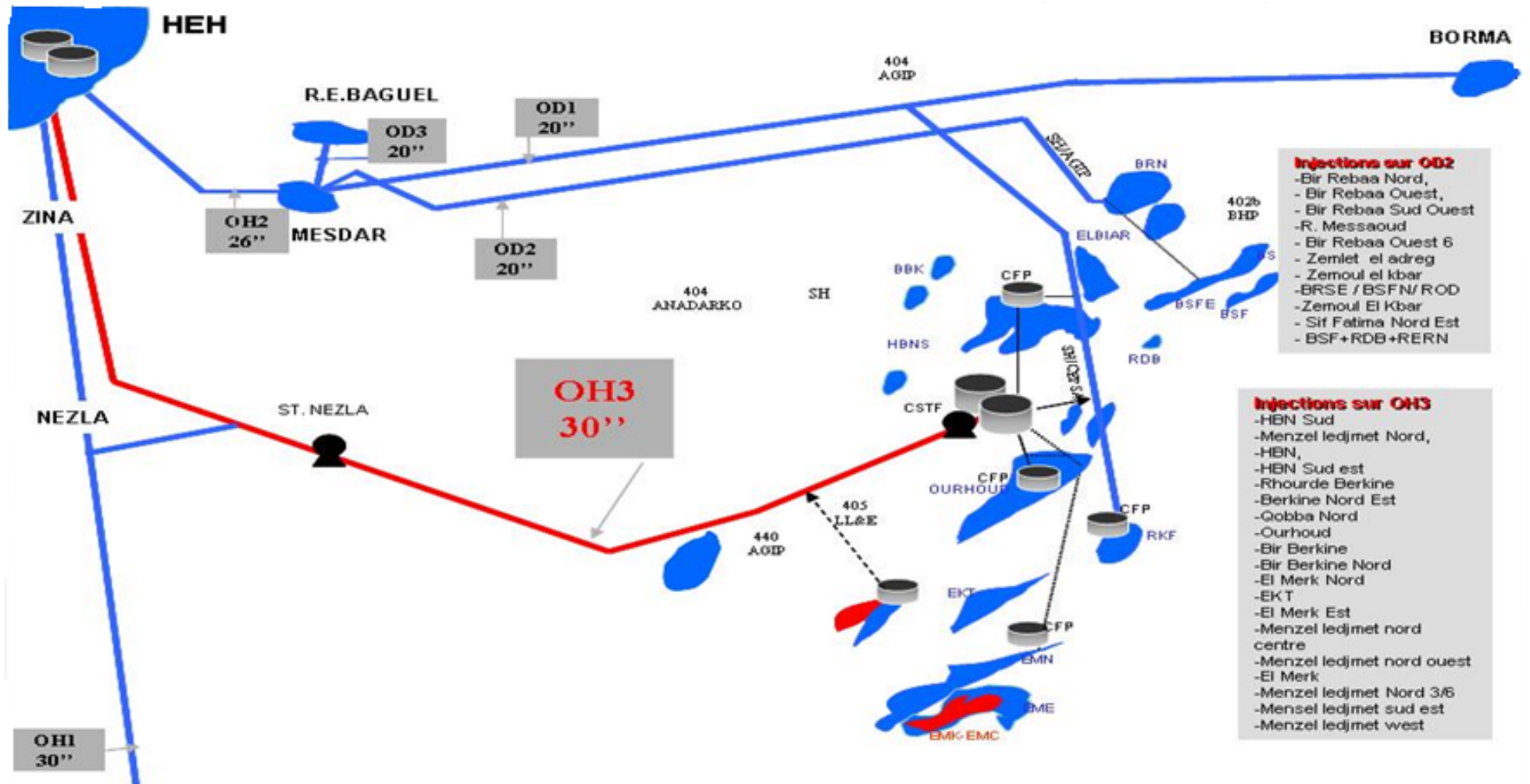


Figure III.1 : Carte Des Gisements Pétroliers Du Bassin de Berkine

### 3.1.1. La norme Algérienne

Si on utilise les règles de sécurité pour les conduites de transport d'hydrocarbures liquides la PMS de la ligne en zone III est calculée selon la relation suivante:

$$P = \frac{20 \text{ el} \cdot \sigma_{ad} \cdot x}{D_{ext}}$$

Avec  $\sigma_{ad} = \min (K_e \cdot \sigma_e, K_r \cdot \sigma_r)$  contrainte admissible à la limite d'élasticité.

- ♦  $ec = 2 \text{ mm}$  .....Surépaisseur de corrosion ;
- ♦  $el = (e - ec) \text{ mm}$  .....Epaisseur corrodée ;
- ♦  $x = 1$  .....Coefficient égal à 1 pour les tuyaux soudés longitudinalement ;

D'où :

$$\sigma_{ad} = \mathbf{338,66 \text{ MPa.}}$$

On aura donc :

$$\mathbf{PMS = 73,865 \text{ bars}}$$

### 3.2. Calcul du Gradient Hydraulique

Le calcul de la charge en chaque un point de la ligne est fait en utilisant les procédures conventionnelles valides pour les hydrocarbures liquides en conditions monophasées comme celle de **DARCY-WEISBACH-COLEBROOCK**.

Pour ce faire, nous avons d'abord commencé par définir les paramètres hydrauliques influents sur l'écoulement et qui sont présentés dans les tableaux suivants :

#### 3.2.1. Données sur le sol :

**Tableau III.3 Données sur le Sol**

Abréviation	Définition	Valeurs	Unité
$\lambda_{sol}$	Conductivité du sol	1	W/mC
$T_{sol}$	Température du sol	18	°C

3.2.2. Données sur le pipeline :

**Tableau III.4 Données sur le Pipeline**

Abréviation	Définition	Unité	Valeurs
/	Type d'acier	/	API 5LX52 SAW
<b>Dn</b>	Diamètre nominal	<b>mm</b>	762
<b>E</b>	Epaisseur de la conduite	<b>mm</b>	10,31
<b>E</b>	Rugosité absolue	<b>mm</b>	$4,57 \cdot 10^{-2}$
<b>E</b>	Module de YOUNG	<b>Pa</b>	$2,07 \cdot 10^{11}$
<b>N</b>	Coefficient de poisson	/	0,3
<b>Dpt</b>	profondeur d'enfouissement du pipeline	<b>m</b>	1

3.2.3. Données concernant le fluide :

**Tableau III.5 Données sur le Fluide**

Abréviation	Définition	Valeur	Unité
/	Type de Fluide	Pétrole brut	/
$T_1$	Température à HBN	30	°C
$T_2$	Température à HEH	23	°C
$V$	Vitesse moyenne de transport du fluide	2,12	m/s
$T_c$	Température critique du fluide	568	°K
$C_{p_f}$	Capacité calorifique du fluide	2093	J/kg k
$\mu_2$	Viscosité dynamique à 23°C	0,00312	Pa.s
$\rho_f$	Masse volumique du fluide à 30°C	850	Kg/m <sup>3</sup>
$\square_f$	Conductivité Thermique du fluide	0,135	W/mC

### 3.2.4. Caractéristiques des pompes :

**Tableau III.6 Caractéristiques des Pompes**

Abréviation	Définition	Valeurs	Unité
/	Nombre de pompes Booster	<b>2</b>	/
/	Nombre de pompes principales HBN	<b>3</b>	/
/	Nombre de pompes principales NZL	<b>3</b>	/
/	Pression d'arrivée (NZL, HEH)	<b>5</b>	<b>bar</b>
<b>Hr<sub>1</sub></b>	Charge nominale (HBN)	<b>712</b>	<b>m</b>
<b>Hr<sub>2</sub></b>	Charge nominale (NZL)	<b>626</b>	<b>m</b>
<b>η</b>	Rendement des pompes	<b>99,7</b>	<b>%</b>
<b>Qr</b>	Débit fourni par chaque pompe	<b>1100</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Q<sub>n</sub></b>	Débit nominal évacué par le OH3	<b>3300</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>

### 3.3. Courbes Caractéristiques des Différentes Pompes

Les courbes caractéristiques utilisées pour cette étude ont été représentées dans les calculs de la surpression par des polynômes de second ordre.

La courbe modélisée empêche que la pression de refoulement de la (les) pompe(s) dépasse la hauteur limite (Shut-off).

L'équation ci-dessous a été utilisée pour décrire la courbe caractéristique de la pompe centrifuge :

$$H(Q) = a_1 + a_2 Q + a_3 Q^2$$

Pour pouvoir tracer les courbes caractéristiques des différentes pompes il nous faut résoudre l'équation ci-dessus.

Avec  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , des coefficients à déterminer à partir des tableaux des pompes fournis par le constructeur et donnés ci-dessous pour 3 pompes principales et 2 pompes booster.

**Tableau III.7 Données Caractéristiques des Pompes fournies par le Constructeur**

	HBN	NZL1	NZL2	Booster	Unité	Définition
Hr	710,00	622,00	160,00	70,00	m	Charge nominale
Qr	3 330,00	3 330,00	1 800,00	3 500,00	m <sup>3</sup> /h	Débit Nominal
Hr <sub>0</sub>	505,00	460,00	120,00	58,00	m	Charge Minimale des pompes
Qr <sub>0</sub>	5 190,00	5 190,00	2 940,00	4 400,00	m <sup>3</sup> /h	Débit Minimal des pompes
Hs	795,00	680,00	180,00	90,00	m	Charge pour un débit nul

a<sub>1</sub> est la valeur de la charge maximale (pour un débit nul).

On obtient, pour a<sub>1</sub>, le tableau ci-dessous :

**Tableau III.8 Les Valeurs de (a1) pour les Différentes Pompes**

	HBN	NZL1	NZL2	BOOSTER
a <sub>1</sub>	795,00	680,00	180,00	90,00

a<sub>2</sub> est déterminé à partir de l'équation ci-dessous :

$$a_2 = Q_{r0} \cdot \frac{\left[ \frac{H_r}{Q_r} - \frac{H_s}{Q_r} - Q_r \frac{H_{r0}}{Q_{r0}^2} + Q_r \frac{H_s}{Q_{r0}^2} \right]}{(Q_{r0} - Q_r)}$$

L'application numérique donne les valeurs a<sub>2</sub> pour les différentes pompes suivant le tableau ci-dessous :

**Tableau III.9 : Les Valeurs de (a2) pour les Différentes Pompes**

	HBN	NZL1	NZL2	BOOSTER
a <sub>2</sub>	0,029	0,027	0,004	0,00035

a<sub>3</sub> est déterminé à partir de l'équation ci-dessous :

$$a_3 = \left[ \frac{-a_2}{Q_{r0}} + \frac{(H_{r0} - H_s)}{Q_{r0}^2} \right]$$

De même pour les différentes pompes on obtient différentes valeurs de a<sub>3</sub> :

**Tableau III.10 Les Valeurs de (a3) pour les Différentes Pompes**

	HBN	NZL1	NZL 2	BOOSTER
a <sub>3</sub>	-0,00002	-0,00001	-0,00001	-0,000002

A partir des résultats obtenus on peut établir les équations caractéristiques des différentes pompes :

$$\begin{cases} H(Q) = 795 + 0.029Q - 0.000020Q^2 \dots(I) \\ H_1(Q) = 680 + 0.027Q - 0.000010Q^2 \dots(II) \\ H_2(Q) = 180 + 0.004Q - 0.000010Q^2 \dots(III) \\ H(Q) = 90 + 0.00035Q - 0.000002Q^2 \dots(IV) \end{cases}$$

Avec :

**(I)** : Représente l'équation caractérisant les pompes de **HBN** ;

**(II)** : Représente l'équation caractérisant les pompes de **NZL** à puissance maximale ;

**(III)** : Représente l'équation caractérisant les pompes de **NZL** à puissance minimale ;

**(IV)**: Représente l'équation caractérisant les pompes **Boosters** de **HBN**.

### 3.4. Calcul des pertes de charges

Le calcul des pertes de charges s'effectue en plusieurs étapes :

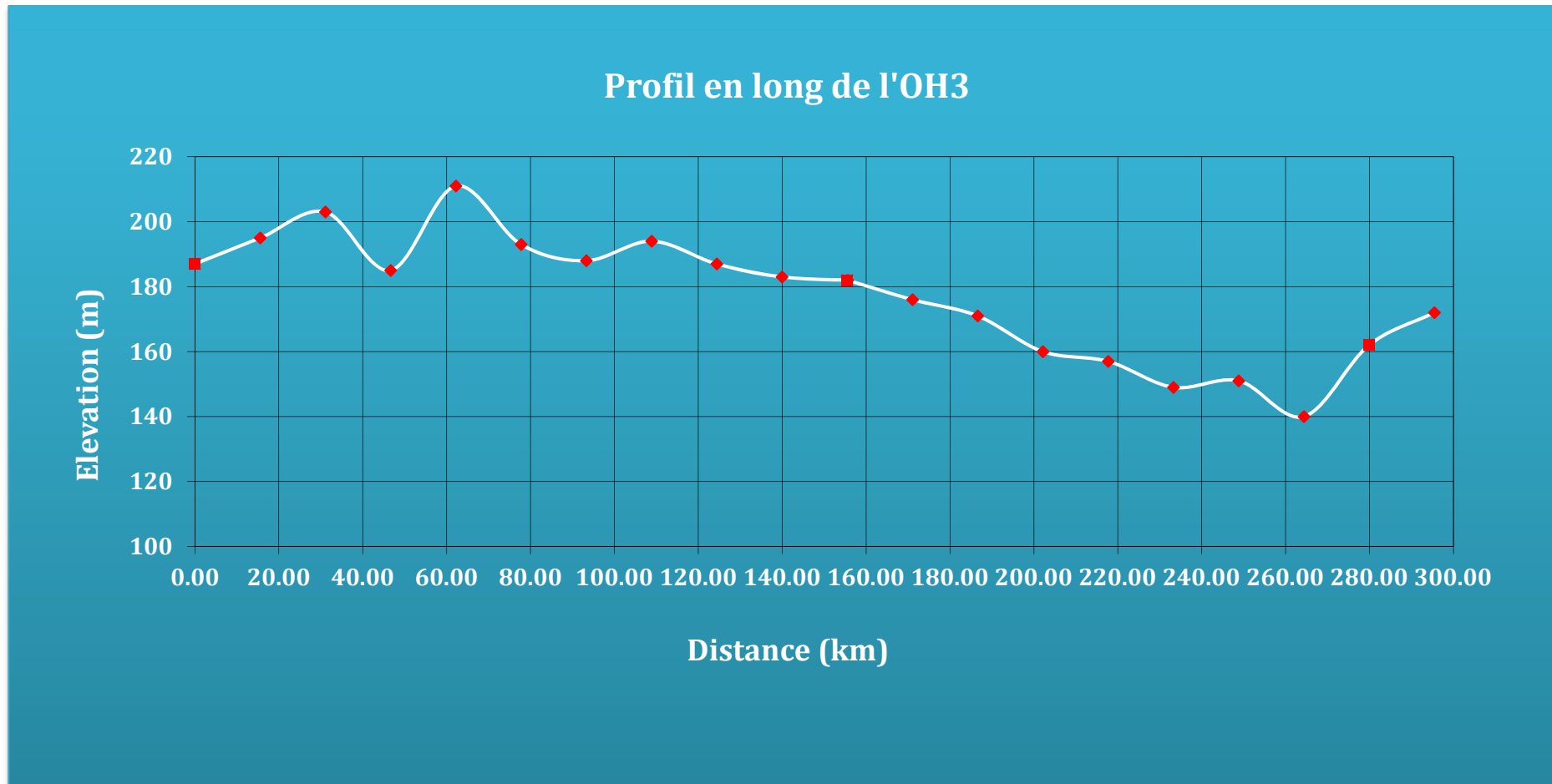
#### 3.4.1. Calcul de la dénivelée

Il se fait à partir du profil en long fourni par la société et dont les valeurs sont représentées dans le tableau ci-après.

**Tableau III.11 Profil en long de l'OH3/ OH4**

Nœuds	PK (km)	Élévation (m)	
Control valve	0,00	187	
1	0,00	187	<b>out HBN</b>
2	15,55	195	
3	31,10	203	
4	46,65	185	
5	62,20	211	
6	77,75	193	
7	93,30	188	
8	108,85	194	
9	124,40	187	
10	139,95	183	
11	155,50	182	<b>in NZL</b>
11a	155,60	182	<b>out NZL</b>
12	171,05	176	
13	186,60	171	
14	202,15	160	
15	217,70	157	
16	233,25	149	
17	248,80	151	
18	264,35	140	
19	279,90	162	
20	295,45	172	<b>in HEH</b>

Les résultats de calcul détaillés sont représentés dans l'Annexe1 (calcul du gradient Hydraulique OH3).



**Figure III.2 Profil en Long de l'oléoduc OH3/ OH4 – HBN à HEH**



### 3.4.2. Calcul des Paramètres Hydrauliques à Température Standard (30°)

#### 1. Calcul du Débit Massique :

$$W_{mass} = \frac{Q_{trans} \times \rho_f}{3600}$$

Nous aurons :

$$W_{mass} = 711,1 \text{ Kg/s}$$

#### 2. Calcul du Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_f \times V \times Di}{\mu_f}$$

On obtient :

$$Re = 4,58 \cdot 10^5$$

#### 3. Calcul du Nombre de Prandtl :

$$Pr = \mu_f \frac{cp_f}{\lambda_f}$$

On obtient :

$$Pr = 41,39$$

#### 4. Calcul du Coefficient de Transfert de Chaleur Interne

Lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite il y a un transfert d'énergie entre le fluide et la paroi et entre la paroi et le sol, ce transfert se fait de trois façons différentes :

- Par conduction entre les matières solides (entre la conduite et le sol)
- Par convection entre les fluides et les solides
- Par rayonnement (émission d'ondes électromagnétiques), ce type de transfert est négligeable dans le cas de conduites souterraines.

La variation de la chaleur du fluide induit une variation de sa masse volumique qui est traduite par l'équation suivante :

$$\rho_i = \rho_{i-1} \left( \frac{T_c - t_i}{T_c - t_{i-1}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$t_i$  : étant la température du fluide en chaque point de l'oléoduc.

Cette variation influe aussi sur la viscosité dynamique du fluide qu'on traduit par l'équation suivante :

$$\mu_j = 10^{[2.2379 - 0.933 \log(t_{j-1})]}$$

Dans ce point on s'intéresse au transfert de chaleur qui se fait entre le fluide et la paroi interne de la conduite. Ce transfert de chaleur est donné par la relation suivante :

$$h_{ti} = 0,023 \times \frac{\lambda_f}{Di} \times (\text{Re})^{0,8} \times (\text{Pr})^n$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} n=0,3 \text{ en cas de perte de chaleur} \\ n=0,4 \text{ en cas de gain de chaleur} \end{array} \right.$$

On obtient dans notre cas (perte de chaleur) :

$$h_{ti} = 432 \text{ w/m}^2\text{c}$$

### 5. Calcul du coefficient de transfert de chaleur externe

C'est le transfert qui se fait entre la paroi externe de la conduite et le sol. Il est donné par la relation suivante :

$$h_{t0} = \left[ \frac{2 \times \frac{\lambda_{sol}}{D_{ext}}}{a \cosh \left( 2 \times \frac{dpt}{D_{ext}} \right)} \right]$$

On obtient :

$$h_{t0} = 1,6 \text{ w/m}^2\text{c}$$

**6. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global:**

Il est donné par la formule suivante :

$$U = \left( \frac{1}{h_{t0}} + \frac{1}{h_{ti}} + \frac{e}{\lambda_m} \right)^{-1}$$

Avec

$\frac{e}{\lambda_m}$  : représente le coefficient de transfert de chaleur dans la paroi de la conduite. (Équation de Fourier).

On obtient :

$$U = 1,61 \text{ w/m}^2\text{c}$$

A partir de ces résultats on peut résoudre l'équation ci-dessous.

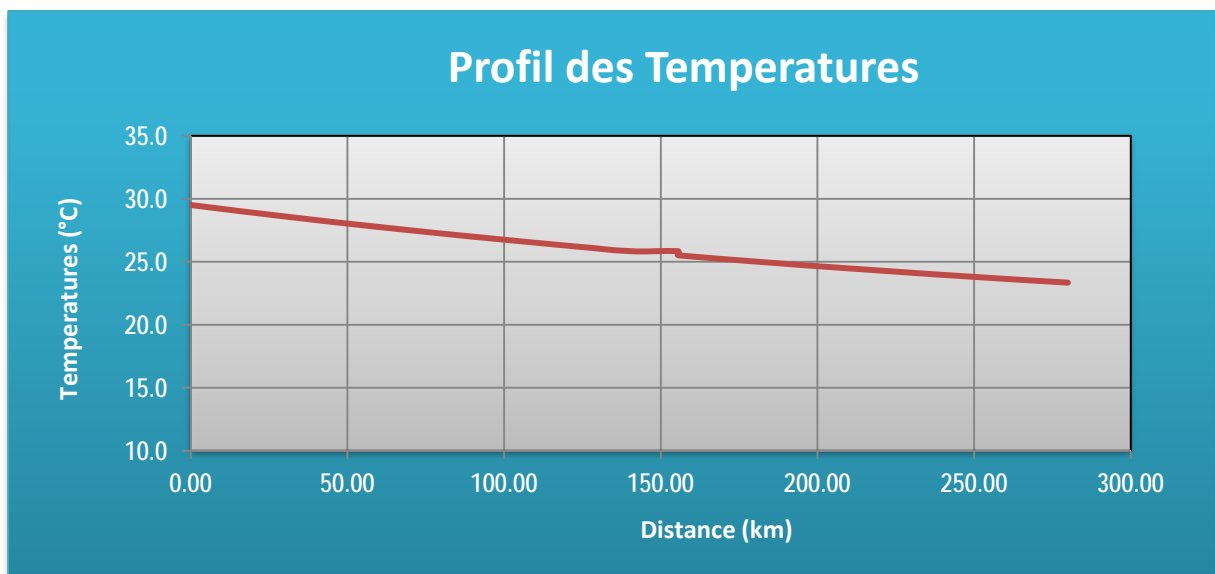
$$t_i = t_{sol} + e^{\left[ t_{i-1} - t_{sol} \right] - \frac{U * \pi * D * l_i}{w * c_{pf}}}$$

Avec

$t_i$  : la température du fluide le long du pipeline

Les résultats qui y découlent sont indiqués dans l'annexe (calcul du gradient hydraulique OH3).

Le profil de température est représenté sur la **figure III.3** ci-dessous.



**Figure III.3 Profil des Températures – OH3**

**7. Calcul de la viscosité dynamique ( $\mu$ )**

$$\mu_j = 10^{[2.2379 - 0.933 \log(t_{i-1})]}$$

Les valeurs de  $\mu_j$  sont indiquées dans l'annexe 1 (calcul du gradient hydraulique OH3)

**8. Calcul de la masse volumique ( $\rho$ )**

$$\rho_i = \rho_{i-1} \left( \frac{T_c - t_i}{T_c - t_{i-1}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$T_c$  est la température critique.

Les valeurs de  $\rho_i$  sont indiquées dans l'annexe 1 (calcul du gradient hydraulique).

**9. Calcul du nombre de Reynolds le long de l'oléoduc ( $Re_i$ )**

$$Re_i = \rho_f \cdot V \cdot \frac{D_i}{\mu_i}$$

Les valeurs de  $Re_i$  sont indiquées dans l'annexe 1 (calcul du gradient hydraulique).

La valeur du coefficient de frottement est définie par l'équation de CHEN (1979) :

$$\lambda_i = \frac{4}{\left[ -4 * \log \left[ 0,2698 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) - \left( \frac{5,0452}{Re_i} \right) * \log \left[ 0,3539 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1,11098} + \frac{5,8506}{Re_i^{0,8981}} \right] \right] \right]^2}$$

Mais, nous avons préféré utiliser l'équation de COLEBROOCK qui est régulièrement utilisée dans le domaine des hydrocarbures (selon les instructions de la SONATRACH) et qui se trouve aussi, être l'équation utilisée par le logiciel PIPEPHASE pour le calcul des pertes de charges :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \text{Log} \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * D} + \frac{2,51}{Re_i * g * \sqrt{\lambda_i}} \right)$$

Soit :

$$\lambda_i = \frac{1,05}{\left[ -2 \operatorname{Log} \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * D} + \frac{2,51}{Re_i * \sqrt{0,4 * Re_i^{-0,3} + 0,0053}} \right) \right]^2}$$

### 10. Calcul de la perte de charge

$$\Delta p_i = \lambda_i * l_i * \rho_f * \frac{V^2}{2D} \dots \dots \dots (1')$$

Nous obtiendrons à partir de cette équation des pertes de charges en (Pascal)

La perte de charge en termes de mètres de liquide et en unité métrique:

$$\Delta h_i = \lambda_i \frac{l_i}{D} \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (2')$$

On remplace  $V^2$  par  $\frac{Q^2}{S^2}$  dans l'équation (2'), on obtient :

$$\Delta h_i = 8\lambda_i \frac{l_i}{g} \frac{Q^2}{\pi^2 D^5}$$

Les résultats obtenus sont indiqués dans l'annexe (calcul du gradient hydraulique).

Nous avons considéré que les pertes de charges locales (singulières) représentent 8,5% des pertes de charges linéaires totales.

### 11. Calcul de la charge

L'application de l'équation de Bernoulli généralisée entre deux sections de l'oléoduc nous a permis d'établir la relation suivante :

$$\frac{P_i}{\gamma} = \frac{P_{i-1}}{\gamma} + \Delta h_i + \Delta z_i \dots \dots \dots (3')$$

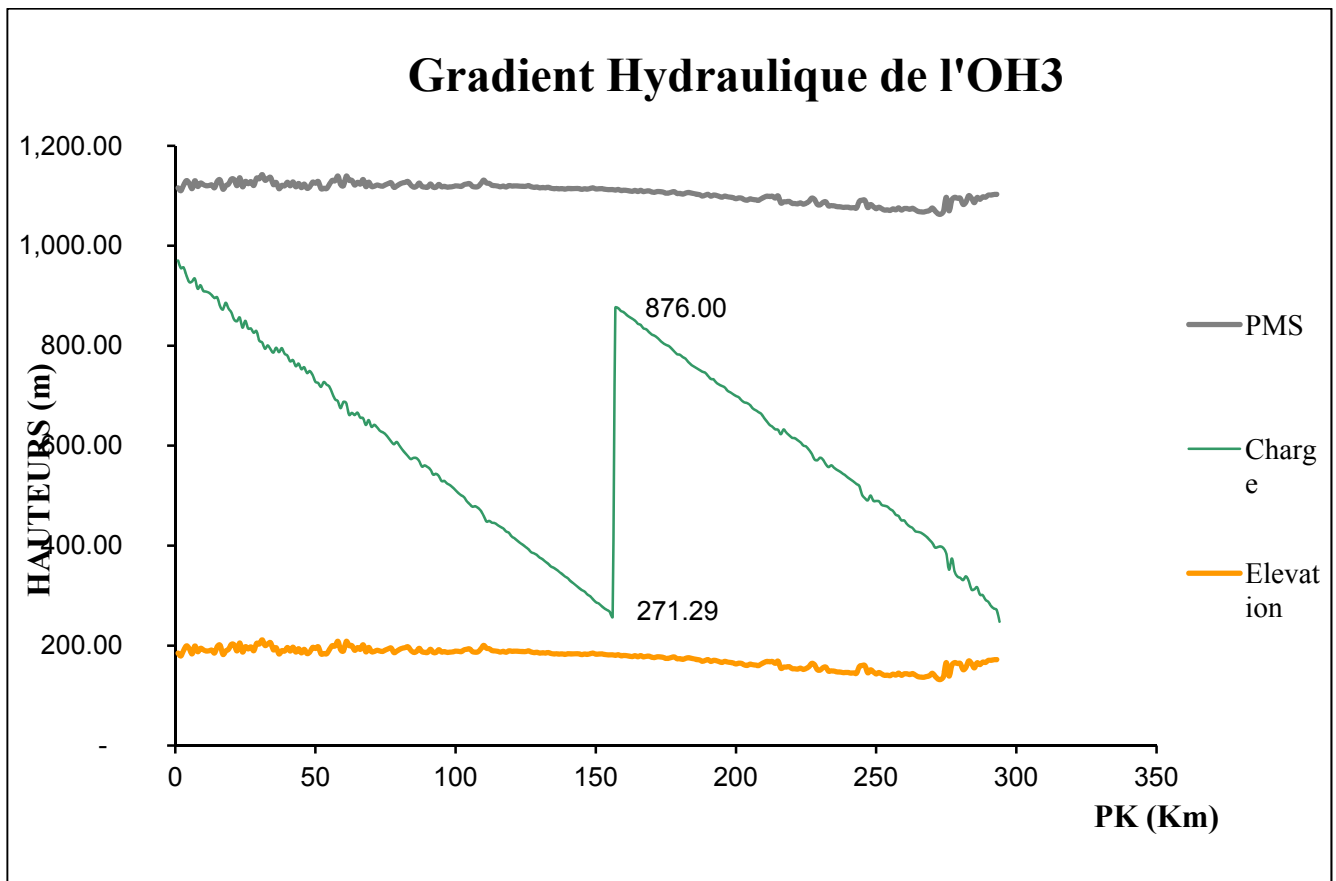
En remplaçant  $\frac{P_i}{\gamma}$  par  $H_i$  on obtient : [7]

$$H_i = H_{i-1} + \Delta h_i + \Delta Z_i$$

$H_i$  et  $H_{i-1}$  étant les hauteurs représentatives des pressions.

Les résultats obtenus sont indiqués dans l'annexe (calcul du gradient hydraulique)

La **figure (III.4)** représente le gradient hydraulique du pipeline OH3.



**Figure III.4 Tracé du Gradient Hydraulique du pipeline OH3- Hassi Berkine.**

### 3.4.3. Courbes Caractéristiques de la Conduite

Après avoir calculé le coefficient de perte de charge ( $\lambda_0$ ), nous pouvons à présent représenter la courbe caractéristique de la ligne dont l'équation s'écrit comme suit :

$$H(Q)=KQ^2+Hg..... (4)$$

Avec :

Hg : la hauteur géométrique des bacs = 187m pour HBN et 182 m pour NZL

K : la résistance hydraulique de la canalisation donnée par :

$$K = \frac{8}{\pi^2} \frac{\lambda L}{gD^5} ..... (5)$$

Pour

$\lambda_0$  : la valeur moyenne des ( $\lambda_i$ ).

$$\lambda_0 = 0,0144$$

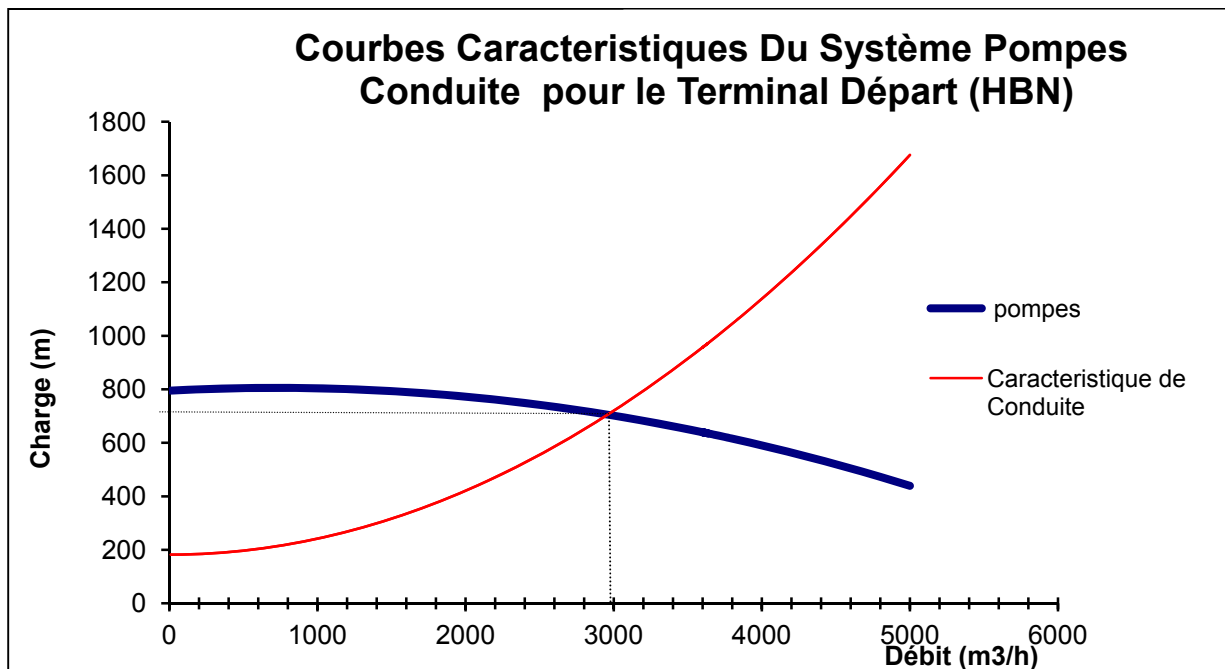
On obtient alors :  $K_0 = 786,80 \text{ s}^2/\text{m}^5$

Pour différentes valeurs du débit (allant de 0 à 5000 m<sup>3</sup>/h) nous avons tracé la courbe caractéristique de la ligne ainsi que celle des trois pompes en parallèle et qui sont représentées sur la **figure (III.5)** ci-dessous.

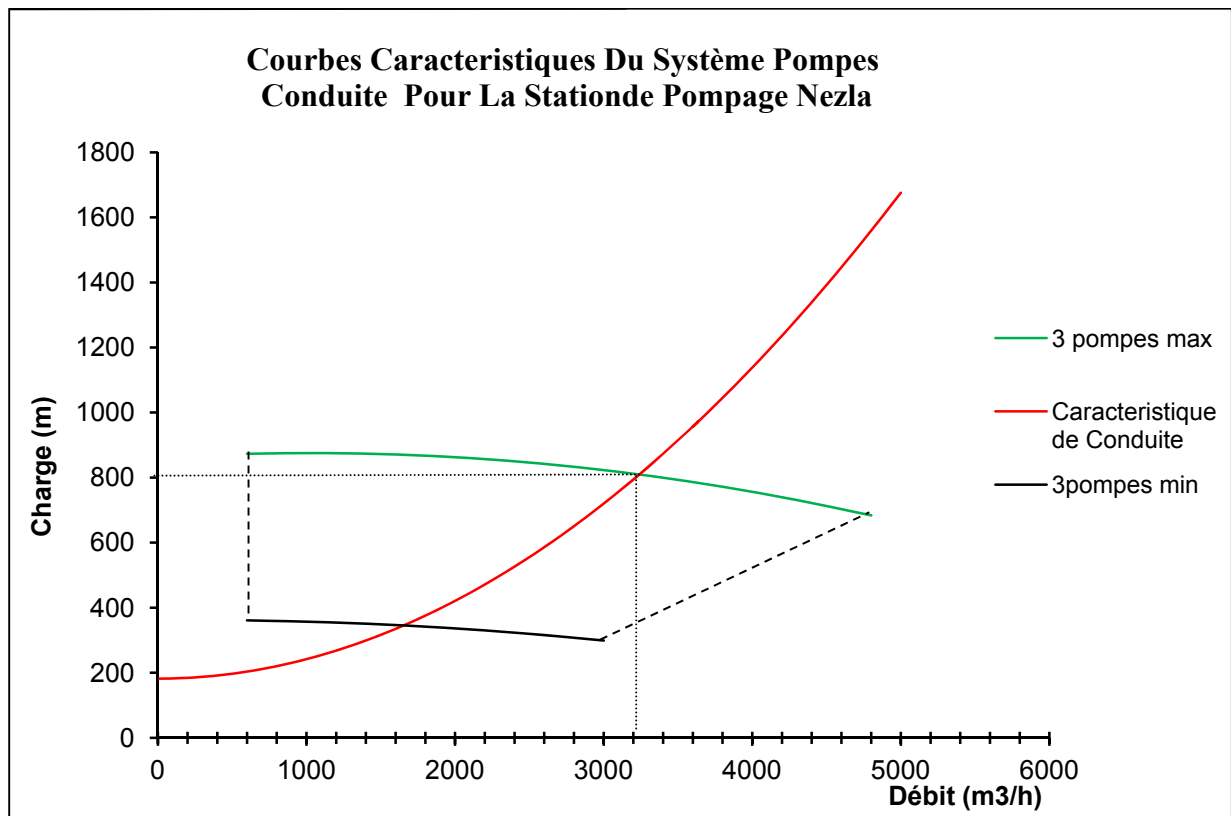
L'intersection entre les deux courbes nous donne le point de fonctionnement, dont le débit et la charge sont respectivement de :

$$Q_0 = 3324 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_0 = 855,28 \text{ m}$$



**Figure III.5 Courbes Caractéristiques Du Système Pompes Conduite (HBN)**



**Figure III.6 Courbes Caractéristiques Du Système Pompes Conduite (NEZLA)**



## 4. CALCUL HYDRAULIQUE DU OH4

La figure (III.8) représente la position de l'oléoduc projeté (OH4).

### 4.1. Quantités de Dimensionnement

**Tableau III.12 Prévisions de Production du Brut au Niveau du OH3 - (HBN)**

	Optimal OH3			Prévisionnel pour l'OH3		
	Année 1	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7
<b>Débit (MTA)</b>	22,91	25,777	27,140	29,112	31,491	30,302
<b>Production supplémentaire (MTA)</b>		2,867	4,230	6,202	8,581	7,392

Débit de dimensionnement (MTA) = Maximum (Production Supplémentaire) = 8,58 MTA

Soit un débit de dimensionnement de **Q= 1354 m<sup>3</sup>/h**,

Avec :

**ρ** : masse volumique du pétrole brut = **850 Kg/m<sup>3</sup>** ;

Facteur de fonctionnement : 330 jours/ an, 24h /24.

Vu la nature chargée du fluide, sa vitesse d'écoulement dans les pipelines ne doit pas être inférieure à **1m/s** pour éviter le dépôt de matière dans le pipeline (qui engendre une diminution du diamètre qui donne des pertes de charge plus importante avec le temps pouvant ainsi mettre l'installation hors service) et elle ne doit pas dépasser les **3 m/s** afin d'éviter l'érosion de la conduite.

Une première appréciation du diamètre est faite en utilisant les formules de Bonnin et Bress :

$$\text{Bonnin : } D_1 = \sqrt{Q} = 0,613 \text{ m} = 24''$$

$$\text{Bress : } D_2 = 1,5 * \sqrt{Q} = 0,920 = 36''$$

On aura donc :

$$V_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{4*Q}{\pi * D_1^2} = 1,27 \text{ m/s.}$$

$$V_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{4*Q}{\pi * D_2^2} = 0,57 \text{ m/s, diamètre } 36'' \text{ écarté, car la vitesse qu'il donne est trop faible.}$$

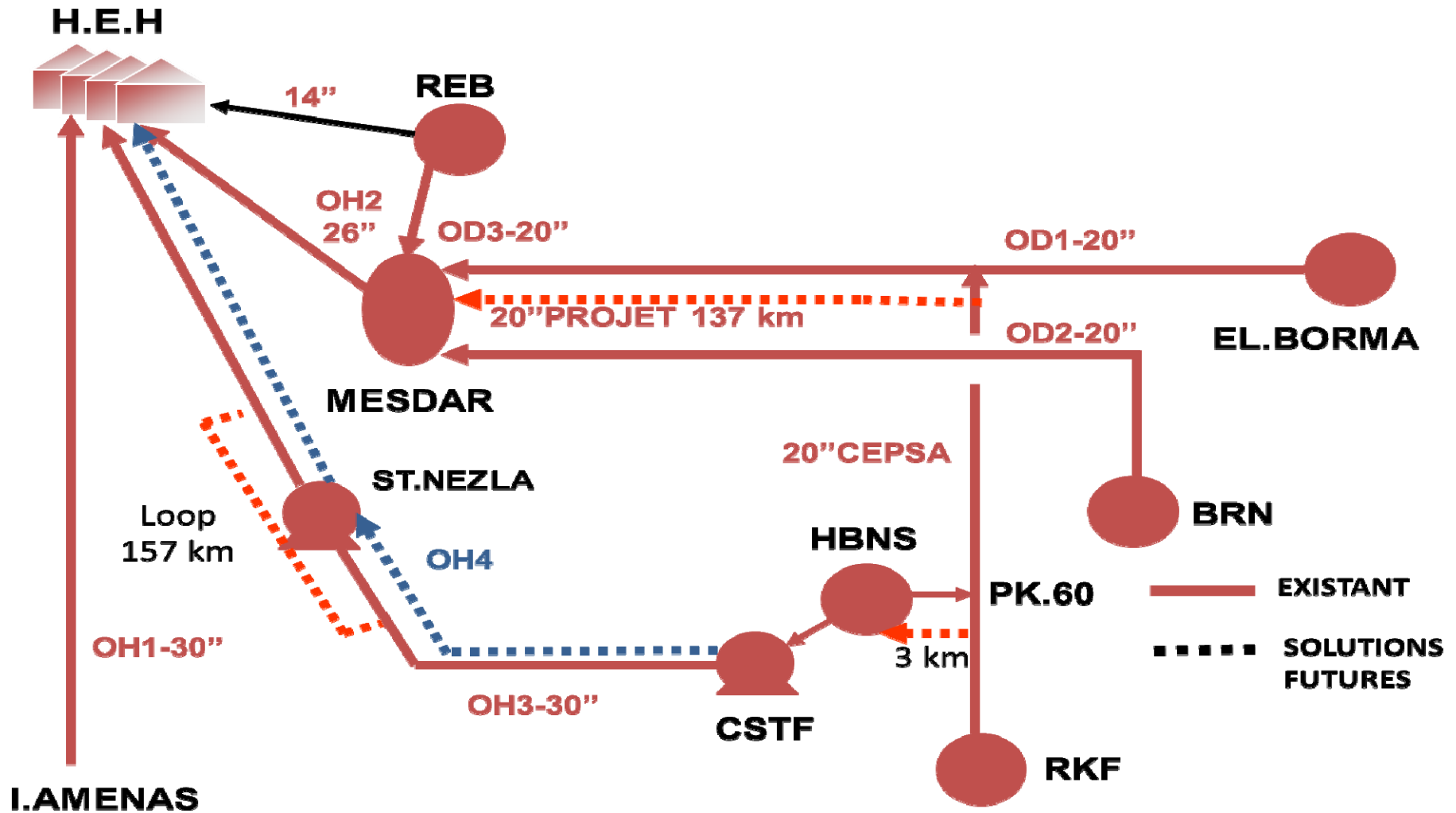
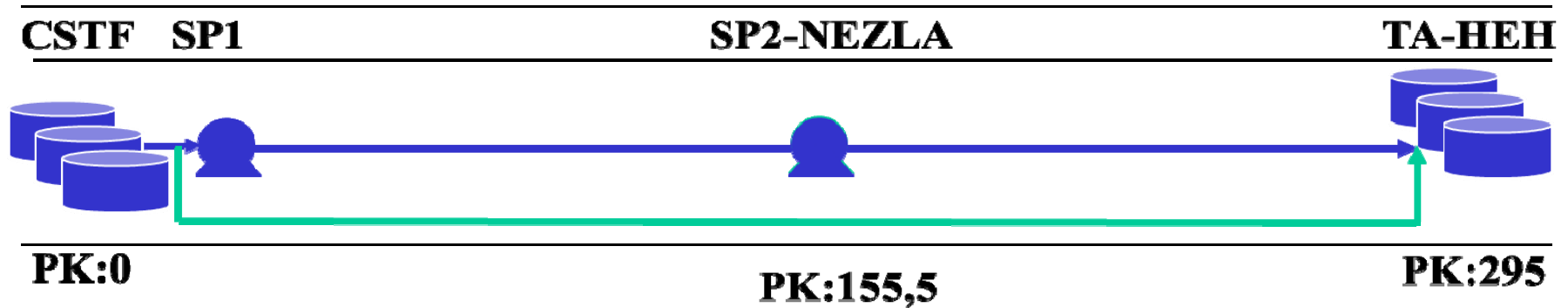


Figure III.7 : Schéma Synoptique du Réseau Sud de Brut dans la Région de Hassi Berkine

## EVACUATION DU BRUT DU BASSIN DE BERKINE

### VARIANTE DE BASE : SOLUTION NOUVEAU PIPELINE



**Pipeline 295 Km : 24''**  
**Capacité : 9 MTA**

Figure III.8 : Schéma Synoptique de la Solution Retenue pour l'Evacuation du Brut de HBN

#### 4.2. Calcul de la PMS

La PMS sera calculée selon la formule suivante :

L'oléoduc est installé en zone III sur toute sa longueur et la nuance d'acier choisie est la même que pour l'OH3 soit 5LX (X60).

On aura donc

$\sigma_{ad}$ , la contrainte admissible est donnée par

$$\sigma_{ad} = \min(k_r \sigma_r, k_e \sigma_e) = \min(3386,6 ; 3575,0) \text{ bars.}$$

$$\sigma_{ad} = 3386,6 \text{ bars.}$$

**La norme ANSI :** Selon la norme internationale ANSI, la PMS est donnée par la formule suivante :

$$PMS = \frac{2e\sigma_{ad}}{D_{ext}}$$

Avec

- ♦  $e = 9,8 \text{ mm}$ ..... Epaisseur de la conduite ;
- ♦  $D = 609,6 \text{ mm}$ ..... Diamètre extérieur de la conduite ;
- ♦  $\sigma_{ad}$  est la contrainte admissible

Donc est de : **PMS = 108,89 bars**, est la PMS selon la norme ANSI.

**Remarque :** La valeur de la PMS peut être dépassée, et atteindre jusqu'à 10% de plus que sa valeur soit **Pd = 1,10 PMS**.

$$Pd = 119,77 \text{ bars.}$$

#### La norme Algérienne

Si on utilise les règles de sécurité pour les conduites de transport d'hydrocarbures liquides la PMS de la ligne en zone III est calculée selon la relation suivante:

$$P = \frac{20 e l \cdot \sigma_{ad} \cdot x}{D_{ext}}$$

Avec

- ♦  $\sigma_{ad} = \min(K_e \cdot \sigma_e, K_r \cdot \sigma_r)$  contrainte admissible,
- ♦  $e_c = 2 \text{ mm}$  ..... Surépaisseur de corrosion ;
- ♦  $e_l = (e - e_c) \text{ mm}$  ..... Epaisseur corrodée ;
- ♦  $x = 1$  ..... Coefficient égal à 1 pour les tuyaux soudés longitudinalement ;

D'où :

$$\sigma_{ad} = 338,66 \text{ MPa.}$$

On aura donc :

$$\text{PMS} = 86,665 \text{ bars}$$

#### 4.3. Calcul du gradient hydraulique

Le calcul de la charge en chaque un point de la ligne est fait en utilisant les procédures conventionnelles valides pour les hydrocarbures liquides en conditions monophasées comme celle de **DARCY-WEISBACH-COLEBROOCK**.

Pour ce faire, nous avons d'abord commencé par définir les paramètres hydrauliques influents sur l'écoulement et qui sont présentés dans les tableaux suivants :

##### 4.3.1. Données sur le pipeline :

**Tableau III.13 Données sur le Pipeline OH4**

Abréviation	Définition	Unité	Valeurs
/	Type d'acier	/	API 5LX52 SAW
<b>Dn</b>	Diamètre nominal	<b>mm</b>	609,6
<b>e</b>	Epaisseur de la conduite	<b>mm</b>	9,8
$\epsilon$	Rugosité absolue	<b>mm</b>	$4,57 \cdot 10^{-2}$
<b>E</b>	Module de YOUNG	<b>Pa</b>	$2,07 \cdot 10^{11}$
<b>v</b>	Coefficient de poisson	/	0,3
<b>dpt</b>	profondeur d'enfouissement du pipeline	<b>m</b>	1

##### 4.3.2.

##### 4.3.3. Données concernant le fluide :

**Tableau III.14 Données sur le Fluide**

Abréviation	Définition	Unité	Valeurs
/	Type de fluide	/	Pétrole brut
<b>T<sub>1</sub></b>	Température à HBN	<b>°C</b>	30
<b>T<sub>2</sub></b>	Température à HEH	<b>°C</b>	23
$\mu_f$	Viscosité dynamique à 30°C	<b>Pa.s</b>	0,00267
<b>V</b>	Vitesse moyenne de transport du fluide	<b>m/s</b>	1,38
$\mu_2$	Viscosité dynamique à 23°C	<b>Pa.s</b>	0,00312

4.3.4. Caractéristiques des pompes :

**Tableau III.15 Caractéristiques des Pompes**

Abréviation	Définition	Unité	Valeurs
/	Nombre de pompes Booster	/	1
/	Nombre de pompes principales HBN	/	1
<b>Hr<sub>1</sub></b>	Charge nominale (HBN)	<b>m</b>	<b>712</b>
<b>η</b>	Rendement des pompes	<b>%</b>	<b>99,7</b>
<b>Qr</b>	Débit fournit par la pompe	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>1355</b>
<b>Q<sub>n</sub></b>	Débit nominal évacué par l'OH4	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>1354</b>

4.3.5. Courbes Caractéristiques de la Pompe

La courbe modélisée empêche que la pression de refoulement de la pompe dépasse la hauteur limite (Shut-off).

L'équation ci-dessous a été utilisée pour décrire la courbe caractéristique de la pompe centrifuge :

$$H(Q) = a_1 + a_2Q + a_3Q^2$$

Pour pouvoir tracer le courbe caractéristique de la pompe il nous faut résoudre l'équation ci-dessus.

a<sub>1</sub> est la valeur de la charge maximale (pour un débit nul).

On obtient, pour a<sub>1</sub>, le tableau ci-dessous :

**Tableau III.16 Les Valeurs de (a<sub>1</sub>) pour les Différentes Pompes**

	HBN	BOOSTER
<b>a<sub>1</sub></b>	870,00	90,00

Les valeurs de a<sub>2</sub> pour les différentes pompes sont données dans le tableau suivant :

**Tableau III.17 : Les Valeurs de (a2) pour les Différentes Pompes**

	HBN	BOOSTER
<b>a2</b>	0,128	0,001

De même pour les différentes pompes on obtient différentes valeurs de a<sub>3</sub> :

**Tableau III.18 Les Valeurs de (a3) pour les Différentes Pompes**

	HBN	BOOSTER
<b>a3</b>	-0,00013	-0,00001

A partir des résultats obtenus on peut établir les équations caractéristiques des différentes pompes :

$$\begin{cases} H(Q) = 870 + 0.128Q - 0.00013Q^2 \dots\dots\dots(I) \\ H(Q) = 90 + 0.01Q - 0.00001Q^2 \dots\dots\dots(II) \end{cases}$$

Avec :

**(I)** : Représente l'équation caractérisant les pompes de **HBN** ;

**(II)** : Représente l'équation caractérisant les pompes **Boosters** de **HBN**.

#### 4.4. Calcul des pertes de charges

Le calcul des pertes de charges s'effectue en plusieurs étapes :

##### 4.4.1. Calcul de la dénivelée

Il se fait à partir du profil altimétrique qui nous a été fournis par la SONATRACH. Le OH4 étant parallèle à l'OH3 avec une distance de séparation entre les deux pipelines de 3m seulement, il a exactement le même profil en long que le OH3.

Les valeurs du profil en long sont représentées dans le tableau III.11 *Profil en long de l'OH3/OH4*.

Le profil en long est représenté par la figure III.2 *Profil en Long de l'oléoduc OH3/ OH4 – HBN à HEH*.

#### 4.4.2. Calcul des Paramètres Hydrauliques à Température Standard (30°)

##### 1. Calcul du Débit Massique :

$$W_{\text{mass}} = 319,69 \text{ Kg/s}$$

##### 2. Calcul du Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_f \times V \times Di}{\mu_f}$$

On obtient :

$$Re = 2,135 \cdot 10^5$$

##### 3. Calcul du Nombre de Prandtl :

$$Pr = \mu_f \frac{cp_f}{\lambda_f}$$

On obtient :

$$Pr = 41,39$$

##### 4. Calcul du Coefficient de Transfert de Chaleur Interne

Lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite il y a un transfert d'énergie entre le fluide et la paroi et entre la paroi et le sol, ce transfert se fait de trois façons différentes :

- Par conduction entre les matières solides (entre la conduite et le sol)
- Par convection entre les fluides et les solides
- Par rayonnement (émission d'ondes électromagnétiques), ce type de transfert est négligeable dans le cas de conduites souterraines.

La variation de la chaleur du fluide induit une variation de sa masse volumique qui est traduite par l'équation suivante :



$$\rho_i = \rho_{i-1} \left( \frac{T_c - t_i}{T_c - t_{i-1}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$t_i$  : étant la température du fluide en chaque point de l'oléoduc.

Cette variation influe aussi sur la viscosité dynamique du fluide qu'on traduit par l'équation suivante :

$$\mu_j = 10^{[2.2379 - 0.933 \log(t_{j-1})]}$$

Dans ce point on s'intéresse au transfert de chaleur qui se fait entre le fluide et la paroi interne de la conduite. Ce transfert de chaleur est donné par la relation suivante :

$$h_{ti} = 0,023 \times \frac{\lambda_f}{Di} \times (\text{Re})^{0,8} \times (\text{Pr})^n$$

Avec :

$n=0,3$  en cas de perte de chaleur

$n=0,4$  en cas de gain de chaleur

Dans notre cas on a une perte de chaleur, on obtient alors :

$$h_{ti} = 343,8 \text{ w/m}^2\text{c}$$

### 5. Calcul du coefficient de transfert de chaleur externe

C'est le transfert qui se fait entre la paroi externe de la conduite et le sol. Il est donné par la relation suivante :

$$h_{t0} = \left[ \frac{2 \times \frac{\lambda_{sol}}{D_{ext}}}{a \cosh \left( 2 \times \frac{dpt}{D_{ext}} \right)} \right]$$

On obtient :

$$h_{t0} = 1,77 \text{ w/m}^2\text{c}$$

**6. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global:**

$$U = \left( \frac{1}{\frac{1}{h_{t0}} + \frac{1}{h_{ti}} + \frac{e}{\lambda_m}} \right)$$

Avec :

$\frac{e}{\lambda_m}$  : représente le coefficient de transfert de chaleur dans la paroi de la conduite. (Équation de fourrier).

On obtient :

$$U = 1,76 \text{ w/m}^2\text{c}$$

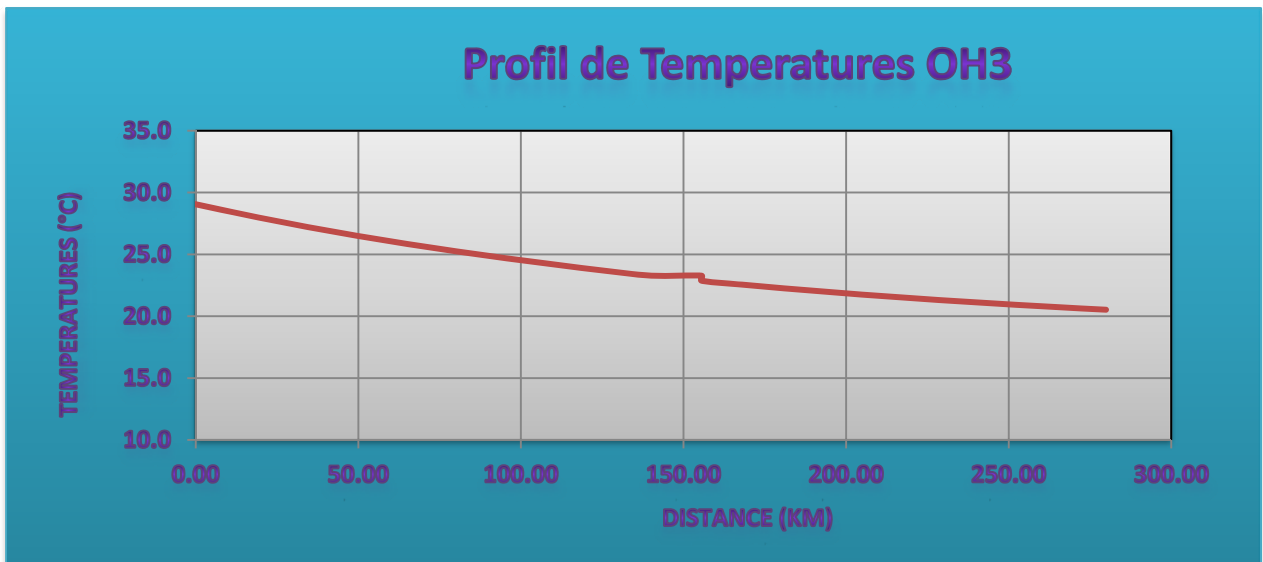
A partir de ces résultats on peut résoudre l'équation ci-dessous

$$t_i = t_{sol} + e^{\left[ t_{i-1} - t_{sol} \right] - \frac{U * \pi * D * l_i}{w * c_{pf}}}$$

Avec

$t_i$  : la température du fluide le long du pipeline

Les résultats qui y découlent sont indiqués dans l'annexe 2 (Calcul du gradient hydraulique OH4). Le profil de température est représenté sur la **figure III.9** ci-dessous.



**Figure III.9 Profil des Températures – OH4**

**7. Calcul de la viscosité dynamique ( $\mu$ )**

$$\mu_j = 10^{[2,2379 - 0,933 \log(t_{j-1})]}$$

Les valeurs de  $\mu_j$  sont indiquées dans l'annexe 2 (Calcul du gradient hydraulique OH4)

**8. Calcul de la masse volumique ( $\rho$ )**

$$\rho_i = \rho_{i-1} \left( \frac{T_c - t_i}{T_c - t_{i-1}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$T_c = 568$  °K, la température critique du pétrole brut.

Les valeurs de  $\rho_i$  sont indiquées dans l'annexe 2 (Calcul du gradient hydraulique OH4)

**9. Calcul du nombre de Reynolds le long de l'oléoduc ( $Re_i$ )**

$$Re_i = \rho_f \cdot V \cdot \frac{D_i}{\mu_i}$$

Les valeurs de  $Re_i$  sont indiquées dans l'annexe 2 (Calcul du gradient hydraulique OH4).

La valeur du coefficient de frottement est calculée suivant l'équation suivante (COLEBROOCK) :

$$\lambda_i = \frac{1,05}{\left[ -2 \text{Log} \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * D} + \frac{2,51}{Re_i * \sqrt{0,4 * Re_i^{-0,3} + 0,0053}} \right) \right]^2}$$

On aura alors

**10. Calcul de la perte de charge**

$$\Delta p_i = \lambda_i * l_i * \rho_f \frac{V^2}{2D} \dots\dots\dots (1')$$

Nous obtiendrons à partir de cette équation des pertes de charges en (Pascal)

La perte de charge en termes de mètres de liquide et en unité métrique:

$$\Delta h_i = \lambda_i \frac{l_i}{D} \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2')$$

On remplace  $V^2$  par  $\frac{Q^2}{S^2}$  dans l'équation (2'), on obtient :

$$\Delta h_i = 8\lambda_i \frac{l_i}{g} \frac{Q^2}{\pi^2 D^5}$$

Les résultats obtenus sont indiqués dans l'annexe 2 (Calcul du gradient hydraulique OH4).

Nous avons aussi considéré les pertes de charges locales (singulières) qui ont été estimés à 8,5% des pertes de charges linéaires.

### 11. Calcul de la charge

L'application de l'équation de Bernoulli généralisée entre deux sections de l'oléoduc nous a permis d'établir la relation suivante :

$$\frac{P_i}{\gamma} = \frac{P_{i-1}}{\gamma} + \Delta h_i + \Delta z_i \dots\dots\dots (3')$$

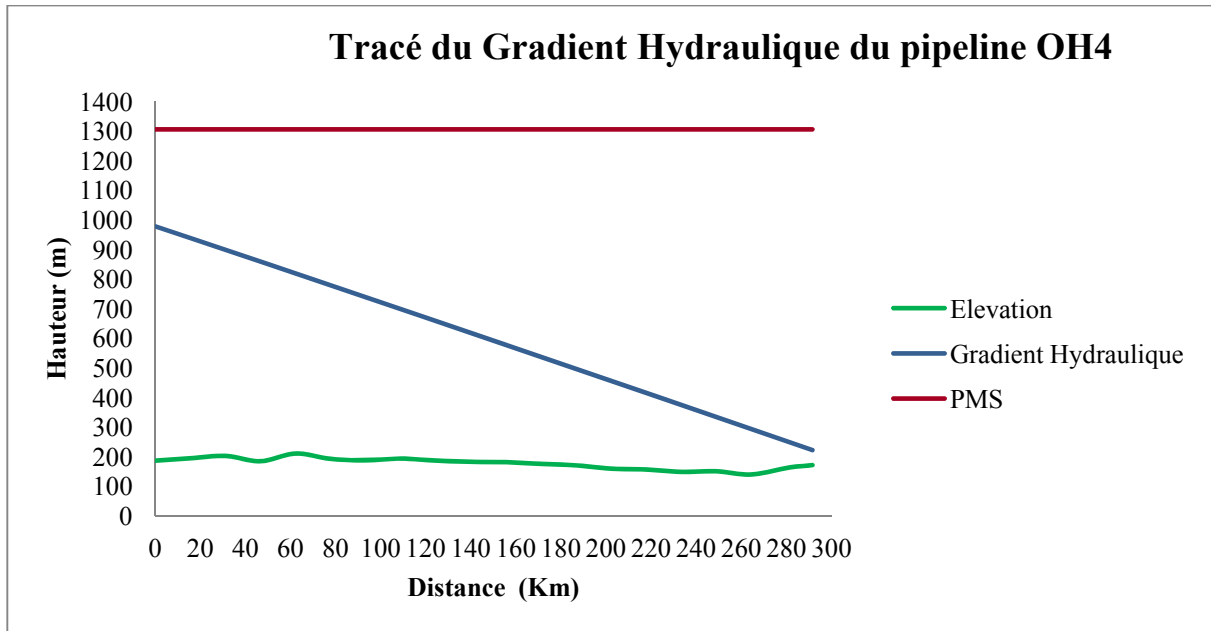
En remplaçant  $\frac{P_i}{\gamma}$  par  $H_i$  on obtient :

$$H_i = H_{i-1} + \Delta h_i + \Delta z_i$$

$H_i$  et  $H_{i-1}$  étant les hauteurs représentatives des pressions.

Les résultats obtenus sont indiqués dans l'annexe 2 (Calcul du gradient hydraulique OH4).

Le gradient hydraulique du pipeline OH4 est représenté dans la **figure (III.10)** ci-dessous.



**Figure III.10 : Tracé du Gradient Hydraulique du pipeline OH4**

**4.4.3. Courbes Caractéristiques de la Conduite**

Après avoir calculé le coefficient de perte de charge ( $\lambda_0$ ), nous pouvons à présent représenter la courbe caractéristique de la ligne dont l'équation s'écrit comme suit :

$$H(Q) = KQ^2 + H_g \dots \dots \dots (4')$$

Avec :

Hg : la hauteur géométrique des bacs (HBN),  $H_g = 187\text{m}$ .

K : la résistance hydraulique de la canalisation donnée par l'équation (5')

$\lambda_0 = 0,0161$ , la valeur moyenne des ( $\lambda_i$ ).

On obtient alors :  $K_0 = 4273,478 \text{ s}^2/\text{m}^5$

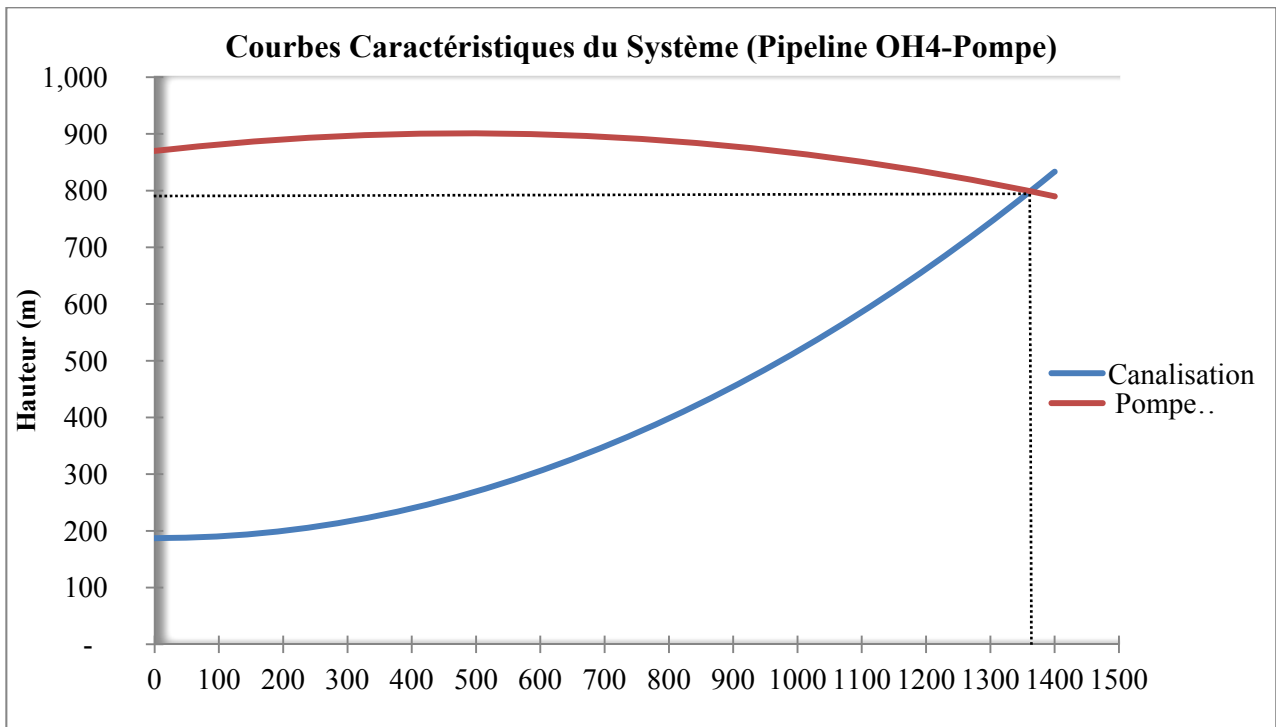
La courbe caractéristique de la ligne (conduite) est donnée par l'équation ci-dessous :

$$H(Q) = 4273,478 Q^2 + 187$$

Pour différentes valeurs du débit (allant de 0 à 1400 m<sup>3</sup>/h) nous avons tracé la courbe caractéristique de la ligne ainsi que celle de la pompe qui sont représentées sur la **figure (III.11)** ci-dessous.

L'intersection entre les deux courbes nous donne le point de fonctionnement, dont le débit et la charge sont respectivement de :

$Q_0 = 1360 \text{ m}^3/\text{h}$  et une hauteur  $H_0 = 791,48 \text{ m}$



**Figure III.1 Courbes Caractéristiques Du Système Pompe Conduite OH4**

## **5. CONCLUSION**

Pour répondre à la problématique de départ, le travail de dimensionnement du pipeline destiné à l'évacuation des quantités supplémentaires de pétrole brut de HBN vers HEH, nous avons trouvé qu'une conduite de 24 pouce de diamètre soit 609,6 mm renforcée d'une pompe au niveau du terminal de départ suffit largement à évacuer le débit considéré.

## **CONCLUSION GENERALE**



## 6. CONCLUSION GENERALE

La problématique posée au départ était de savoir si le réseau de transport de pétrole brut du champ de Hassi Berkine dans sa configuration actuelle pouvait évacuer les quantités produites par ce dernier et de la solution à adopter dans le cas où le réseau ne pourrait pas supporter la production supplémentaire à moyen et long terme.

Des variantes ont été considérées afin de proposer la meilleure solution sur le plan technique et qui soit financièrement intéressante.

Dans notre travail on a reconsidéré la solution retenue par SONATRACH qui consiste en la réalisation d'un nouvel oléoduc OH4 de même dimension que le OH3 et qui doit passer par la station de pompage intermédiaire de Nezla, et on a essayé de la recalculer afin d'en proposer une qui soit plus adaptée au besoin émis en terme de quantités à évacuer.

Au fur et à mesure de notre étude et tenant compte des conditions de départ et d'arrivée du pipeline OH4, des estimations des quantités à évacuer et en utilisant un outil de calcul puissant "PIPEPAHSE" adapté à ce type d'installation, nous avons pu démontrer qu'un oléoduc d'un diamètre de 24" renforcé d'une seule pompe au niveau de la station de pompage du terminal de départ HBN et dont la caractéristique a été tracée dans le **Chapitre III**, aurait amplement suffi pour l'évacuation des quantités de brut considérées.

Cela nous a aussi permis de constater que l'installation existante est nettement surdimensionnée par rapport aux quantités à évacuer. Les seuls arguments qu'on a obtenu de la SH et qui à notre sens et au leur reste insuffisants, sont que les prévisions de production faites à l'époque ont été surestimées et que des coefficients de sécurité trop importants sans pour autant être justifiées ont été considérés dans les calculs.

Toutefois la technique d'Injection d'additifs réducteur de trainée (Drag Reducers Additives, **DRA**) avec une concentration de quelques parties par million, qui est une technique récente, s'avère donner des gains en débit de l'ordre de 30% sans même changer les installations du réseau, a été mise en œuvre par la SONATRACH sur le OH3 et les résultats obtenus ont été très satisfaisant et ont permis l'évacuation des quantités supplémentaires jusqu'à ce que le OH4 soit mis en service.

Cependant cette solution atteint ses limites d'efficacité assez rapidement et son application sur le long terme reste très onéreuse.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## BIBLIOGRAPHIE

**Christine TRAVERS** *Directrice du centre raffinage, pétrochimie, gaz IFP School, Rueil Malmaison & Eric TOCQUÉ* *Responsable du programme énergie et procédés IFP School, Rueil Malmaison France.* « **PETROLE** » Editions Techniques de l'ingénieur 2008, 98 Pages. **Article** [BE 8 520].

**John M. Gerez & Archie R. Pick**, - 1ere Conference Internationale du Transport par Canalisations - Volume 2 – **9 au 13 Juin** 1996 - Calgary, Alberta, Canada - «**Heavy Oil Transportation By Pipeline** » – Papier N ASME 1996 IPC1996-1875.

**Alain Maire**, **Le Transport Par Pipeline - aspects économiques et environnementaux :** transport des pétroles bruts, Paris : Éditions Technip, 2011. 303 pages. **ISBN** 9782710809531 2710809532.

**Vincent-Genod Jacques**, «**Fundamentals Of Pipeline Engineering** », Éditions Technip Janvier 1984, 210 Pages. **ISBN** : 9782710804666.

**STRC- Revue N° 42 (2010)**, Document interne de l'Activité de Transport Par Canalisations - SONATRACH,

**STRC - Revue N° 33 (2002)**, Document interne de l'Activité de Transport Par Canalisations- SONATRACH,

**STRC** (2011), Fiche Technique STC **Pétrole Brut OH3 / OH4** - HBK-HEH. Document interne de l'Activité de Transport Par Canalisations- SONATRACH,

M<sup>me</sup> **Saadia BENMAMAR** Cours « **Hydraulique Générale et Appliquée** », Ecole Nationale Polytechnique – 2009.

**Logiciel PIPEPHASE** Pipeline Network Design simulation software **version 9.1** - Keyword Manual & Application, Invensys; 2006.

**Amar BENMOUNAH**. «**Transmission Pipeline Design, Construction and Operation** » Centre de développement et d'application des techniques pétrolières et gazières de Hassi-Messaoud ; Institut Algerien du Pétrole ; Ecole de Boumerdes, 2007.

**Benjamin HERZHAFT**, « **Additifs Réducteurs De Perte De Charge En Ecoulement** » Rev. IFP, Vol. 55 (2000), No. 5, pp. 501-509. Paris - Éditions Technip 2000. 9p

**Michel CARLIER**, « **Hydraulique Générale et Appliquée** » ; Paris ; Eyrolles, EDF.1998. 582p. Collection « **Direction des études et recherches d'Electricité de France (EDF)** » ; **ISBN13** : 978-2-212-01545-4.

**M. O. BELHADJ** Cours de « **Machines Hydraulique** » – Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

**M. Y. MOULOUDI** Cours « **Asservissement** » ; Ecole Nationale Polytechnique ; 2008.

# **ANNEXE 1**

OH3 - Diametre 741,38mm

Vitesse d'ecoulement 2,12 m/s

HBN	Pk 0	DL	Distances	Elevation	dh	T	ρj	μj	Vj	Re	λ	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
				187,00	- 7,60									971,45	76,19249706	1 028,50
	1			187,00	- 7,60									798,78	62,65	1 020,90
1-2	2	1 080,01	1 080,00	179,40	11,37	30,00	800,00	2,71	2,12	464 919,71	0,01419	14 930,12	1,90	804,48	63,10	1 032,27
2-3	3	1 080,06	1 080,00	190,77	8,64	29,97	800,03	2,71	2,12	464 642,18	0,01419	14 932,60	1,90	791,20	62,06	1 040,91
3-4	4	1 080,03	1 080,00	199,41	- 5,72	29,93	800,07	2,71	2,12	464 365,35	0,01419	14 934,10	1,90	780,66	61,24	1 035,19
4-5	5	1 080,02	1 080,00	193,69	- 10,17	29,90	800,10	2,72	2,12	464 089,25	0,01420	14 935,68	1,90	784,48	61,54	1 025,02
5-6	6	1 080,05	1 080,00	183,52	15,70	29,87	800,13	2,72	2,12	463 813,86	0,01420	14 937,97	1,90	792,74	62,19	1 040,72
6-7	7	1 080,11	1 080,00	199,22	- 11,37	29,84	800,16	2,72	2,12	463 539,17	0,01420	14 940,72	1,90	775,14	60,81	1 029,35
7-8	8	1 080,06	1 080,00	187,85	6,69	29,81	800,20	2,72	2,12	463 265,18	0,01420	14 941,81	1,90	784,61	61,56	1 036,04
8-9	9	1 080,02	1 080,00	194,54	- 2,96	29,77	800,23	2,72	2,12	462 991,91	0,01420	14 943,09	1,90	776,01	60,88	1 033,08
9-10	10	1 080,00	1 080,00	191,58	- 2,40	29,74	800,26	2,72	2,12	462 719,35	0,01420	14 944,69	1,90	777,07	60,97	1 030,68
10-11	11	1 080,00	1 080,00	189,18	0,44	29,71	800,29	2,73	2,12	462 447,51	0,01420	14 946,49	1,90	777,57	61,01	1 031,12
12-13	12	1 080,00	1 080,00	189,62	1,25	29,68	800,32	2,73	2,12	462 176,36	0,01420	14 948,27	1,90	775,22	60,83	1 032,37
13-14	13	1 080,00	1 080,00	190,87	- 5,65	29,65	800,36	2,73	2,12	461 905,92	0,01420	14 950,10	1,90	772,07	60,58	1 026,72
14-15	14	1 080,01	1 080,00	185,22	13,08	29,61	800,39	2,73	2,12	461 636,18	0,01421	14 952,10	1,90	775,81	60,88	1 039,80
15-16	15	1 080,08	1 080,00	198,30	2,17	29,58	800,42	2,73	2,12	461 367,12	0,01421	14 954,80	1,90	760,83	59,71	1 041,97
16-17	16	1 080,00	1 080,00	200,47	- 18,03	29,55	800,45	2,73	2,12	461 098,75	0,01421	14 955,54	1,90	756,75	59,39	1 023,94
17-18	17	1 080,15	1 080,00	182,44	6,81	29,52	800,48	2,74	2,12	460 831,09	0,01421	14 959,39	1,90	772,88	60,66	1 030,75
18-19	18	1 080,02	1 080,00	189,25	3,39	29,49	800,52	2,74	2,12	460 564,09	0,01421	14 959,40	1,90	764,16	59,98	1 034,14
19-20	19	1 080,01	1 080,00	192,64	9,67	29,46	800,55	2,74	2,12	460 297,81	0,01421	14 960,97	1,91	758,87	59,56	1 043,81
20-21	20	1 080,04	1 080,00	202,31	- 0,91	29,43	800,58	2,74	2,12	460 032,22	0,01421	14 963,29	1,91	747,29	58,66	1 042,90
21-22	21	1 080,00	1 080,00	201,40	- 11,96	29,39	800,61	2,74	2,12	459 767,31	0,01421	14 964,48	1,91	746,30	58,58	1 030,94
22-23	22	1 080,07	1 080,00	189,44	15,72	29,36	800,64	2,74	2,12	459 503,10	0,01421	14 967,17	1,91	756,35	59,37	1 046,66
23-24	23	1 080,11	1 080,00	205,16	- 17,99	29,33	800,67	2,75	2,12	459 239,55	0,01422	14 969,62	1,91	738,73	57,99	1 028,67
24-25	24	1 080,15	1 080,00	187,17	10,64	29,30	800,70	2,75	2,12	458 976,68	0,01422	14 971,88	1,91	754,81	59,26	1 039,31
25-26	25	1 080,05	1 080,00	197,81	- 4,33	29,27	800,73	2,75	2,12	458 714,47	0,01422	14 972,31	1,91	742,27	58,27	1 034,98
26-27	26	1 080,01	1 080,00	193,48	3,84	29,24	800,76	2,75	2,12	458 452,97	0,01422	14 973,47	1,91	744,69	58,47	1 038,82
27-28	27	1 080,01	1 080,00	197,32	- 7,52	29,21	800,79	2,75	2,12	458 192,16	0,01422	14 975,20	1,91	738,94	58,02	1 031,30
28-29	28	1 080,03	1 080,00	189,80	14,52	29,18	800,83	2,75	2,12	457 932,02	0,01422	14 977,23	1,91	744,56	58,46	1 045,82
29-30	29	1 080,10	1 080,00	204,32	- 1,07	29,15	800,86	2,76	2,12	457 672,55	0,01422	14 979,98	1,91	728,13	57,17	1 044,75
30-31	30	1 080,00	1 080,00	203,25	8,13	29,12	800,89	2,76	2,12	457 413,74	0,01422	14 980,38	1,91	727,29	57,11	1 052,88
31-32	31	1 080,03	1 080,00	211,38	- 11,04	29,09	800,92	2,76	2,12	457 155,62	0,01423	14 982,55	1,91	717,26	56,32	1 041,84
32-33	32	1 080,06	1 080,00	200,34	3,18	29,06	800,95	2,76	2,12	456 898,16	0,01423	14 984,65	1,91	726,39	57,04	1 045,02
33-34	33	1 080,00	1 080,00	203,52	2,10	29,03	800,98	2,76	2,12	456 641,36	0,01423	14 985,68	1,91	721,30	56,64	1 047,12
34-35	34	1 080,00	1 080,00	205,62	- 14,10	29,00	801,01	2,76	2,12	456 385,24	0,01423	14 987,38	1,91	717,30	56,33	1 033,02
35-36	35	1 080,09	1 080,00	191,52	4,15	28,97	801,04	2,77	2,12	456 129,78	0,01423	14 990,36	1,91	729,49	57,29	1 037,17
36-37	36	1 080,01	1 080,00	195,67	- 12,35	28,94	801,07	2,77	2,12	455 874,97	0,01423	14 990,93	1,91	723,43	56,82	1 024,82
37-38	37	1 080,07	1 080,00	183,32	6,50	28,91	801,10	2,77	2,12	455 620,83	0,01423	14 993,52	1,91	733,87	57,64	1 031,32
38-39	38	1 080,02	1 080,00	189,82	- 0,70	28,88	801,13	2,77	2,12	455 367,34	0,01423	14 994,54	1,91	725,46	56,98	1 030,62
39-40	39	1 080,00	1 080,00	189,12	6,96	28,85	801,16	2,77	2,12	455 114,52	0,01423	14 995,99	1,91	724,26	56,89	1 037,58
40-41	40	1 080,02	1 080,00	196,08	- 6,86	28,82	801,19	2,77	2,12	454 862,36	0,01424	14 998,02	1,91	715,39	56,19	1 030,72
41-42	41	1 080,02	1 080,00	189,22	7,53	28,79	801,22	2,78	2,12	454 610,85	0,01424	14 999,72	1,91	720,34	56,59	1 038,25
42-43	42	1 080,03	1 080,00	196,75	- 9,62	28,76	801,25	2,78	2,12	454 359,99	0,01424	15 001,49	1,91	710,90	55,85	1 028,63
43-44	43	1 080,04	1 080,00	187,13	6,60	28,73	801,28	2,78	2,12	454 109,78	0,01424	15 003,43	1,91	718,61	56,45	1 035,23
44-45	44	1 080,02	1 080,00	193,73	- 8,22	28,70	801,30	2,78	2,12	453 860,22	0,01424	15 004,82	1,91	710,10	55,79	1 027,01
45-46	45	1 080,03	1 080,00	185,51	6,87	28,67	801,33	2,78	2,12	453 611,31	0,01424	15 006,67	1,91	716,41	56,29	1 033,88
46-47	46	1 080,02	1 080,00	192,38	- 8,29	28,64	801,36	2,78	2,12	453 363,04	0,01424	15 008,23	1,91	707,64	55,60	1 025,59
47-48	47	1 080,03	1 080,00	184,09	3,38	28,61	801,39	2,79	2,12	453 115,42	0,01424	15 010,06	1,91	714,02	56,10	1 028,97
48-49	48	1 080,01	1 080,00	187,47	8,86	28,59	801,42	2,79	2,12	452 868,44	0,01424	15 011,38	1,91	708,73	55,69	1 037,83
49-50	49	1 080,04	1 080,00	196,33	- 2,00	28,56	801,45	2,79	2,12	452 622,11	0,01424	15 013,50	1,91	697,96	54,84	1 035,83
50-51	50	1 080,00	1 080,00	194,33	3,19	28,53	801,48	2,79	2,12	452 376,41	0,01425	15 014,70	1,91	698,05	54,85	1 039,02

HBN	Pk 0	DL	Distances	Elevation	dh	T	$\rho_j$	$\mu_j$	Vj	Re	$\lambda$	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
51-52	51	1 080,00	1 080,00	197,52	- 14,09	28,50	801,51	2,79	2,12	452 131,36	0,01425	15 016,42	1,91	692,95	54,45	1 024,93
52-53	52	1 080,09	1 080,00	183,43	0,63	28,47	801,54	2,79	2,12	451 886,94	0,01425	15 019,31	1,91	705,13	55,41	1 025,56
53-54	53	1 080,00	1 080,00	184,06	- 0,29	28,44	801,56	2,80	2,12	451 643,14	0,01425	15 019,70	1,91	702,59	55,21	1 025,27
54-55	54	1 080,00	1 080,00	183,77	8,40	28,41	801,59	2,80	2,12	451 399,99	0,01425	15 021,37	1,91	700,97	55,09	1 033,67
55-56	55	1 080,03	1 080,00	192,17	7,63	28,39	801,62	2,80	2,12	451 157,47	0,01425	15 023,48	1,91	690,66	54,28	1 041,30
56-57	56	1 080,03	1 080,00	199,80	- 0,56	28,36	801,65	2,80	2,12	450 915,58	0,01425	15 025,07	1,91	681,12	53,53	1 040,74
57-58	57	1 080,00	1 080,00	199,24	9,30	28,33	801,68	2,80	2,12	450 674,32	0,01425	15 026,35	1,91	679,77	53,43	1 050,04
58-59	58	1 080,04	1 080,00	208,54	- 16,90	28,30	801,71	2,80	2,12	450 433,68	0,01425	15 028,56	1,91	668,55	52,55	1 033,14
59-60	59	1 080,13	1 080,00	191,64	- 2,09	28,27	801,73	2,80	2,12	450 193,67	0,01426	15 031,49	1,91	683,54	53,73	1 031,05
60-61	60	1 080,00	1 080,00	189,55	18,74	28,24	801,76	2,81	2,12	449 954,26	0,01426	15 031,33	1,91	683,72	53,75	1 049,79
61-62	61	1 080,16	1 080,00	208,29	- 8,18	28,22	801,79	2,81	2,12	449 715,50	0,01426	15 035,20	1,91	663,07	52,12	1 041,61
62-63	62	1 080,03	1 080,00	200,11	- 0,34	28,19	801,82	2,81	2,12	449 477,33	0,01426	15 035,01	1,91	669,34	52,62	1 041,27
63-64	63	1 080,00	1 080,00	199,77	- 9,13	28,16	801,85	2,81	2,12	449 239,81	0,01426	15 036,22	1,91	667,77	52,50	1 032,14
64-65	64	1 080,04	1 080,00	190,64	5,31	28,13	801,87	2,81	2,12	449 002,91	0,01426	15 038,39	1,91	674,99	53,07	1 037,45
65-66	65	1 080,01	1 080,00	195,95	- 3,31	28,11	801,90	2,81	2,12	448 766,62	0,01426	15 039,66	1,91	667,76	52,50	1 034,14
66-67	66	1 080,01	1 080,00	192,64	8,91	28,08	801,93	2,82	2,12	448 530,94	0,01426	15 041,17	1,91	669,16	52,61	1 043,05
67-68	67	1 080,04	1 080,00	201,55	- 14,13	28,05	801,96	2,82	2,12	448 295,89	0,01426	15 043,24	1,91	658,34	51,76	1 028,92
68-69	68	1 080,09	1 080,00	187,42	8,83	28,02	801,98	2,82	2,12	448 061,44	0,01427	15 045,63	1,91	670,56	52,72	1 037,75
69-70	69	1 080,04	1 080,00	196,25	- 8,40	28,00	802,01	2,82	2,12	447 827,58	0,01427	15 046,46	1,91	659,82	51,88	1 029,35
70-71	70	1 080,03	1 080,00	187,85	0,60	27,97	802,04	2,82	2,12	447 594,35	0,01427	15 048,03	1,91	666,30	52,39	1 029,95
71-72	71	1 080,00	1 080,00	188,45	2,18	27,94	802,07	2,82	2,12	447 361,73	0,01427	15 049,18	1,91	663,79	52,20	1 032,13
72-73	72	1 080,00	1 080,00	190,63	- 1,48	27,92	802,09	2,83	2,12	447 129,72	0,01427	15 050,82	1,91	659,70	51,88	1 030,65
73-74	73	1 080,00	1 080,00	189,15	- 0,70	27,89	802,12	2,83	2,12	446 898,31	0,01427	15 052,40	1,91	659,26	51,85	1 029,95
74-75	74	1 080,00	1 080,00	188,45	2,92	27,86	802,15	2,83	2,12	446 667,51	0,01427	15 053,99	1,91	658,05	51,75	1 032,87
75-76	75	1 080,00	1 080,00	191,37	2,28	27,83	802,17	2,83	2,12	446 437,30	0,01427	15 055,64	1,91	653,22	51,37	1 035,15
76-77	76	1 080,00	1 080,00	193,65	1,40	27,81	802,20	2,83	2,12	446 207,70	0,01427	15 057,21	1,91	649,02	51,05	1 036,55
77-78	77	1 080,00	1 080,00	195,05	- 8,97	27,78	802,23	2,83	2,12	445 978,70	0,01427	15 058,78	1,91	645,71	50,79	1 027,58
78-79	78	1 080,04	1 080,00	186,08	2,82	27,75	802,25	2,83	2,12	445 750,29	0,01428	15 060,87	1,91	652,77	51,34	1 030,40
79-80	79	1 080,00	1 080,00	188,90	3,50	27,73	802,28	2,84	2,12	445 522,47	0,01428	15 061,98	1,91	648,03	50,97	1 033,90
80-81	80	1 080,01	1 080,00	192,40	2,36	27,70	802,31	2,84	2,12	445 295,25	0,01428	15 063,59	1,91	642,62	50,55	1 036,26
81-82	81	1 080,00	1 080,00	194,76	1,30	27,67	802,33	2,84	2,12	445 068,62	0,01428	15 065,12	1,91	638,35	50,21	1 037,56
82-83	82	1 080,00	1 080,00	196,06	1,49	27,65	802,36	2,84	2,12	444 842,58	0,01428	15 066,67	1,91	635,13	49,96	1 039,05
83-84	83	1 080,00	1 080,00	197,55	- 6,81	27,62	802,39	2,84	2,12	444 617,14	0,01428	15 068,24	1,91	631,73	49,70	1 032,24
84-85	84	1 080,02	1 080,00	190,74	- 4,19	27,60	802,41	2,84	2,12	444 392,28	0,01428	15 070,09	1,91	636,62	50,08	1 028,05
85-86	85	1 080,01	1 080,00	186,55	1,41	27,57	802,44	2,85	2,12	444 168,00	0,01428	15 071,46	1,91	638,90	50,26	1 029,46
86-87	86	1 080,00	1 080,00	187,96	6,50	27,54	802,46	2,85	2,12	443 944,31	0,01428	15 072,92	1,91	635,57	50,00	1 035,96
87-88	87	1 080,02	1 080,00	194,46	- 6,68	27,52	802,49	2,85	2,12	443 721,21	0,01428	15 074,74	1,91	627,16	49,34	1 029,28
88-89	88	1 080,02	1 080,00	187,78	- 1,28	27,49	802,52	2,85	2,12	443 498,69	0,01429	15 076,30	1,92	631,92	49,72	1 028,00
89-90	89	1 080,00	1 080,00	186,50	- 0,05	27,47	802,54	2,85	2,12	443 276,74	0,01429	15 077,57	1,92	631,29	49,67	1 027,95
90-91	90	1 080,00	1 080,00	186,45	6,12	27,44	802,57	2,85	2,12	443 055,38	0,01429	15 079,11	1,92	629,42	49,53	1 034,07
91-92	91	1 080,02	1 080,00	192,57	- 6,10	27,41	802,59	2,85	2,12	442 834,60	0,01429	15 080,89	1,92	621,39	48,90	1 027,97
92-93	92	1 080,02	1 080,00	186,47	- 0,11	27,39	802,62	2,86	2,12	442 614,39	0,01429	15 082,43	1,92	625,57	49,23	1 027,86
93-94	93	1 080,00	1 080,00	186,36	5,41	27,36	802,64	2,86	2,12	442 394,75	0,01429	15 083,72	1,92	623,77	49,09	1 033,27
94-95	94	1 080,01	1 080,00	191,77	- 4,60	27,34	802,67	2,86	2,12	442 175,69	0,01429	15 085,45	1,92	616,44	48,51	1 028,67
95-96	95	1 080,01	1 080,00	187,17	0,73	27,31	802,70	2,86	2,12	441 957,20	0,01429	15 086,92	1,92	619,13	48,72	1 029,40
96-97	96	1 080,00	1 080,00	187,90	- 1,45	27,29	802,72	2,86	2,12	441 739,28	0,01429	15 088,31	1,92	616,48	48,52	1 027,95
97-98	97	1 080,00	1 080,00	186,45	0,42	27,26	802,75	2,86	2,12	441 521,93	0,01429	15 089,85	1,92	616,01	48,48	1 028,37
98-99	98	1 080,00	1 080,00	186,87	0,60	27,24	802,77	2,87	2,12	441 305,15	0,01430	15 091,35	1,92	613,68	48,30	1 028,97
99-100	99	1 080,00	1 080,00	187,47	1,48	27,21	802,80	2,87	2,12	441 088,94	0,01430	15 092,87	1,92	611,16	48,10	1 030,45
100-101	100	1 080,00	1 080,00	188,95	- 0,31	27,19	802,82	2,87	2,12	440 873,29	0,01430	15 094,39	1,92	607,76	47,84	1 030,14
101-102	101	1 080,00	1 080,00	188,64	- 0,72	27,16	802,85	2,87	2,12	440 658,21	0,01430	15 095,89	1,92	606,16	47,71	1 029,42
102-103	102	1 080,00	1 080,00	187,92	3,55	27,14	802,87	2,87	2,12	440 443,68	0,01430	15 097,40	1,92	604,96	47,62	1 032,97
103-104	103	1 080,01	1 080,00	191,47	1,20	27,11	802,90	2,87	2,12	440 229,72	0,01430	15 098,98	1,92	599,49	47,19	1 034,17
104-105	104	1 080,00	1 080,00	192,67	0,63	27,09	802,92	2,87	2,12	440 016,32	0,01430	15 100,41	1,92	596,38	46,95	1 034,80

<b>HBN</b>	<b>Pk 0</b>	<b>DL</b>	<b>Distances</b>	<b>Elevation</b>	<b>dh</b>	<b>T</b>	<b>ρj</b>	<b>μj</b>	<b>Vj</b>	<b>Re</b>	<b>λ</b>	<b>dpi (Pa)</b>	<b>dpi (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>H (bar)</b>	<b>PMS(m)</b>
105-106	105	1 080,00	1 080,00	193,30	- 5,28	27,06	802,95	2,88	2,12	439 803,47	0,01430	15 101,90	1,92	593,83	46,75	1 029,52
106-107	106	1 080,01	1 080,00	188,02	- 1,24	27,04	802,97	2,88	2,12	439 591,18	0,01430	15 103,57	1,92	597,19	47,01	1 028,28
107-108	107	1 080,00	1 080,00	186,78	0,99	27,01	802,99	2,88	2,12	439 379,45	0,01430	15 104,89	1,92	596,51	46,96	1 029,27
108-109	108	1 080,00	1 080,00	187,77	5,58	26,99	803,02	2,88	2,12	439 168,27	0,01431	15 106,37	1,92	593,61	46,73	1 034,85
109-110	109	1 080,01	1 080,00	193,35	7,03	26,96	803,04	2,88	2,12	438 957,64	0,01431	15 108,05	1,92	586,11	46,15	1 041,88
110-111	110	1 080,02	1 080,00	200,38	- 5,58	26,94	803,07	2,88	2,12	438 747,56	0,01431	15 109,65	1,92	577,16	45,44	1 036,30
111-112	111	1 080,01	1 080,00	194,80	- 1,12	26,92	803,09	2,88	2,12	438 538,03	0,01431	15 111,01	1,92	580,82	45,73	1 035,18
112-113	112	1 080,00	1 080,00	193,68	- 3,61	26,89	803,12	2,89	2,12	438 329,05	0,01431	15 112,29	1,92	580,02	45,67	1 031,57
113-114	113	1 080,01	1 080,00	190,07	- 0,73	26,87	803,14	2,89	2,12	438 120,61	0,01431	15 113,83	1,92	581,72	45,81	1 030,84
114-115	114	1 080,00	1 080,00	189,34	- 0,76	26,84	803,16	2,89	2,12	437 912,72	0,01431	15 115,22	1,92	580,53	45,71	1 030,08
115-116	115	1 080,00	1 080,00	188,58	- 1,50	26,82	803,19	2,89	2,12	437 705,38	0,01431	15 116,68	1,92	579,37	45,62	1 028,58
116-117	116	1 080,00	1 080,00	187,08	1,45	26,79	803,21	2,89	2,12	437 498,58	0,01431	15 118,16	1,92	578,95	45,59	1 030,03
117-118	117	1 080,00	1 080,00	188,53	- 1,77	26,77	803,24	2,89	2,12	437 292,32	0,01431	15 119,61	1,92	575,58	45,33	1 028,26
118-119	118	1 080,00	1 080,00	186,76	2,75	26,75	803,26	2,89	2,12	437 086,60	0,01432	15 121,07	1,92	575,43	45,32	1 031,01
119-120	119	1 080,00	1 080,00	189,51	- 0,87	26,72	803,28	2,90	2,12	436 881,42	0,01432	15 122,55	1,92	570,76	44,95	1 030,14
120-121	120	1 080,00	1 080,00	188,64	0,25	26,70	803,31	2,90	2,12	436 676,78	0,01432	15 123,96	1,92	569,71	44,87	1 030,39
121-122	121	1 080,00	1 080,00	188,89	- 0,04	26,68	803,33	2,90	2,12	436 472,67	0,01432	15 125,40	1,92	567,55	44,70	1 030,35
122-123	122	1 080,00	1 080,00	188,85	- 0,68	26,65	803,36	2,90	2,12	436 269,10	0,01432	15 126,84	1,92	565,67	44,55	1 029,67
123-124	123	1 080,00	1 080,00	188,17	- 0,09	26,63	803,38	2,90	2,12	436 066,06	0,01432	15 128,28	1,92	564,43	44,46	1 029,58
124-125	124	1 080,00	1 080,00	188,08	0,05	26,60	803,40	2,90	2,12	435 863,55	0,01432	15 129,72	1,92	562,60	44,31	1 029,63
125-126	125	1 080,00	1 080,00	188,13	1,32	26,58	803,43	2,90	2,12	435 661,57	0,01432	15 131,15	1,92	560,63	44,16	1 030,95
126-127	126	1 080,00	1 080,00	189,45	- 2,36	26,56	803,45	2,91	2,12	435 460,12	0,01432	15 132,59	1,92	557,39	43,91	1 028,59
127-128	127	1 080,00	1 080,00	187,09	- 1,10	26,53	803,47	2,91	2,12	435 259,20	0,01432	15 134,04	1,92	557,83	43,94	1 027,49
128-129	128	1 080,00	1 080,00	185,99	0,59	26,51	803,50	2,91	2,12	435 058,81	0,01432	15 135,44	1,92	557,01	43,88	1 028,08
129-130	129	1 080,00	1 080,00	186,58	- 1,51	26,49	803,52	2,91	2,12	434 858,94	0,01433	15 136,85	1,92	554,50	43,68	1 026,57
130-131	130	1 080,00	1 080,00	185,07	0,56	26,46	803,54	2,91	2,12	434 659,59	0,01433	15 138,28	1,92	554,09	43,65	1 027,13
131-132	131	1 080,00	1 080,00	185,63	- 0,52	26,44	803,56	2,91	2,12	434 460,77	0,01433	15 139,68	1,92	551,61	43,46	1 026,61
132-133	132	1 080,00	1 080,00	185,11	1,01	26,42	803,59	2,91	2,12	434 262,47	0,01433	15 141,10	1,92	550,20	43,35	1 027,62
133-134	133	1 080,00	1 080,00	186,12	- 1,84	26,40	803,61	2,92	2,12	434 064,68	0,01433	15 142,51	1,92	547,27	43,12	1 025,78
134-135	134	1 080,00	1 080,00	184,28	- 0,97	26,37	803,63	2,92	2,12	433 867,42	0,01433	15 143,93	1,92	547,19	43,11	1 024,81
135-136	135	1 080,00	1 080,00	183,31	0,34	26,35	803,66	2,92	2,12	433 670,68	0,01433	15 145,32	1,92	546,24	43,04	1 025,15
136-137	136	1 080,00	1 080,00	183,65	- 0,60	26,33	803,68	2,92	2,12	433 474,45	0,01433	15 146,71	1,92	543,98	42,86	1 024,55
137-138	137	1 080,00	1 080,00	183,05	0,46	26,30	803,70	2,92	2,12	433 278,73	0,01433	15 148,11	1,92	542,66	42,76	1 025,01
138-139	138	1 080,00	1 080,00	183,51	- 1,10	26,28	803,72	2,92	2,12	433 083,53	0,01433	15 149,50	1,92	540,28	42,57	1 023,91
139-140	139	1 080,00	1 080,00	182,41	1,30	26,26	803,75	2,92	2,12	432 888,84	0,01433	15 150,89	1,92	539,46	42,51	1 025,21
140-141	140	1 080,00	1 080,00	183,71	- 0,31	26,24	803,77	2,93	2,12	432 694,66	0,01434	15 152,28	1,92	536,23	42,26	1 024,90
141-142	141	1 080,00	1 080,00	183,40	0,02	26,21	803,79	2,93	2,12	432 500,99	0,01434	15 153,66	1,92	534,62	42,13	1 024,92
142-143	142	1 080,00	1 080,00	183,42	0,33	26,19	803,81	2,93	2,12	432 307,83	0,01434	15 155,04	1,92	532,68	41,98	1 025,25
143-144	143	1 080,00	1 080,00	183,75	- 0,30	26,17	803,84	2,93	2,12	432 115,18	0,01434	15 156,42	1,92	530,43	41,80	1 024,95
144-145	144	1 080,00	1 080,00	183,45	- 1,44	26,15	803,86	2,93	2,12	431 923,03	0,01434	15 157,79	1,92	528,81	41,68	1 023,51
145-146	145	1 080,00	1 080,00	182,01	1,20	26,13	803,88	2,93	2,12	431 731,38	0,01434	15 159,18	1,92	528,32	41,64	1 024,71
146-147	146	1 080,00	1 080,00	183,21	- 0,80	26,10	803,90	2,93	2,12	431 540,24	0,01434	15 160,54	1,92	525,20	41,39	1 023,91
147-148	147	1 080,00	1 080,00	182,41	1,40	26,08	803,92	2,94	2,12	431 349,60	0,01434	15 161,90	1,92	524,08	41,31	1 025,31
148-149	148	1 080,00	1 080,00	183,81	1,10	26,06	803,95	2,94	2,12	431 159,46	0,01434	15 163,27	1,92	520,76	41,05	1 026,41
149-150	149	1 080,00	1 080,00	184,91	- 2,00	26,04	803,97	2,94	2,12	430 969,82	0,01434	15 164,63	1,92	517,73	40,81	1 024,41
150-151	150	1 080,00	1 080,00	182,91	0,22	26,02	803,99	2,94	2,12	430 780,68	0,01434	15 166,00	1,92	517,81	40,82	1 024,63
151-152	151	1 080,00	1 080,00	183,13	0,39	25,99	804,01	2,94	2,12	430 592,04	0,01435	15 167,33	1,92	515,67	40,65	1 025,02
152-153	152	1 080,00	1 080,00	183,52	- 1,11	25,97	804,03	2,94	2,12	430 403,89	0,01435	15 168,68	1,92	513,36	40,47	1 023,91
153-154	153	1 080,00	1 080,00	182,41	- 0,72	25,95	804,05	2,94	2,12	430 216,23	0,01435	15 170,04	1,92	512,54	40,40	1 023,19
154-155	154	1 080,00	1 080,00	181,69	- 0,19	25,93	804,08	2,95	2,12	430 029,07	0,01435	15 171,38	1,92	511,34	40,31	1 023,00
155-156	155,5	1 620,00	1 620,00	181,50	-	25,91	804,10	2,95	2,12	429 842,40	0,01435	22 759,07	2,89	508,64	40,10	1 023,00
<b>NZL</b>	155,6	108,00	108,00	181,50	- 0,90	25,87	804,13	2,95	2,12	429 563,32	0,01435	1 517,47	0,19	508,45	40,08	1 022,10
156a-157	156	432,00	432,00	180,60	1,12	25,87	804,13	2,95	2,12	429 544,75	0,01435	6 069,96	0,77	508,58	40,10	1 023,22
157-158	157	1 080,00	1 080,00	181,72	- 2,03	25,86	804,14	2,95	2,12	429 470,53	0,01435	15 175,40	1,92	505,54	39,86	1 021,19

HBN	Pk 0	DL	Distances	Elevation	dh	T	$\rho_j$	$\mu_j$	Vj	Re	$\lambda$	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
158-159	158	1 080,00	1 080,00	179,69	0,63	25,84	804,16	2,95	2,12	429 285,33	0,01435	15 176,75	1,92	505,64	39,87	1 021,82
159-160	159	1 080,00	1 080,00	180,32	- 0,33	25,82	804,18	2,95	2,12	429 100,62	0,01435	15 178,05	1,92	503,09	39,67	1 021,49
160-161	160	1 080,00	1 080,00	179,99	- 1,08	25,80	804,20	2,95	2,12	428 916,39	0,01435	15 179,38	1,92	501,50	39,54	1 020,41
161-162	161	1 080,00	1 080,00	178,91	- 0,80	25,78	804,23	2,95	2,12	428 732,64	0,01435	15 180,71	1,92	500,65	39,48	1 019,61
162-163	162	1 080,00	1 080,00	178,11	1,70	25,76	804,25	2,96	2,12	428 549,38	0,01436	15 182,03	1,92	499,53	39,39	1 021,31
163-164	163	1 080,00	1 080,00	179,81	- 2,10	25,74	804,27	2,96	2,12	428 366,60	0,01436	15 183,36	1,92	495,90	39,10	1 019,21
164-165	164	1 080,00	1 080,00	177,71	2,20	25,72	804,29	2,96	2,12	428 184,30	0,01436	15 184,69	1,92	496,08	39,12	1 021,41
165-166	165	1 080,00	1 080,00	179,91	- 2,40	25,69	804,31	2,96	2,12	428 002,48	0,01436	15 186,00	1,92	491,95	38,79	1 019,01
166-167	166	1 080,00	1 080,00	177,51	1,04	25,67	804,33	2,96	2,12	427 821,13	0,01436	15 187,32	1,92	492,43	38,83	1 020,05
167-168	167	1 080,00	1 080,00	178,55	0,28	25,65	804,35	2,96	2,12	427 640,27	0,01436	15 188,59	1,92	489,46	38,60	1 020,33
168-169	168	1 080,00	1 080,00	178,83	- 2,12	25,63	804,37	2,96	2,12	427 459,88	0,01436	15 189,89	1,92	487,26	38,43	1 018,21
169-170	169	1 080,00	1 080,00	176,71	- 0,57	25,61	804,39	2,97	2,12	427 279,96	0,01436	15 191,22	1,93	487,45	38,44	1 017,64
170-171	170	1 080,00	1 080,00	176,14	1,58	25,59	804,41	2,97	2,12	427 100,52	0,01436	15 192,49	1,93	486,10	38,34	1 019,22
171-172	171	1 080,00	1 080,00	177,72	- 0,31	25,57	804,43	2,97	2,12	426 921,55	0,01436	15 193,80	1,93	482,59	38,06	1 018,91
172-173	172	1 080,00	1 080,00	177,41	- 0,90	25,55	804,45	2,97	2,12	426 743,05	0,01436	15 195,08	1,93	480,98	37,93	1 018,01
173-174	173	1 080,00	1 080,00	176,51	- 2,09	25,53	804,47	2,97	2,12	426 565,03	0,01436	15 196,37	1,93	479,95	37,85	1 015,92
174-175	174	1 080,00	1 080,00	174,42	0,29	25,51	804,49	2,97	2,12	426 387,47	0,01437	15 197,68	1,93	480,12	37,87	1 016,21
175-176	175	1 080,00	1 080,00	174,71	1,64	25,49	804,52	2,97	2,12	426 210,37	0,01437	15 198,94	1,93	477,90	37,69	1 017,85
176-177	176	1 080,00	1 080,00	176,35	0,86	25,47	804,54	2,97	2,12	426 033,75	0,01437	15 200,23	1,93	474,34	37,41	1 018,71
177-178	177	1 080,00	1 080,00	177,21	- 3,40	25,45	804,56	2,98	2,12	425 857,59	0,01437	15 201,50	1,93	471,55	37,20	1 015,31
178-179	178	1 080,01	1 080,00	173,81	0,02	25,43	804,58	2,98	2,12	425 681,89	0,01437	15 202,84	1,93	473,02	37,31	1 015,33
179-180	179	1 080,00	1 080,00	173,83	- 1,26	25,41	804,60	2,98	2,12	425 506,65	0,01437	15 204,04	1,93	471,08	37,16	1 014,07
180-181	180	1 080,00	1 080,00	172,57	1,78	25,39	804,62	2,98	2,12	425 331,88	0,01437	15 205,32	1,93	470,41	37,11	1 015,85
181-182	181	1 080,00	1 080,00	174,35	1,46	25,37	804,64	2,98	2,12	425 157,57	0,01437	15 206,60	1,93	466,70	36,82	1 017,31
182-183	182	1 080,00	1 080,00	175,81	- 1,15	25,35	804,66	2,98	2,12	424 983,71	0,01437	15 207,86	1,93	463,32	36,55	1 016,16
183-184	183	1 080,00	1 080,00	174,66	- 0,97	25,33	804,68	2,98	2,12	424 810,32	0,01437	15 209,11	1,93	462,54	36,49	1 015,19
184-185	184	1 080,00	1 080,00	173,69	- 1,58	25,31	804,70	2,98	2,12	424 637,38	0,01437	15 210,37	1,93	461,58	36,42	1 013,61
185-186	185	1 080,00	1 080,00	172,11	- 0,80	25,29	804,72	2,99	2,12	424 464,90	0,01437	15 211,63	1,93	461,24	36,39	1 012,81
186-187	186	1 080,00	1 080,00	171,31	- 2,54	25,27	804,74	2,99	2,12	424 292,87	0,01438	15 212,87	1,93	460,11	36,30	1 010,27
187-188	187	1 080,00	1 080,00	168,77	1,54	25,25	804,75	2,99	2,12	424 121,29	0,01438	15 214,16	1,93	460,72	36,35	1 011,81
188-189	188	1 080,00	1 080,00	170,31	1,70	25,23	804,77	2,99	2,12	423 950,17	0,01438	15 215,38	1,93	457,26	36,08	1 013,51
189-190	189	1 080,00	1 080,00	172,01	- 3,50	25,21	804,79	2,99	2,12	423 779,50	0,01438	15 216,63	1,93	453,63	35,79	1 010,01
190-191	190	1 080,01	1 080,00	168,51	2,02	25,19	804,81	2,99	2,12	423 609,27	0,01438	15 217,93	1,93	455,20	35,92	1 012,03
191-192	191	1 080,00	1 080,00	170,53	- 0,60	25,17	804,83	2,99	2,12	423 439,50	0,01438	15 219,11	1,93	451,25	35,61	1 011,43
192-193	192	1 080,00	1 080,00	169,93	- 2,02	25,15	804,85	3,00	2,12	423 270,17	0,01438	15 220,33	1,93	449,93	35,50	1 009,41
193-194	193	1 080,00	1 080,00	167,91	- 1,55	25,13	804,87	3,00	2,12	423 101,29	0,01438	15 221,58	1,93	450,02	35,51	1 007,86
194-195	194	1 080,00	1 080,00	166,36	2,15	25,11	804,89	3,00	2,12	422 932,86	0,01438	15 222,80	1,93	449,64	35,48	1 010,01
195-196	195	1 080,00	1 080,00	168,51	- 1,39	25,09	804,91	3,00	2,12	422 764,87	0,01438	15 224,04	1,93	445,56	35,16	1 008,62
196-197	196	1 080,00	1 080,00	167,12	- 0,75	25,07	804,93	3,00	2,12	422 597,32	0,01438	15 225,25	1,93	445,02	35,12	1 007,87
197-198	197	1 080,00	1 080,00	166,37	- 1,14	25,05	804,95	3,00	2,12	422 430,22	0,01438	15 226,46	1,93	443,85	35,03	1 006,73
198-199	198	1 080,00	1 080,00	165,23	- 1,82	25,03	804,97	3,00	2,12	422 263,55	0,01439	15 227,69	1,93	443,06	34,97	1 004,91
199-200	199	1 080,00	1 080,00	163,41	1,50	25,01	804,99	3,00	2,12	422 097,33	0,01439	15 228,92	1,93	442,95	34,96	1 006,41
200-201	200	1 080,00	1 080,00	164,91	- 0,57	24,99	805,01	3,01	2,12	421 931,54	0,01439	15 230,13	1,93	439,52	34,69	1 005,84
201-202	201	1 080,00	1 080,00	164,34	- 2,97	24,98	805,02	3,01	2,12	421 766,19	0,01439	15 231,32	1,93	438,16	34,58	1 002,87
202-203	202	1 080,00	1 080,00	161,37	- 0,97	24,96	805,04	3,01	2,12	421 601,28	0,01439	15 232,59	1,93	439,20	34,67	1 001,90
203-204	203	1 080,00	1 080,00	160,40	2,51	24,94	805,06	3,01	2,12	421 436,80	0,01439	15 233,74	1,93	438,24	34,59	1 004,41
204-205	204	1 080,00	1 080,00	162,91	- 1,20	24,92	805,08	3,01	2,12	421 272,76	0,01439	15 234,98	1,93	433,80	34,24	1 003,21
205-206	205	1 080,00	1 080,00	161,71	- 0,60	24,90	805,10	3,01	2,12	421 109,15	0,01439	15 236,15	1,93	433,08	34,18	1 002,61
206-207	206	1 080,00	1 080,00	161,11	- 1,10	24,88	805,12	3,01	2,12	420 945,97	0,01439	15 237,34	1,93	431,75	34,08	1 001,51
207-208	207	1 080,00	1 080,00	160,01	3,30	24,86	805,14	3,01	2,12	420 783,22	0,01439	15 238,54	1,93	430,92	34,02	1 004,81
208-209	208	1 080,01	1 080,00	163,31	2,80	24,84	805,16	3,02	2,12	420 620,90	0,01439	15 239,79	1,93	425,69	33,60	1 007,61
209-210	209	1 080,00	1 080,00	166,11	2,25	24,82	805,17	3,02	2,12	420 459,01	0,01439	15 240,96	1,93	420,96	33,23	1 009,86
210-211	210	1 080,00	1 080,00	168,36	- 0,64	24,81	805,19	3,02	2,12	420 297,55	0,01440	15 242,13	1,93	416,78	32,90	1 009,22
211-212	211	1 080,00	1 080,00	167,72	0,53	24,79	805,21	3,02	2,12	420 136,51	0,01440	15 243,28	1,93	415,49	32,80	1 009,75



HBN	Pk 0	DL	Distances	Elevation	dh	T	pj	μj	Vj	Re	λ	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
212-213	212	1 080,00	1 080,00	168,25	- 3,59	24,77	805,23	3,02	2,12	419 975,90	0,01440	15 244,47	1,93	413,03	32,61	1 006,16
213-214	213	1 080,01	1 080,00	164,66	- 4,16	24,75	805,25	3,02	2,12	419 815,72	0,01440	15 245,73	1,93	414,69	32,74	1 010,32
214-215	214	1 080,01	1 080,00	168,82	- 13,96	24,73	805,27	3,02	2,12	419 655,95	0,01440	15 246,93	1,93	408,60	32,26	996,36
215-216	215	1 080,09	1 080,00	154,86	- 2,19	24,71	805,28	3,02	2,12	419 496,61	0,01440	15 249,26	1,93	420,63	33,21	998,55
216-217	216	1 080,00	1 080,00	157,05	- 0,32	24,70	805,30	3,02	2,12	419 337,68	0,01440	15 249,19	1,93	416,51	32,88	998,87
217-218	217	1 080,00	1 080,00	157,37	- 0,45	24,68	805,32	3,03	2,12	419 179,18	0,01440	15 250,33	1,93	414,26	32,71	999,32
218-219	218	1 080,00	1 080,00	157,82	- 3,78	24,66	805,34	3,03	2,12	419 021,09	0,01440	15 251,50	1,93	411,88	32,52	995,54
219-220	219	1 080,01	1 080,00	154,04	- 0,42	24,64	805,36	3,03	2,12	418 863,43	0,01440	15 252,75	1,93	413,73	32,67	995,12
220-221	220	1 080,00	1 080,00	153,62	- 0,51	24,62	805,37	3,03	2,12	418 706,18	0,01440	15 253,82	1,93	412,22	32,55	994,61
221-222	221	1 080,00	1 080,00	153,11	- 1,80	24,61	805,39	3,03	2,12	418 549,35	0,01440	15 254,98	1,93	410,80	32,44	996,41
222-223	222	1 080,00	1 080,00	154,91	- 2,45	24,59	805,41	3,03	2,12	418 392,93	0,01440	15 256,15	1,93	407,06	32,14	993,96
223-224	223	1 080,00	1 080,00	152,46	- 1,91	24,57	805,43	3,03	2,12	418 236,93	0,01441	15 257,32	1,93	407,58	32,18	995,87
224-225	224	1 080,00	1 080,00	154,37	- 3,34	24,55	805,45	3,03	2,12	418 081,34	0,01441	15 258,45	1,93	403,74	31,88	999,21
225-226	225	1 080,01	1 080,00	157,71	- 6,66	24,53	805,46	3,04	2,12	417 926,16	0,01441	15 259,65	1,93	398,47	31,47	1 005,87
226-227	226	1 080,02	1 080,00	164,37	- 2,60	24,52	805,48	3,04	2,12	417 771,39	0,01441	15 261,01	1,93	389,88	30,79	1 003,27
227-228	227	1 080,00	1 080,00	161,77	- 9,72	24,50	805,50	3,04	2,12	417 617,02	0,01441	15 261,91	1,93	390,55	30,84	993,55
228-229	228	1 080,04	1 080,00	152,05	- 0,96	24,48	805,52	3,04	2,12	417 463,07	0,01441	15 263,62	1,93	398,34	31,46	992,59
229-230	229	1 080,00	1 080,00	151,09	- 4,62	24,46	805,53	3,04	2,12	417 309,52	0,01441	15 264,15	1,93	397,36	31,38	997,21
230-231	230	1 080,01	1 080,00	155,71	- 1,40	24,45	805,55	3,04	2,12	417 156,38	0,01441	15 265,41	1,93	390,81	30,87	998,61
231-232	231	1 080,00	1 080,00	157,11	- 8,00	24,43	805,57	3,04	2,12	417 003,64	0,01441	15 266,42	1,93	387,48	30,60	990,61
232-233	232	1 080,03	1 080,00	149,11	- 0,30	24,41	805,59	3,04	2,12	416 851,31	0,01441	15 267,95	1,93	393,55	31,08	990,91
233-234	233	1 080,00	1 080,00	149,41	- 0,33	24,39	805,60	3,05	2,12	416 699,38	0,01441	15 268,66	1,93	391,32	30,91	990,58
234-235	234	1 080,00	1 080,00	149,08	- 1,61	24,38	805,62	3,05	2,12	416 547,86	0,01441	15 269,78	1,93	389,72	30,78	988,97
235-236	235	1 080,00	1 080,00	147,47	- 0,16	24,36	805,64	3,05	2,12	416 396,73	0,01441	15 270,92	1,93	389,39	30,76	988,81
236-237	236	1 080,00	1 080,00	147,31	- 1,16	24,34	805,66	3,05	2,12	416 246,01	0,01441	15 272,02	1,93	387,62	30,62	987,65
237-238	237	1 080,00	1 080,00	146,15	- 0,17	24,32	805,67	3,05	2,12	416 095,68	0,01442	15 273,15	1,93	386,85	30,56	987,82
238-239	238	1 080,00	1 080,00	146,32	- 0,01	24,31	805,69	3,05	2,12	415 945,75	0,01442	15 274,25	1,93	384,75	30,39	987,83
239-240	239	1 080,00	1 080,00	146,33	- 1,32	24,29	805,71	3,05	2,12	415 796,22	0,01442	15 275,36	1,93	382,80	30,24	986,51
240-241	240	1 080,00	1 080,00	145,01	- 0,50	24,27	805,72	3,05	2,12	415 647,09	0,01442	15 276,48	1,93	382,19	30,19	987,01
241-242	241	1 080,00	1 080,00	145,51	- 0,60	24,25	805,74	3,05	2,12	415 498,35	0,01442	15 277,58	1,93	379,76	30,00	986,41
242-243	242	1 080,00	1 080,00	144,91	- 13,05	24,24	805,76	3,06	2,12	415 350,00	0,01442	15 278,68	1,93	378,42	29,89	999,46
243-244	243	1 080,08	1 080,00	157,96	- 2,37	24,22	805,77	3,06	2,12	415 202,04	0,01442	15 280,90	1,93	363,44	28,71	1 001,83
244-245	244	1 080,00	1 080,00	160,33	- 0,47	24,20	805,79	3,06	2,12	415 054,47	0,01442	15 280,91	1,93	359,14	28,37	1 001,36
245-246	245	1 080,00	1 080,00	159,86	- 14,15	24,19	805,81	3,06	2,12	414 907,30	0,01442	15 281,97	1,93	357,68	28,26	987,21
246-247	246	1 080,09	1 080,00	145,71	- 5,90	24,17	805,82	3,06	2,12	414 760,52	0,01442	15 284,38	1,93	369,89	29,22	993,11
247-248	247	1 080,02	1 080,00	151,61	- 4,10	24,15	805,84	3,06	2,12	414 614,11	0,01442	15 284,39	1,93	362,06	28,60	989,01
248-249	248	1 080,01	1 080,00	147,51	- 4,00	24,14	805,86	3,06	2,12	414 468,10	0,01442	15 285,36	1,93	364,22	28,78	985,01
249-250	249	1 080,01	1 080,00	143,51	- 2,70	24,12	805,87	3,06	2,12	414 322,48	0,01442	15 286,44	1,93	366,29	28,94	987,71
250-251	250	1 080,00	1 080,00	146,21	- 2,99	24,10	805,89	3,06	2,12	414 177,25	0,01443	15 287,46	1,93	361,66	28,57	984,72
251-252	251	1 080,00	1 080,00	143,22	- 2,69	24,09	805,91	3,07	2,12	414 032,40	0,01443	15 288,55	1,93	362,71	28,66	982,03
252-253	252	1 080,00	1 080,00	140,53	- 0,43	24,07	805,92	3,07	2,12	413 887,93	0,01443	15 289,62	1,93	363,47	28,72	982,46
253-254	253	1 080,00	1 080,00	140,96	- 1,05	24,05	805,94	3,07	2,12	413 743,85	0,01443	15 290,65	1,93	361,11	28,53	981,41
254-255	254	1 080,00	1 080,00	139,91	- 3,07	24,04	805,96	3,07	2,12	413 600,15	0,01443	15 291,73	1,93	360,22	28,46	984,48
255-256	255	1 080,00	1 080,00	142,98	- 1,87	24,02	805,97	3,07	2,12	413 456,83	0,01443	15 292,85	1,93	355,22	28,07	982,61
256-257	256	1 080,00	1 080,00	141,11	- 3,86	24,00	805,99	3,07	2,12	413 313,89	0,01443	15 293,88	1,93	355,15	28,06	986,47
257-258	257	1 080,01	1 080,00	144,97	- 4,22	23,99	806,00	3,07	2,12	413 171,33	0,01443	15 295,02	1,93	349,36	27,61	982,25
258-259	258	1 080,01	1 080,00	140,75	- 2,75	23,97	806,02	3,07	2,12	413 029,15	0,01443	15 296,11	1,93	351,64	27,79	985,00
259-260	259	1 080,00	1 080,00	143,50	- 0,21	23,96	806,04	3,07	2,12	412 887,34	0,01443	15 297,10	1,93	346,96	27,42	985,21
260-261	260	1 080,00	1 080,00	143,71	- 1,50	23,94	806,05	3,08	2,12	412 745,91	0,01443	15 298,11	1,93	344,82	27,25	983,71
261-262	261	1 080,00	1 080,00	142,21	- 1,90	23,92	806,07	3,08	2,12	412 604,85	0,01443	15 299,18	1,93	344,38	27,22	985,61
262-263	262	1 080,00	1 080,00	144,11	- 3,20	23,91	806,09	3,08	2,12	412 464,17	0,01443	15 300,24	1,93	340,55	26,91	982,41
263-264	263	1 080,00	1 080,00	140,91	- 3,06	23,89	806,10	3,08	2,12	412 323,86	0,01443	15 301,34	1,93	341,81	27,01	979,35
264-265	264	1 080,00	1 080,00	137,85	- 0,77	23,87	806,12	3,08	2,12	412 183,92	0,01444	15 302,38	1,94	342,94	27,10	978,58
265-266	265	1 080,00	1 080,00	137,08	- 0,27	23,86	806,13	3,08	2,12	412 044,36	0,01444	15 303,37	1,94	341,77	27,01	978,31

HBN	Pk 0	DL	Distances	Elevation	dh	T	$\rho_j$	$\mu_j$	Vj	Re	$\lambda$	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
266-267	266	1 080,00	1 080,00	136,81	1,40	23,84	806,15	3,08	2,12	411 905,16	0,01444	15 304,41	1,94	340,11	26,88	979,71
267-268	267	1 080,00	1 080,00	138,21	1,49	23,83	806,16	3,08	2,12	411 766,33	0,01444	15 305,46	1,94	336,77	26,62	981,20
268-269	268	1 080,00	1 080,00	139,70	4,91	23,81	806,18	3,08	2,12	411 627,88	0,01444	15 306,50	1,94	333,34	26,35	986,11
269-270	269	1 080,01	1 080,00	144,61	- 5,50	23,79	806,20	3,09	2,12	411 489,78	0,01444	15 307,68	1,94	326,50	25,81	980,61
270-271	270	1 080,01	1 080,00	139,11	- 5,80	23,78	806,21	3,09	2,12	411 352,06	0,01444	15 308,76	1,94	330,06	26,09	974,81
271-272	271	1 080,02	1 080,00	133,31	- 0,90	23,76	806,23	3,09	2,12	411 214,70	0,01444	15 309,81	1,94	333,93	26,39	973,91
272-273	272	1 080,00	1 080,00	132,41	5,50	23,75	806,24	3,09	2,12	411 077,70	0,01444	15 310,62	1,94	332,89	26,31	979,41
273-274	273	1 080,01	1 080,00	137,91	28,10	23,73	806,26	3,09	2,12	410 941,07	0,01444	15 311,84	1,94	325,46	25,73	1 007,51
274-275	274	1 080,37	1 080,00	166,01	- 26,80	23,72	806,27	3,09	2,12	410 804,80	0,01444	15 317,85	1,94	295,42	23,35	980,71
275-276	275	1 080,33	1 080,00	139,21	21,99	23,70	806,29	3,09	2,12	410 668,84	0,01444	15 318,41	1,94	320,28	25,32	1 002,70
276-277	276	1 080,22	1 080,00	161,20	4,82	23,69	806,30	3,09	2,12	410 533,26	0,01444	15 317,89	1,94	296,36	23,43	1 007,52
277-278	277	1 080,01	1 080,00	166,02	- 1,80	23,67	806,32	3,09	2,12	410 398,04	0,01444	15 315,88	1,94	289,60	22,89	1 005,72
278-279	278	1 080,00	1 080,00	164,22	- 0,09	23,65	806,34	3,10	2,12	410 263,21	0,01445	15 316,77	1,94	289,46	22,88	1 005,63
279-280	279	1 080,00	1 080,00	164,13	- 12,06	23,64	806,35	3,10	2,12	410 128,74	0,01445	15 317,76	1,94	287,62	22,74	993,57
280-281	280	1 080,07	1 080,00	152,07	4,45	23,62	806,37	3,10	2,12	409 994,63	0,01445	15 319,72	1,94	297,74	23,54	998,02
281-282	281	1 080,01	1 080,00	156,52	12,72	23,61	806,38	3,10	2,12	409 860,86	0,01445	15 319,91	1,94	291,35	23,03	1 010,74
282-283	282	1 080,07	1 080,00	169,24	- 4,92	23,59	806,40	3,10	2,12	409 727,46	0,01445	15 321,85	1,94	276,70	21,88	1 005,82
283-284	283	1 080,01	1 080,00	164,32	- 8,80	23,58	806,41	3,10	2,12	409 594,40	0,01445	15 321,95	1,94	279,68	22,11	997,02
284-285	284	1 080,04	1 080,00	155,52	10,10	23,56	806,43	3,10	2,12	409 461,70	0,01445	15 323,30	1,94	286,54	22,65	1 007,12
285-286	285	1 080,05	1 080,00	165,62	- 3,43	23,55	806,44	3,10	2,12	409 329,36	0,01445	15 324,46	1,94	274,51	21,70	1 003,69
286-287	286	1 080,01	1 080,00	162,19	4,73	23,53	806,46	3,10	2,12	409 197,36	0,01445	15 324,86	1,94	276,00	21,82	1 008,42
287-288	287	1 080,01	1 080,00	166,92	- 0,50	23,52	806,47	3,11	2,12	409 065,72	0,01445	15 325,92	1,94	269,33	21,30	1 007,92
288-289	288	1 080,00	1 080,00	166,42	3,99	23,50	806,49	3,11	2,12	408 934,43	0,01445	15 326,77	1,94	267,89	21,18	1 011,91
289-290	289	1 080,01	1 080,00	170,41	0,36	23,49	806,50	3,11	2,12	408 803,49	0,01445	15 327,86	1,94	261,97	20,71	1 012,27
290-291	290	1 080,00	1 080,00	170,77	0,95	23,47	806,52	3,11	2,12	408 672,89	0,01445	15 328,75	1,94	259,67	20,53	1 013,22
291-292	290,44	475,20	475,20	171,72	0,28	23,46	806,53	3,11	2,12	408 542,64	0,01445	6 745,09	0,85	257,87	20,39	1 013,50
HEH	295,45	5 410,80	5 410,80	172,00		23,45	806,54	3,11	2,12	408 485,44	0,01445	76 804,11	9,71	247,88	19,53	841,50
							803,71	2,93	2,12	433 114,47	0,01440	4 461 983,27	565,90			

## **ANNEXE 2**

OH4 - Diametre Externe 609,6 mm soit 24"

Diametre interne 590,6 mm

Vitesse d'ecoulement 1,37 m/s

HBN	Pk 0	DL	Elevation	dh	T	$\rho$	$\mu$	$\rho/\mu$	$uj$	Re	$\lambda$	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
														971,45	76,19249706	1 028,50
	1	1 080,01	187,00	- 7,60										561,27	44,02	1 020,90
1-2	2	1 080,01	179,40	11,37	30,00	800,00	2,71	295,17	1,37	300 592,08	0,01589	6 988,97	0,89	567,98	44,55	1 032,27
2-3	3	1 080,06	190,77	8,64	29,97	800,03	2,71	295,00	1,37	300 412,64	0,01589	6 990,20	0,89	555,72	43,59	1 040,91
3-4	4	1 080,03	199,41	- 5,72	29,93	800,07	2,71	294,82	1,37	300 233,66	0,01590	6 990,98	0,89	546,19	42,84	1 035,19
4-5	5	1 080,02	193,69	- 10,17	29,90	800,10	2,72	294,65	1,37	300 055,14	0,01590	6 991,79	0,89	551,02	43,22	1 025,02
5-6	6	1 080,05	183,52	15,70	29,87	800,13	2,72	294,47	1,37	299 877,09	0,01590	6 992,93	0,89	560,30	43,95	1 040,72
6-7	7	1 080,11	199,22	- 11,37	29,84	800,16	2,72	294,30	1,37	299 699,50	0,01590	6 994,29	0,89	543,71	42,65	1 029,35
7-8	8	1 080,06	187,85	6,69	29,81	800,20	2,72	294,12	1,37	299 522,35	0,01590	6 994,87	0,89	554,19	43,48	1 036,04
8-9	9	1 080,02	194,54	- 2,96	29,77	800,23	2,72	293,95	1,37	299 345,67	0,01590	6 995,54	0,89	546,61	42,89	1 033,08
9-10	10	1 080,00	191,58	- 2,40	29,74	800,26	2,72	293,78	1,37	299 169,45	0,01590	6 996,36	0,89	548,67	43,05	1 030,68
10-11	11	1 080,00	189,18	0,44	29,71	800,29	2,73	293,60	1,37	298 993,68	0,01591	6 997,28	0,89	550,18	43,17	1 031,12
12-13	12	1 080,00	189,62	1,25	29,68	800,32	2,73	293,43	1,37	298 818,38	0,01591	6 998,18	0,89	548,85	43,07	1 032,37
13-14	13	1 080,00	190,87	- 5,65	29,65	800,36	2,73	293,26	1,37	298 643,52	0,01591	6 999,10	0,89	546,71	42,90	1 026,72
14-15	14	1 080,01	185,22	13,08	29,61	800,39	2,73	293,09	1,37	298 469,12	0,01591	7 000,11	0,89	551,47	43,28	1 039,80
15-16	15	1 080,08	198,30	2,17	29,58	800,42	2,73	292,92	1,37	298 295,17	0,01591	7 001,45	0,89	537,50	42,18	1 041,97
16-17	16	1 080,00	200,47	- 18,03	29,55	800,45	2,73	292,75	1,37	298 121,65	0,01591	7 001,86	0,89	534,44	41,94	1 023,94
17-18	17	1 080,15	182,44	6,81	29,52	800,48	2,74	292,58	1,37	297 948,60	0,01591	7 003,74	0,89	551,57	43,29	1 030,75
18-19	18	1 080,02	189,25	3,39	29,49	800,52	2,74	292,41	1,37	297 775,97	0,01592	7 003,81	0,89	543,87	42,69	1 034,14
19-20	19	1 080,01	192,64	9,67	29,46	800,55	2,74	292,24	1,37	297 603,81	0,01592	7 004,62	0,89	539,59	42,35	1 043,81
20-21	20	1 080,04	202,31	- 0,91	29,43	800,58	2,74	292,07	1,37	297 432,09	0,01592	7 005,77	0,89	529,03	41,52	1 042,90
21-22	21	1 080,00	201,40	- 11,96	29,39	800,61	2,74	291,90	1,37	297 260,82	0,01592	7 006,40	0,89	529,05	41,53	1 030,94
22-23	22	1 080,07	189,44	15,72	29,36	800,64	2,74	291,73	1,37	297 089,99	0,01592	8 796,80	1,12	539,89	42,38	1 046,66
23-24	23	1 080,11	205,16	- 17,99	29,33	800,67	2,75	291,57	1,37	296 919,59	0,01592	8 798,32	1,12	523,05	41,06	1 028,67
24-25	24	1 080,15	187,17	10,64	29,30	800,70	2,75	291,40	1,37	296 749,63	0,01592	8 799,74	1,12	539,92	42,39	1 039,31
25-26	25	1 080,05	197,81	- 4,33	29,27	800,73	2,75	291,23	1,37	296 580,11	0,01593	8 800,07	1,12	528,16	41,46	1 034,98
26-27	26	1 080,01	193,48	3,84	29,24	800,76	2,75	291,07	1,37	296 411,03	0,01593	8 800,84	1,12	531,37	41,72	1 038,82
27-28	27	1 080,01	197,32	- 7,52	29,21	800,79	2,75	290,90	1,37	296 242,40	0,01593	8 801,95	1,12	526,40	41,33	1 031,30
28-29	28	1 080,03	189,80	14,52	29,18	800,83	2,75	290,74	1,37	296 074,21	0,01593	8 803,22	1,12	532,80	41,83	1 045,82
29-30	29	1 080,10	204,32	- 1,07	29,15	800,86	2,76	290,57	1,37	295 906,45	0,01593	8 804,92	1,12	517,16	40,61	1 044,75
30-31	30	1 080,00	203,25	8,13	29,12	800,89	2,76	290,41	1,37	295 739,12	0,01593	8 805,25	1,12	517,11	40,60	1 052,88
31-32	31	1 080,03	211,38	- 11,04	29,09	800,92	2,76	290,24	1,37	295 572,23	0,01593	8 806,61	1,12	507,86	39,88	1 041,84
32-33	32	1 080,06	200,34	3,18	29,06	800,95	2,76	290,08	1,37	295 405,77	0,01594	8 807,93	1,12	517,78	40,66	1 045,02
33-34	33	1 080,00	203,52	2,10	29,03	800,98	2,76	289,92	1,37	295 239,74	0,01594	8 808,62	1,12	513,48	40,32	1 047,12
34-35	34	1 080,00	205,62	- 14,10	29,00	801,01	2,76	289,75	1,37	295 074,15	0,01594	8 809,70	1,12	510,26	40,07	1 033,02
35-36	35	1 080,09	191,52	4,15	28,97	801,04	2,77	289,59	1,37	294 908,98	0,01594	8 811,54	1,12	523,24	41,09	1 037,17
36-37	36	1 080,01	195,67	- 12,35	28,94	801,07	2,77	289,43	1,37	294 744,23	0,01594	8 811,95	1,12	517,97	40,68	1 024,82
37-38	37	1 080,07	183,32	6,50	28,91	801,10	2,77	289,27	1,37	294 579,92	0,01594	8 813,57	1,12	529,19	41,56	1 031,32
38-39	38	1 080,02	189,82	- 0,70	28,88	801,13	2,77	289,11	1,37	294 416,03	0,01594	8 814,25	1,12	521,57	40,97	1 030,62
39-40	39	1 080,00	189,12	6,96	28,85	801,16	2,77	288,95	1,37	294 252,57	0,01595	8 815,18	1,12	521,15	40,94	1 037,58
40-41	40	1 080,02	196,08	- 6,86	28,82	801,19	2,77	288,79	1,37	294 089,54	0,01595	8 816,46	1,12	513,07	40,30	1 030,72
41-42	41	1 080,02	189,22	7,53	28,79	801,22	2,78	288,63	1,37	293 926,92	0,01595	8 817,54	1,12	518,81	40,75	1 038,25
42-43	42	1 080,03	196,75	- 9,62	28,76	801,25	2,78	288,47	1,37	293 764,73	0,01595	8 818,67	1,12	510,16	40,08	1 028,63
43-44	43	1 080,04	187,13	6,60	28,73	801,28	2,78	288,31	1,37	293 602,96	0,01595	8 819,89	1,12	518,65	40,75	1 035,23
44-45	44	1 080,02	193,73	- 8,22	28,70	801,30	2,78	288,15	1,37	293 441,61	0,01595	8 820,79	1,12	510,93	40,14	1 027,01
45-46	45	1 080,03	185,51	6,87	28,67	801,33	2,78	287,99	1,37	293 280,67	0,01595	8 821,96	1,12	518,03	40,70	1 033,88
46-47	46	1 080,02	192,38	- 8,29	28,64	801,36	2,78	287,84	1,37	293 120,16	0,01596	8 822,96	1,12	510,04	40,07	1 025,59
47-48	47	1 080,03	184,09	3,38	28,61	801,39	2,79	287,68	1,37	292 960,06	0,01596	8 824,12	1,12	517,20	40,64	1 028,97
48-49	48	1 080,01	187,47	8,86	28,59	801,42	2,79	287,52	1,37	292 800,38	0,01596	8 824,98	1,12	512,70	40,28	1 037,83
49-50	49	1 080,04	196,33	- 2,00	28,56	801,45	2,79	287,37	1,37	292 641,11	0,01596	8 826,31	1,12	502,72	39,50	1 035,83
50-51	50	1 080,00	194,33	3,19	28,53	801,48	2,79	287,21	1,37	292 482,25	0,01596	8 827,09	1,12	503,60	39,57	1 039,02

HBN	Pk 0	DL	Elevation	dh	T	ρ	μ	ρ/μ	uj	Re	λ	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
51-52	51	1 080,00	197,52	- 14,09	28,50	801,51	2,79	287,05	1,37	292 323,82	0,01596	8 828,19	1,12	499,28	39,23	1 024,93
52-53	52	1 080,09	183,43	0,63	28,47	801,54	2,79	286,90	1,37	292 165,79	0,01596	8 829,96	1,12	512,25	40,26	1 025,56
53-54	53	1 080,00	184,06	- 0,29	28,44	801,56	2,80	286,74	1,37	292 008,16	0,01596	8 830,28	1,12	510,50	40,12	1 025,27
54-55	54	1 080,00	183,77	8,40	28,41	801,59	2,80	286,59	1,37	291 850,95	0,01597	8 831,34	1,12	509,67	40,05	1 033,67
55-56	55	1 080,03	192,17	7,63	28,39	801,62	2,80	286,44	1,37	291 694,15	0,01597	8 832,66	1,12	500,14	39,31	1 041,30
56-57	56	1 080,03	199,80	- 0,56	28,36	801,65	2,80	286,28	1,37	291 537,76	0,01597	8 833,67	1,12	491,39	38,62	1 040,74
57-58	57	1 080,00	199,24	9,30	28,33	801,68	2,80	286,13	1,37	291 381,77	0,01597	8 834,51	1,12	490,83	38,58	1 050,04
58-59	58	1 080,04	208,54	- 16,90	28,30	801,71	2,80	285,98	1,37	291 226,19	0,01597	8 835,89	1,12	480,40	37,76	1 033,14
59-60	59	1 080,13	191,64	- 2,09	28,27	801,73	2,80	285,82	1,37	291 071,01	0,01597	8 837,69	1,12	496,18	39,00	1 031,05
60-61	60	1 080,00	189,55	18,74	28,24	801,76	2,81	285,67	1,37	290 916,22	0,01597	8 837,68	1,12	497,14	39,08	1 049,79
61-62	61	1 080,16	208,29	- 8,18	28,22	801,79	2,81	285,52	1,37	290 761,85	0,01598	8 840,04	1,12	477,28	37,52	1 041,61
62-63	62	1 080,03	200,11	- 0,34	28,19	801,82	2,81	285,37	1,37	290 607,87	0,01598	8 840,00	1,12	484,34	38,07	1 041,27
63-64	63	1 080,00	199,77	- 9,13	28,16	801,85	2,81	285,22	1,37	290 454,29	0,01598	8 840,79	1,12	483,55	38,01	1 032,14
64-65	64	1 080,04	190,64	5,31	28,13	801,87	2,81	285,07	1,37	290 301,13	0,01598	8 842,15	1,12	491,56	38,65	1 037,45
65-66	65	1 080,01	195,95	- 3,31	28,11	801,90	2,81	284,92	1,37	290 148,36	0,01598	8 842,98	1,12	485,12	38,14	1 034,14
66-67	66	1 080,01	192,64	8,91	28,08	801,93	2,82	284,77	1,37	289 995,98	0,01598	8 843,95	1,12	487,31	38,31	1 043,05
67-68	67	1 080,04	201,55	- 14,13	28,05	801,96	2,82	284,62	1,37	289 844,01	0,01598	8 845,24	1,12	477,28	37,53	1 028,92
68-69	68	1 080,09	187,42	8,83	28,02	801,98	2,82	284,47	1,37	289 692,42	0,01598	8 846,73	1,12	490,28	38,55	1 037,75
69-70	69	1 080,04	196,25	- 8,40	28,00	802,01	2,82	284,32	1,37	289 541,23	0,01599	8 847,29	1,12	480,33	37,77	1 029,35
70-71	70	1 080,03	187,85	0,60	27,97	802,04	2,82	284,17	1,37	289 390,43	0,01599	8 848,29	1,12	487,60	38,34	1 029,95
71-72	71	1 080,00	188,45	2,18	27,94	802,07	2,82	284,03	1,37	289 240,03	0,01599	8 849,05	1,12	485,88	38,21	1 032,13
72-73	72	1 080,00	190,63	- 1,48	27,92	802,09	2,83	283,88	1,37	289 090,03	0,01599	8 850,09	1,12	482,57	37,95	1 030,65
73-74	73	1 080,00	189,15	- 0,70	27,89	802,12	2,83	283,73	1,37	288 940,41	0,01599	8 851,10	1,12	482,93	37,98	1 029,95
74-75	74	1 080,00	188,45	2,92	27,86	802,15	2,83	283,59	1,37	288 791,18	0,01599	8 852,11	1,12	482,50	37,95	1 032,87
75-76	75	1 080,00	191,37	2,28	27,83	802,17	2,83	283,44	1,37	288 642,35	0,01599	8 853,16	1,13	478,46	37,63	1 035,15
76-77	76	1 080,00	193,65	1,40	27,81	802,20	2,83	283,29	1,37	288 493,90	0,01599	8 854,16	1,13	475,05	37,36	1 036,55
77-78	77	1 080,00	195,05	- 8,97	27,78	802,23	2,83	283,15	1,37	288 345,84	0,01600	8 855,16	1,13	472,53	37,17	1 027,58
78-79	78	1 080,04	186,08	2,82	27,75	802,25	2,83	283,00	1,37	288 198,16	0,01600	8 856,47	1,13	480,37	37,78	1 030,40
79-80	79	1 080,00	188,90	3,50	27,73	802,28	2,84	282,86	1,37	288 050,86	0,01600	8 857,20	1,13	476,43	37,47	1 033,90
80-81	80	1 080,01	192,40	2,36	27,70	802,31	2,84	282,71	1,37	287 903,96	0,01600	8 858,22	1,13	471,80	37,11	1 036,26
81-82	81	1 080,00	194,76	1,30	27,67	802,33	2,84	282,57	1,37	287 757,43	0,01600	8 859,20	1,13	468,32	36,84	1 037,56
82-83	82	1 080,00	196,06	1,49	27,65	802,36	2,84	282,43	1,37	287 611,29	0,01600	8 860,18	1,13	465,89	36,65	1 039,05
83-84	83	1 080,00	197,55	- 6,81	27,62	802,39	2,84	282,28	1,37	287 465,53	0,01600	8 861,18	1,13	463,27	36,44	1 032,24
84-85	84	1 080,02	190,74	- 4,19	27,60	802,41	2,84	282,14	1,37	287 320,14	0,01601	8 862,35	1,13	468,96	36,89	1 028,05
85-86	85	1 080,01	186,55	1,41	27,57	802,44	2,85	282,00	1,37	287 175,14	0,01601	8 863,23	1,13	472,02	37,14	1 029,46
86-87	86	1 080,00	187,96	6,50	27,54	802,46	2,85	281,86	1,37	287 030,51	0,01601	8 864,17	1,13	469,49	36,94	1 035,96
87-88	87	1 080,02	194,46	- 6,68	27,52	802,49	2,85	281,71	1,37	286 886,27	0,01601	8 865,31	1,13	461,86	36,34	1 029,28
88-89	88	1 080,02	187,78	- 1,28	27,49	802,52	2,85	281,57	1,37	286 742,40	0,01601	8 866,31	1,13	467,41	36,78	1 028,00
89-90	89	1 080,00	186,50	- 0,05	27,47	802,54	2,85	281,43	1,37	286 598,90	0,01601	8 867,13	1,13	467,57	36,79	1 027,95
90-91	90	1 080,00	186,45	6,12	27,44	802,57	2,85	281,29	1,37	286 455,78	0,01601	8 868,11	1,13	466,49	36,71	1 034,07
91-92	91	1 080,02	192,57	- 6,10	27,41	802,59	2,85	281,15	1,37	286 313,03	0,01601	8 869,23	1,13	459,25	36,14	1 027,97
92-93	92	1 080,02	186,47	- 0,11	27,39	802,62	2,86	281,01	1,37	286 170,65	0,01602	8 870,21	1,13	464,22	36,53	1 027,86
93-94	93	1 080,00	186,36	5,41	27,36	802,64	2,86	280,87	1,37	286 028,65	0,01602	8 871,05	1,13	463,20	36,45	1 033,27
94-95	94	1 080,01	191,77	- 4,60	27,34	802,67	2,86	280,73	1,37	285 887,02	0,01602	8 872,14	1,13	456,67	35,94	1 028,67
95-96	95	1 080,01	187,17	0,73	27,31	802,70	2,86	280,59	1,37	285 745,75	0,01602	8 873,08	1,13	460,14	36,21	1 029,40
96-97	96	1 080,00	187,90	- 1,45	27,29	802,72	2,86	280,46	1,37	285 604,86	0,01602	8 873,97	1,13	458,28	36,07	1 027,95
97-98	97	1 080,00	186,45	0,42	27,26	802,75	2,86	280,32	1,37	285 464,33	0,01602	8 874,95	1,13	458,61	36,09	1 028,37
98-99	98	1 080,00	186,87	0,60	27,24	802,77	2,87	280,18	1,37	285 324,18	0,01602	8 875,91	1,13	457,06	35,97	1 028,97
99-100	99	1 080,00	187,47	1,48	27,21	802,80	2,87	280,04	1,37	285 184,38	0,01602	8 876,87	1,13	455,33	35,84	1 030,45
100-101	100	1 080,00	188,95	- 0,31	27,19	802,82	2,87	279,91	1,37	285 044,96	0,01603	8 877,84	1,13	452,72	35,63	1 030,14
101-102	101	1 080,00	188,64	- 0,72	27,16	802,85	2,87	279,77	1,37	284 905,89	0,01603	8 878,80	1,13	451,91	35,57	1 029,42
102-103	102	1 080,00	187,92	3,55	27,14	802,87	2,87	279,63	1,37	284 767,20	0,01603	8 879,76	1,13	451,50	35,54	1 032,97
103-104	103	1 080,01	191,47	1,20	27,11	802,90	2,87	279,50	1,37	284 628,86	0,01603	8 880,76	1,13	446,82	35,17	1 034,17
104-105	104	1 080,00	192,67	0,63	27,09	802,92	2,87	279,36	1,37	284 490,88	0,01603	8 881,67	1,13	444,49	34,99	1 034,80
105-106	105	1 080,00	193,30	- 5,28	27,06	802,95	2,88	279,23	1,37	284 353,27	0,01603	8 882,62	1,13	442,74	34,85	1 029,52

HBN	Pk 0	DL	Elevation	dh	T	$\rho$	$\mu$	$\rho/\mu$	$uj$	$Re$	$\lambda$	$dpi$ (Pa)	$dpi$ (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
106-107	106	1 080,01	188,02	- 1,24	27,04	802,97	2,88	279,09	1,37	284 216,01	0,01603	8 883,68	1,13	446,89	35,18	1 028,28
107-108	107	1 080,00	186,78	0,99	27,01	802,99	2,88	278,96	1,37	284 079,12	0,01603	8 884,53	1,13	447,00	35,19	1 029,27
108-109	108	1 080,00	187,77	5,58	26,99	803,02	2,88	278,82	1,37	283 942,58	0,01604	8 885,47	1,13	444,88	35,03	1 034,85
109-110	109	1 080,01	193,35	7,03	26,96	803,04	2,88	278,69	1,37	283 806,40	0,01604	8 886,53	1,13	438,17	34,50	1 041,88
110-111	110	1 080,02	200,38	- 5,58	26,94	803,07	2,88	278,56	1,37	283 670,57	0,01604	8 887,54	1,13	430,02	33,86	1 036,30
111-112	111	1 080,01	194,80	- 1,12	26,92	803,09	2,88	278,42	1,37	283 535,10	0,01604	8 888,42	1,13	434,47	34,21	1 035,18
112-113	112	1 080,00	193,68	- 3,61	26,89	803,12	2,89	278,29	1,37	283 399,98	0,01604	8 889,24	1,13	434,46	34,21	1 031,57
113-114	113	1 080,01	190,07	- 0,73	26,87	803,14	2,89	278,16	1,37	283 265,22	0,01604	8 890,22	1,13	436,94	34,41	1 030,84
114-115	114	1 080,00	189,34	- 0,76	26,84	803,16	2,89	278,03	1,37	283 130,81	0,01604	8 891,11	1,13	436,54	34,38	1 030,08
115-116	115	1 080,00	188,58	- 1,50	26,82	803,19	2,89	277,90	1,37	282 996,76	0,01604	8 892,04	1,13	436,17	34,35	1 028,58
116-117	116	1 080,00	187,08	1,45	26,79	803,21	2,89	277,76	1,37	282 863,05	0,01604	8 892,98	1,13	436,55	34,38	1 030,03
117-118	117	1 080,00	188,53	- 1,77	26,77	803,24	2,89	277,63	1,37	282 729,69	0,01605	8 893,91	1,13	433,97	34,18	1 028,26
118-119	118	1 080,00	186,76	2,75	26,75	803,26	2,89	277,50	1,37	282 596,69	0,01605	8 894,84	1,13	434,61	34,23	1 031,01
119-120	119	1 080,00	189,51	- 0,87	26,72	803,28	2,90	277,37	1,37	282 464,03	0,01605	8 895,78	1,13	430,73	33,92	1 030,14
120-121	120	1 080,00	188,64	0,25	26,70	803,31	2,90	277,24	1,37	282 331,72	0,01605	8 896,68	1,13	430,47	33,90	1 030,39
121-122	121	1 080,00	188,89	- 0,04	26,68	803,33	2,90	277,11	1,37	282 199,75	0,01605	8 897,60	1,13	429,09	33,80	1 030,35
122-123	122	1 080,00	188,85	- 0,68	26,65	803,36	2,90	276,98	1,37	282 068,13	0,01605	8 898,52	1,13	428,00	33,71	1 029,67
123-124	123	1 080,00	188,17	- 0,09	26,63	803,38	2,90	276,85	1,37	281 936,86	0,01605	8 899,43	1,13	427,55	33,68	1 029,58
124-125	124	1 080,00	188,08	0,05	26,60	803,40	2,90	276,73	1,37	281 805,92	0,01605	8 900,35	1,13	426,51	33,60	1 029,63
125-126	125	1 080,00	188,13	1,32	26,58	803,43	2,90	276,60	1,37	281 675,34	0,01606	8 901,26	1,13	425,33	33,50	1 030,95
126-127	126	1 080,00	189,45	- 2,36	26,56	803,45	2,91	276,47	1,37	281 545,09	0,01606	8 902,18	1,13	422,88	33,31	1 028,59
127-128	127	1 080,00	187,09	- 1,10	26,53	803,47	2,91	276,34	1,37	281 415,19	0,01606	8 903,10	1,13	424,12	33,41	1 027,49
128-129	128	1 080,00	185,99	0,59	26,51	803,50	2,91	276,21	1,37	281 285,62	0,01606	8 903,99	1,13	424,09	33,41	1 028,08
129-130	129	1 080,00	186,58	- 1,51	26,49	803,52	2,91	276,09	1,37	281 156,40	0,01606	8 904,89	1,13	422,37	33,27	1 026,57
130-131	130	1 080,00	185,07	0,56	26,46	803,54	2,91	275,96	1,37	281 027,51	0,01606	8 905,80	1,13	422,75	33,30	1 027,13
131-132	131	1 080,00	185,63	- 0,52	26,44	803,56	2,91	275,84	1,37	280 898,96	0,01606	8 906,70	1,13	421,06	33,17	1 026,61
132-133	132	1 080,00	185,11	1,01	26,42	803,59	2,91	275,71	1,37	280 770,75	0,01606	8 907,60	1,13	420,45	33,13	1 027,62
133-134	133	1 080,00	186,12	- 1,84	26,40	803,61	2,92	275,58	1,37	280 642,88	0,01606	8 908,50	1,13	418,31	32,96	1 025,78
134-135	134	1 080,00	184,28	- 0,97	26,37	803,63	2,92	275,46	1,37	280 515,34	0,01607	8 909,40	1,13	419,02	33,01	1 024,81
135-136	135	1 080,00	183,31	0,34	26,35	803,66	2,92	275,33	1,37	280 388,13	0,01607	8 910,29	1,13	418,86	33,00	1 025,15
136-137	136	1 080,00	183,65	- 0,60	26,33	803,68	2,92	275,21	1,37	280 261,26	0,01607	8 911,17	1,13	417,39	32,89	1 024,55
137-138	137	1 080,00	183,05	0,46	26,30	803,70	2,92	275,08	1,37	280 134,72	0,01607	8 912,06	1,13	416,86	32,85	1 025,01
138-139	138	1 080,00	183,51	- 1,10	26,28	803,72	2,92	274,96	1,37	280 008,52	0,01607	8 912,95	1,13	415,27	32,72	1 023,91
139-140	139	1 080,00	182,41	1,30	26,26	803,75	2,92	274,84	1,37	279 882,64	0,01607	8 913,84	1,13	415,23	32,72	1 025,21
140-141	140	1 080,00	183,71	- 0,31	26,24	803,77	2,93	274,71	1,37	279 757,09	0,01607	8 914,73	1,13	412,80	32,53	1 024,90
141-142	141	1 080,00	183,40	0,02	26,21	803,79	2,93	274,59	1,37	279 631,88	0,01607	8 915,60	1,13	411,98	32,47	1 024,92
142-143	142	1 080,00	183,42	0,33	26,19	803,81	2,93	274,47	1,37	279 506,99	0,01608	8 916,48	1,13	410,83	32,38	1 025,25
143-144	143	1 080,00	183,75	- 0,30	26,17	803,84	2,93	274,35	1,37	279 382,43	0,01608	8 917,36	1,13	409,37	32,26	1 024,95
144-145	144	1 080,00	183,45	- 1,44	26,15	803,86	2,93	274,22	1,37	279 258,20	0,01608	8 918,24	1,13	408,54	32,20	1 023,51
145-146	145	1 080,00	182,01	1,20	26,13	803,88	2,93	274,10	1,37	279 134,29	0,01608	8 919,12	1,13	408,85	32,22	1 024,71
146-147	146	1 080,00	183,21	- 0,80	26,10	803,90	2,93	273,98	1,37	279 010,71	0,01608	8 919,99	1,13	406,52	32,04	1 023,91
147-148	147	1 080,00	182,41	1,40	26,08	803,92	2,94	273,86	1,37	278 887,45	0,01608	8 920,85	1,13	406,19	32,01	1 025,31
148-149	148	1 080,00	183,81	1,10	26,06	803,95	2,94	273,74	1,37	278 764,52	0,01608	8 921,73	1,13	403,66	31,82	1 026,41
149-150	149	1 080,00	184,91	- 2,00	26,04	803,97	2,94	273,62	1,37	278 641,91	0,01608	8 922,59	1,13	401,43	31,64	1 024,41
150-151	150	1 080,00	182,91	0,22	26,02	803,99	2,94	273,50	1,37	278 519,62	0,01608	8 923,47	1,13	402,29	31,71	1 024,63
151-152	151	1 080,00	183,13	0,39	25,99	804,01	2,94	273,38	1,37	278 397,65	0,01609	8 924,31	1,13	400,94	31,60	1 025,02
152-153	152	1 080,00	183,52	- 1,11	25,97	804,03	2,94	273,26	1,37	278 276,00	0,01609	8 925,17	1,13	399,42	31,49	1 023,91
153-154	153	1 080,00	182,41	- 0,72	25,95	804,05	2,94	273,14	1,37	278 154,68	0,01609	8 926,04	1,13	399,40	31,49	1 023,19
154-155	154	1 080,00	181,69	- 0,19	25,93	804,08	2,95	273,02	1,37	278 033,67	0,01609	8 926,89	1,13	398,99	31,45	1 023,00
155-156	155,5	1 620,00	181,50	-	25,91	804,10	2,95	272,90	1,37	277 912,98	0,01609	13 391,62	1,70	397,48	31,34	1 023,00
<b>NZL</b>	155,6	108,00	181,50	- 0,90	25,87	804,13	2,95	272,73	1,37	277 732,54	0,01609	892,90	0,11	397,37	31,33	1 022,10
156a-157	156	432,00	180,60	1,12	25,87	804,13	2,95	272,71	1,37	277 720,53	0,01609	3 571,65	0,45	397,81	31,36	1 023,22
157-158	157	1 080,00	181,72	- 2,03	25,86	804,14	2,95	272,67	1,37	277 672,55	0,01609	8 929,45	1,13	395,56	31,19	1 021,19
158-159	158	1 080,00	179,69	0,63	25,84	804,16	2,95	272,55	1,37	277 552,80	0,01609	8 930,32	1,13	396,46	31,26	1 021,82
159-160	159	1 080,00	180,32	- 0,33	25,82	804,18	2,95	272,43	1,37	277 433,38	0,01609	8 931,15	1,13	394,70	31,12	1 021,49

HBN	Pk 0	DL	Elevation	dh	T	ρ	μ	ρ/μ	uj	Re	λ	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
160-161	160	1 080,00	179,99	- 1,08	25,80	804,20	2,95	272,32	1,37	277 314,26	0,01610	8 931,99	1,13	393,90	31,06	1 020,41
161-162	161	1 080,00	178,91	- 0,80	25,78	804,23	2,95	272,20	1,37	277 195,46	0,01610	8 932,84	1,13	393,84	31,05	1 019,61
162-163	162	1 080,00	178,11	1,70	25,76	804,25	2,96	272,08	1,37	277 076,98	0,01610	8 933,68	1,13	393,51	31,03	1 021,31
163-164	163	1 080,00	179,81	- 2,10	25,74	804,27	2,96	271,97	1,37	276 958,80	0,01610	8 934,53	1,13	390,68	30,81	1 019,21
164-165	164	1 080,00	177,71	2,20	25,72	804,29	2,96	271,85	1,37	276 840,94	0,01610	8 935,37	1,13	391,65	30,88	1 021,41
165-166	165	1 080,00	179,91	- 2,40	25,69	804,31	2,96	271,73	1,37	276 723,38	0,01610	8 936,21	1,13	388,31	30,62	1 019,01
166-167	166	1 080,00	177,51	1,04	25,67	804,33	2,96	271,62	1,37	276 606,13	0,01610	8 937,05	1,13	389,58	30,72	1 020,05
167-168	167	1 080,00	178,55	0,28	25,65	804,35	2,96	271,50	1,37	276 489,20	0,01610	8 937,87	1,13	387,41	30,55	1 020,33
168-169	168	1 080,00	178,83	- 2,12	25,63	804,37	2,96	271,39	1,37	276 372,57	0,01610	8 938,69	1,13	386,00	30,44	1 018,21
169-170	169	1 080,00	176,71	- 0,57	25,61	804,39	2,97	271,28	1,37	276 256,24	0,01611	8 939,54	1,13	386,98	30,52	1 017,64
170-171	170	1 080,00	176,14	1,58	25,59	804,41	2,97	271,16	1,37	276 140,22	0,01611	8 940,35	1,13	386,42	30,48	1 019,22
171-172	171	1 080,00	177,72	- 0,31	25,57	804,43	2,97	271,05	1,37	276 024,51	0,01611	8 941,18	1,13	383,71	30,26	1 018,91
172-173	172	1 080,00	177,41	- 0,90	25,55	804,45	2,97	270,94	1,37	275 909,11	0,01611	8 942,00	1,13	382,88	30,20	1 018,01
173-174	173	1 080,00	176,51	- 2,09	25,53	804,47	2,97	270,82	1,37	275 794,00	0,01611	8 942,82	1,13	382,65	30,18	1 015,92
174-175	174	1 080,00	174,42	0,29	25,51	804,49	2,97	270,71	1,37	275 679,20	0,01611	8 943,66	1,13	383,61	30,26	1 016,21
175-176	175	1 080,00	174,71	1,64	25,49	804,52	2,97	270,60	1,37	275 564,70	0,01611	8 944,46	1,13	382,18	30,15	1 017,85
176-177	176	1 080,00	176,35	0,86	25,47	804,54	2,97	270,48	1,37	275 450,51	0,01611	8 945,28	1,13	379,41	29,93	1 018,71
177-178	177	1 080,00	177,21	- 3,40	25,45	804,56	2,98	270,37	1,37	275 336,61	0,01611	8 946,09	1,13	377,42	29,77	1 015,31
178-179	178	1 080,01	173,81	0,02	25,43	804,58	2,98	270,26	1,37	275 223,01	0,01611	8 946,95	1,13	379,68	29,95	1 015,33
179-180	179	1 080,00	173,83	- 1,26	25,41	804,60	2,98	270,15	1,37	275 109,71	0,01612	8 947,71	1,13	378,53	29,86	1 014,07
180-181	180	1 080,00	172,57	1,78	25,39	804,62	2,98	270,04	1,37	274 996,72	0,01612	8 948,53	1,13	378,66	29,87	1 015,85
181-182	181	1 080,00	174,35	1,46	25,37	804,64	2,98	269,93	1,37	274 884,01	0,01612	8 949,34	1,13	375,74	29,64	1 017,31
182-183	182	1 080,00	175,81	- 1,15	25,35	804,66	2,98	269,82	1,37	274 771,61	0,01612	8 950,14	1,13	373,15	29,44	1 016,16
183-184	183	1 080,00	174,66	- 0,97	25,33	804,68	2,98	269,71	1,37	274 659,50	0,01612	8 950,94	1,13	373,16	29,44	1 015,19
184-185	184	1 080,00	173,69	- 1,58	25,31	804,70	2,98	269,60	1,37	274 547,69	0,01612	8 951,74	1,13	373,00	29,43	1 013,61
185-186	185	1 080,00	172,11	- 0,80	25,29	804,72	2,99	269,49	1,37	274 436,17	0,01612	8 952,55	1,13	373,45	29,46	1 012,81
186-187	186	1 080,00	171,31	- 2,54	25,27	804,74	2,99	269,38	1,37	274 324,95	0,01612	8 953,34	1,13	373,11	29,44	1 010,27
187-188	187	1 080,00	168,77	1,54	25,25	804,75	2,99	269,27	1,37	274 214,01	0,01612	8 954,16	1,13	374,52	29,55	1 011,81
188-189	188	1 080,00	170,31	1,70	25,23	804,77	2,99	269,16	1,37	274 103,37	0,01613	8 954,94	1,13	371,84	29,34	1 013,51
189-190	189	1 080,00	172,01	- 3,50	25,21	804,79	2,99	269,05	1,37	273 993,03	0,01613	8 955,73	1,13	369,01	29,12	1 010,01
190-191	190	1 080,01	168,51	2,02	25,19	804,81	2,99	268,95	1,37	273 882,97	0,01613	8 956,56	1,13	371,37	29,30	1 012,03
191-192	191	1 080,00	170,53	- 0,60	25,17	804,83	2,99	268,84	1,37	273 773,20	0,01613	8 957,32	1,13	368,22	29,06	1 011,43
192-193	192	1 080,00	169,93	- 2,02	25,15	804,85	3,00	268,73	1,37	273 663,73	0,01613	8 958,09	1,13	367,69	29,01	1 009,41
193-194	193	1 080,00	167,91	- 1,55	25,13	804,87	3,00	268,62	1,37	273 554,54	0,01613	8 958,89	1,13	368,57	29,08	1 007,86
194-195	194	1 080,00	166,36	2,15	25,11	804,89	3,00	268,52	1,37	273 445,64	0,01613	8 959,67	1,13	368,99	29,12	1 010,01
195-196	195	1 080,00	168,51	- 1,39	25,09	804,91	3,00	268,41	1,37	273 337,02	0,01613	8 960,46	1,13	365,70	28,86	1 008,62
196-197	196	1 080,00	167,12	- 0,75	25,07	804,93	3,00	268,30	1,37	273 228,70	0,01613	8 961,23	1,13	365,96	28,88	1 007,87
197-198	197	1 080,00	166,37	- 1,14	25,05	804,95	3,00	268,20	1,37	273 120,66	0,01613	8 962,01	1,13	365,57	28,85	1 006,73
198-199	198	1 080,00	165,23	- 1,82	25,03	804,97	3,00	268,09	1,37	273 012,90	0,01614	8 962,79	1,13	365,58	28,85	1 004,91
199-200	199	1 080,00	163,41	1,50	25,01	804,99	3,00	267,99	1,37	272 905,43	0,01614	8 963,57	1,14	366,26	28,91	1 006,41
200-201	200	1 080,00	164,91	- 0,57	24,99	805,01	3,01	267,88	1,37	272 798,24	0,01614	8 964,34	1,14	363,63	28,70	1 005,84
201-202	201	1 080,00	164,34	- 2,97	24,98	805,02	3,01	267,78	1,37	272 691,33	0,01614	8 965,10	1,14	363,06	28,65	1 002,87
202-203	202	1 080,00	161,37	- 0,97	24,96	805,04	3,01	267,67	1,37	272 584,71	0,01614	8 965,91	1,14	364,90	28,80	1 001,90
203-204	203	1 080,00	160,40	2,51	24,94	805,06	3,01	267,57	1,37	272 478,37	0,01614	8 966,64	1,14	364,73	28,79	1 004,41
204-205	204	1 080,00	162,91	- 1,20	24,92	805,08	3,01	267,46	1,37	272 372,30	0,01614	8 967,43	1,14	361,09	28,50	1 003,21
205-206	205	1 080,00	161,71	- 0,60	24,90	805,10	3,01	267,36	1,37	272 266,52	0,01614	8 968,18	1,14	361,15	28,51	1 002,61
206-207	206	1 080,00	161,11	- 1,10	24,88	805,12	3,01	267,25	1,37	272 161,02	0,01614	8 968,94	1,14	360,61	28,47	1 001,51
207-208	207	1 080,00	160,01	3,30	24,86	805,14	3,01	267,15	1,37	272 055,80	0,01614	8 969,70	1,14	360,58	28,46	1 004,81
208-209	208	1 080,01	163,31	2,80	24,84	805,16	3,02	267,05	1,37	271 950,85	0,01615	8 970,50	1,14	356,14	28,11	1 007,61
209-210	209	1 080,00	166,11	2,25	24,82	805,17	3,02	266,95	1,37	271 846,18	0,01615	8 971,25	1,14	352,21	27,80	1 009,86
210-211	210	1 080,00	168,36	- 0,64	24,81	805,19	3,02	266,84	1,37	271 741,79	0,01615	8 971,99	1,14	348,82	27,54	1 009,22
211-212	211	1 080,00	167,72	0,53	24,79	805,21	3,02	266,74	1,37	271 637,67	0,01615	8 972,73	1,14	348,33	27,50	1 009,75
212-213	212	1 080,00	168,25	- 3,59	24,77	805,23	3,02	266,64	1,37	271 533,83	0,01615	8 973,48	1,14	346,66	27,37	1 006,16
213-214	213	1 080,01	164,66	4,16	24,75	805,25	3,02	266,54	1,37	271 430,26	0,01615	8 974,28	1,14	349,11	27,56	1 010,32
214-215	214	1 080,01	168,82	- 13,96	24,73	805,27	3,02	266,44	1,37	271 326,97	0,01615	8 975,05	1,14	343,82	27,14	996,36

<b>HBN</b>	<b>Pk 0</b>	<b>DL</b>	<b>Elevation</b>	<b>dh</b>	<b>T</b>	<b><math>\rho</math></b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\rho/\mu</math></b>	<b><math>uj</math></b>	<b><math>Re</math></b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>dpi (Pa)</math></b>	<b><math>dpi (m)</math></b>	<b>H (m)</b>	<b>H (bar)</b>	<b>PMS(m)</b>
215-216	215	1 080,09	154,86	2,19	24,71	805,28	3,02	266,33	1,37	271 223,94	0,01615	8 976,48	1,14	356,64	28,16	998,55
216-217	216	1 080,00	157,05	0,32	24,70	805,30	3,02	266,23	1,37	271 121,19	0,01615	8 976,49	1,14	353,31	27,90	998,87
217-218	217	1 080,00	157,37	0,45	24,68	805,32	3,03	266,13	1,37	271 018,71	0,01615	8 977,22	1,14	351,86	27,78	999,32
218-219	218	1 080,00	157,82	- 3,78	24,66	805,34	3,03	266,03	1,37	270 916,50	0,01616	8 977,96	1,14	350,27	27,66	995,54
219-220	219	1 080,01	154,04	- 0,42	24,64	805,36	3,03	265,93	1,37	270 814,56	0,01616	8 978,76	1,14	352,92	27,87	995,12
220-221	220	1 080,00	153,62	- 0,51	24,62	805,37	3,03	265,83	1,37	270 712,90	0,01616	8 979,44	1,14	352,20	27,81	994,61
221-222	221	1 080,00	153,11	1,80	24,61	805,39	3,03	265,73	1,37	270 611,50	0,01616	8 980,18	1,14	351,57	27,76	996,41
222-223	222	1 080,00	154,91	- 2,45	24,59	805,41	3,03	265,63	1,37	270 510,37	0,01616	8 980,93	1,14	348,64	27,53	993,96
223-224	223	1 080,00	152,46	1,91	24,57	805,43	3,03	265,53	1,37	270 409,50	0,01616	8 981,68	1,14	349,95	27,63	995,87
224-225	224	1 080,00	154,37	3,34	24,55	805,45	3,03	265,44	1,37	270 308,90	0,01616	8 982,40	1,14	346,90	27,39	999,21
225-226	225	1 080,01	157,71	6,66	24,53	805,46	3,04	265,34	1,37	270 208,57	0,01616	8 983,16	1,14	342,43	27,04	1 005,87
226-227	226	1 080,02	164,37	- 2,60	24,52	805,48	3,04	265,24	1,37	270 108,51	0,01616	8 984,02	1,14	334,63	26,43	1 003,27
227-228	227	1 080,00	161,77	- 9,72	24,50	805,50	3,04	265,14	1,37	270 008,70	0,01616	8 984,60	1,14	336,09	26,54	993,55
228-229	228	1 080,04	152,05	- 0,96	24,48	805,52	3,04	265,04	1,37	269 909,17	0,01617	8 985,66	1,14	344,67	27,22	992,59
229-230	229	1 080,00	151,09	4,62	24,46	805,53	3,04	264,95	1,37	269 809,89	0,01617	8 986,03	1,14	344,50	27,21	997,21
230-231	230	1 080,01	155,71	1,40	24,45	805,55	3,04	264,85	1,37	269 710,88	0,01617	8 986,83	1,14	338,74	26,75	998,61
231-232	231	1 080,00	157,11	- 8,00	24,43	805,57	3,04	264,75	1,37	269 612,13	0,01617	8 987,48	1,14	336,20	26,55	990,61
232-233	232	1 080,03	149,11	0,30	24,41	805,59	3,04	264,66	1,37	269 513,64	0,01617	8 988,44	1,14	343,07	27,10	990,91
233-234	233	1 080,00	149,41	- 0,33	24,39	805,60	3,05	264,56	1,37	269 415,41	0,01617	8 988,91	1,14	341,63	26,98	990,58
234-235	234	1 080,00	149,08	- 1,61	24,38	805,62	3,05	264,46	1,37	269 317,44	0,01617	8 989,62	1,14	340,82	26,92	988,97
235-236	235	1 080,00	147,47	- 0,16	24,36	805,64	3,05	264,37	1,37	269 219,73	0,01617	8 990,35	1,14	341,29	26,96	988,81
236-237	236	1 080,00	147,31	- 1,16	24,34	805,66	3,05	264,27	1,37	269 122,28	0,01617	8 991,05	1,14	340,32	26,88	987,65
237-238	237	1 080,00	146,15	0,17	24,32	805,67	3,05	264,18	1,37	269 025,09	0,01617	8 991,77	1,14	340,34	26,88	987,82
238-239	238	1 080,00	146,32	0,01	24,31	805,69	3,05	264,08	1,37	268 928,15	0,01617	8 992,47	1,14	339,03	26,78	987,83
239-240	239	1 080,00	146,33	- 1,32	24,29	805,71	3,05	263,99	1,37	268 831,47	0,01618	8 993,18	1,14	337,88	26,69	986,51
240-241	240	1 080,00	145,01	0,50	24,27	805,72	3,05	263,89	1,37	268 735,05	0,01618	8 993,89	1,14	338,06	26,71	987,01
241-242	241	1 080,00	145,51	- 0,60	24,25	805,74	3,05	263,80	1,37	268 638,88	0,01618	8 994,59	1,14	336,43	26,58	986,41
242-243	242	1 080,00	144,91	13,05	24,24	805,76	3,06	263,70	1,37	268 542,97	0,01618	8 995,30	1,14	335,89	26,53	999,46
243-244	243	1 080,08	157,96	2,37	24,22	805,77	3,06	263,61	1,37	268 447,31	0,01618	8 996,65	1,14	321,70	25,41	1 001,83
244-245	244	1 080,00	160,33	- 0,47	24,20	805,79	3,06	263,51	1,37	268 351,90	0,01618	8 996,72	1,14	318,19	25,14	1 001,36
245-246	245	1 080,00	159,86	- 14,15	24,19	805,81	3,06	263,42	1,37	268 256,74	0,01618	8 997,40	1,14	317,52	25,09	987,21
246-247	246	1 080,09	145,71	5,90	24,17	805,82	3,06	263,33	1,37	268 161,84	0,01618	8 998,87	1,14	330,54	26,11	993,11
247-248	247	1 080,02	151,61	- 4,10	24,15	805,84	3,06	263,23	1,37	268 067,18	0,01618	8 998,92	1,14	323,50	25,56	989,01
248-249	248	1 080,01	147,51	- 4,00	24,14	805,86	3,06	263,14	1,37	267 972,78	0,01618	8 999,55	1,14	326,46	25,79	985,01
249-250	249	1 080,01	143,51	2,70	24,12	805,87	3,06	263,05	1,37	267 878,63	0,01618	9 000,24	1,14	329,32	26,02	987,71
250-251	250	1 080,00	146,21	- 2,99	24,10	805,89	3,06	262,96	1,37	267 784,73	0,01619	9 000,89	1,14	325,48	25,72	984,72
251-252	251	1 080,00	143,22	- 2,69	24,09	805,91	3,07	262,87	1,37	267 691,08	0,01619	9 001,59	1,14	327,33	25,86	982,03
252-253	252	1 080,00	140,53	0,43	24,07	805,92	3,07	262,77	1,37	267 597,68	0,01619	9 002,27	1,14	328,88	25,99	982,46
253-254	253	1 080,00	140,96	- 1,05	24,05	805,94	3,07	262,68	1,37	267 504,52	0,01619	9 002,93	1,14	327,32	25,86	981,41
254-255	254	1 080,00	139,91	3,07	24,04	805,96	3,07	262,59	1,37	267 411,61	0,01619	9 003,62	1,14	327,23	25,86	984,48
255-256	255	1 080,00	142,98	- 1,87	24,02	805,97	3,07	262,50	1,37	267 318,95	0,01619	9 004,33	1,14	323,02	25,52	982,61
256-257	256	1 080,00	141,11	3,86	24,00	805,99	3,07	262,41	1,37	267 226,53	0,01619	9 004,99	1,14	323,75	25,58	986,47
257-258	257	1 080,01	144,97	- 4,22	23,99	806,00	3,07	262,32	1,37	267 134,36	0,01619	9 005,71	1,14	318,75	25,19	982,25
258-259	258	1 080,01	140,75	2,75	23,97	806,02	3,07	262,23	1,37	267 042,43	0,01619	9 006,40	1,14	321,83	25,43	985,00
259-260	259	1 080,00	143,50	0,21	23,96	806,04	3,07	262,14	1,37	266 950,74	0,01619	9 007,04	1,14	317,94	25,13	985,21
260-261	260	1 080,00	143,71	- 1,50	23,94	806,05	3,08	262,05	1,37	266 859,30	0,01619	9 007,69	1,14	316,59	25,02	983,71
261-262	261	1 080,00	142,21	1,90	23,92	806,07	3,08	261,96	1,37	266 768,10	0,01620	9 008,37	1,14	316,95	25,05	985,61
262-263	262	1 080,00	144,11	- 3,20	23,91	806,09	3,08	261,87	1,37	266 677,15	0,01620	9 009,05	1,14	313,91	24,81	982,41
263-264	263	1 080,00	140,91	- 3,06	23,89	806,10	3,08	261,78	1,37	266 586,43	0,01620	9 009,74	1,14	315,98	24,97	979,35
264-265	264	1 080,00	137,85	- 0,77	23,87	806,12	3,08	261,69	1,37	266 495,95	0,01620	9 010,41	1,14	317,90	25,12	978,58
265-266	265	1 080,00	137,08	- 0,27	23,86	806,13	3,08	261,60	1,37	266 405,72	0,01620	9 011,04	1,14	317,53	25,10	978,31
266-267	266	1 080,00	136,81	1,40	23,84	806,15	3,08	261,51	1,37	266 315,72	0,01620	9 011,70	1,14	316,66	25,03	979,71
267-268	267	1 080,00	138,21	1,49	23,83	806,16	3,08	261,43	1,37	266 225,96	0,01620	9 012,38	1,14	314,12	24,83	981,20
268-269	268	1 080,00	139,70	4,91	23,81	806,18	3,08	261,34	1,37	266 136,44	0,01620	9 013,04	1,14	311,49	24,62	986,11
269-270	269	1 080,01	144,61	- 5,50	23,79	806,20	3,09	261,25	1,37	266 047,16	0,01620	9 013,78	1,14	305,44	24,14	980,61



HBN	Pk 0	DL	Elevation	dh	T	$\rho$	$\mu$	$\rho/\mu$	uj	Re	$\lambda$	dpi (Pa)	dpi (m)	H (m)	H (bar)	PMS(m)
270-271	270	1 080,01	139,11	- 5,80	23,78	806,21	3,09	261,16	1,37	265 958,11	0,01620	9 014,47	1,14	309,80	24,49	974,81
271-272	271	1 080,02	133,31	- 0,90	23,76	806,23	3,09	261,08	1,37	265 869,30	0,01620	9 015,14	1,14	314,46	24,86	973,91
272-273	272	1 080,00	132,41	5,50	23,75	806,24	3,09	260,99	1,37	265 780,73	0,01621	9 015,67	1,14	314,22	24,84	979,41
273-274	273	1 080,01	137,91	28,10	23,73	806,26	3,09	260,90	1,37	265 692,39	0,01621	9 016,44	1,14	307,58	24,31	1 007,51
274-275	274	1 080,37	166,01	- 26,80	23,72	806,27	3,09	260,82	1,37	265 604,29	0,01621	9 020,03	1,14	278,34	22,00	980,71
275-276	275	1 080,33	139,21	21,99	23,70	806,29	3,09	260,73	1,37	265 516,39	0,01621	9 020,40	1,14	304,00	24,03	1 002,70
276-277	276	1 080,22	161,20	4,82	23,69	806,30	3,09	260,64	1,37	265 428,72	0,01621	9 020,15	1,14	280,87	22,20	1 007,52
277-278	277	1 080,01	166,02	- 1,80	23,67	806,32	3,09	260,56	1,37	265 341,30	0,01621	9 019,02	1,14	274,91	21,73	1 005,72
278-279	278	1 080,00	164,22	- 0,09	23,65	806,34	3,10	260,47	1,37	265 254,12	0,01621	9 019,59	1,14	275,57	21,78	1 005,63
279-280	279	1 080,00	164,13	- 12,06	23,64	806,35	3,10	260,39	1,37	265 167,18	0,01621	9 020,22	1,14	274,52	21,70	993,57
280-281	280	1 080,07	152,07	4,45	23,62	806,37	3,10	260,30	1,37	265 080,47	0,01621	9 021,43	1,14	285,44	22,57	998,02
281-282	281	1 080,01	156,52	12,72	23,61	806,38	3,10	260,22	1,37	264 993,99	0,01621	9 021,58	1,14	279,85	22,12	1 010,74
282-283	282	1 080,07	169,24	- 4,92	23,59	806,40	3,10	260,13	1,37	264 907,74	0,01621	9 022,77	1,14	265,98	21,03	1 005,82
283-284	283	1 080,01	164,32	- 8,80	23,58	806,41	3,10	260,05	1,37	264 821,71	0,01621	9 022,88	1,14	269,76	21,33	997,02
284-285	284	1 080,04	155,52	10,10	23,56	806,43	3,10	259,96	1,37	264 735,91	0,01622	9 023,73	1,14	277,42	21,93	1 007,12
285-286	285	1 080,05	165,62	- 3,43	23,55	806,44	3,10	259,88	1,37	264 650,35	0,01622	9 024,46	1,14	266,18	21,05	1 003,69
286-287	286	1 080,01	162,19	4,73	23,53	806,46	3,10	259,80	1,37	264 565,00	0,01622	9 024,74	1,14	268,47	21,23	1 008,42
287-288	287	1 080,01	166,92	- 0,50	23,52	806,47	3,11	259,71	1,37	264 479,89	0,01622	9 025,42	1,14	262,60	20,76	1 007,92
288-289	288	1 080,00	166,42	3,99	23,50	806,49	3,11	259,63	1,37	264 395,01	0,01622	9 025,97	1,14	261,96	20,71	1 011,91
289-290	289	1 080,01	170,41	0,36	23,49	806,50	3,11	259,55	1,37	264 310,34	0,01622	9 026,66	1,14	256,83	20,31	1 012,27
290-291	290	1 080,00	170,77	0,95	23,47	806,52	3,11	259,46	1,37	264 225,91	0,01622	9 027,23	1,14	255,33	20,19	1 013,22
291-292	290,44	475,20	171,72	0,28	23,46	806,53	3,11	259,38	1,37	264 141,70	0,01622	3 972,26	0,50	253,88	20,07	1 013,50
<b>HEH</b>	295,45	5 410,80	172,00		23,45	806,54	3,11	259,34	1,37	264 104,72	0,01622	45 230,93	5,72	247,88	19,53	841,50
						<b>803,71</b>	<b>2,93</b>	<b>274,98</b>	<b>1,37</b>	<b>280 028,52</b>	<b>0,01607</b>	<b>2 589 464,97</b>	<b>328,39</b>			

## **ANNEXE 3**

## Example 8 - Blackoil Gathering Network

### Simulation Objective

This simulation determines the flow distribution and the overall capacity of the system.

### Simulation Model

The gathering system is comprised of several wells, flow lines and trunk lines with a loop [C-D-E] in the main trunk line. The field is divided into four regions - A, I, G and H. All the wells in a region have the same pressure, temperature and fluid properties. The user needs to determine the flow distribution and the overall capacity of the system.

Figure 1-41: Blackoil Gathering Network

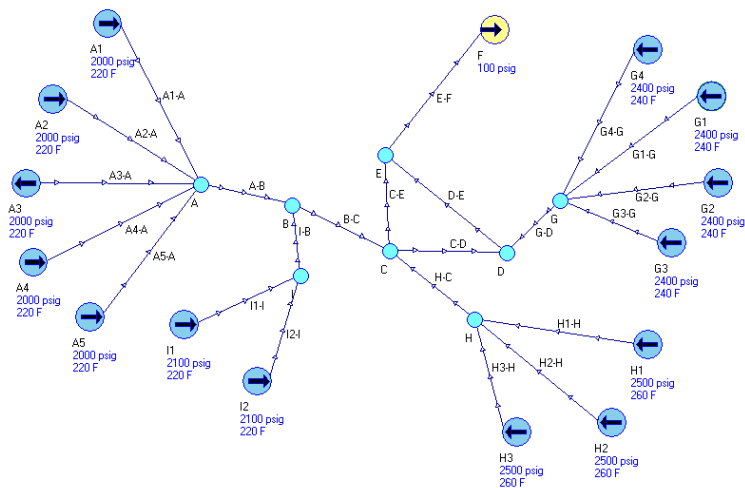
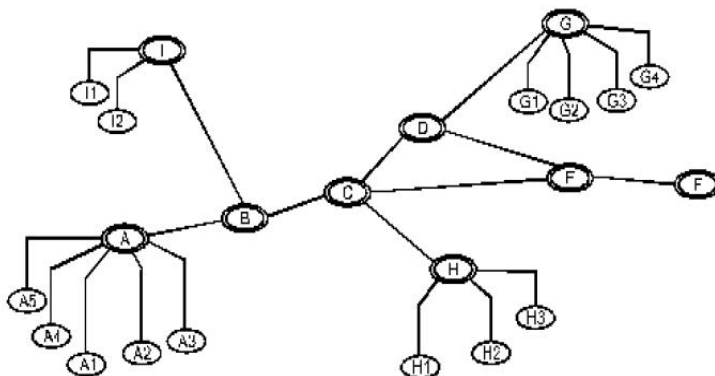
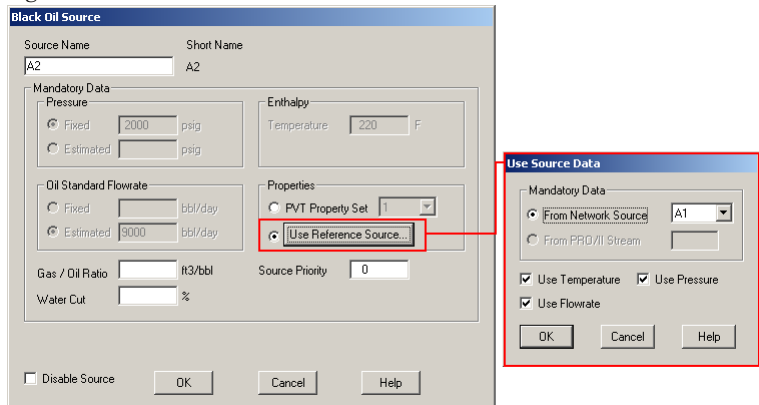


Figure 1-42: Schematic Representation of Blackoil Gathering Network



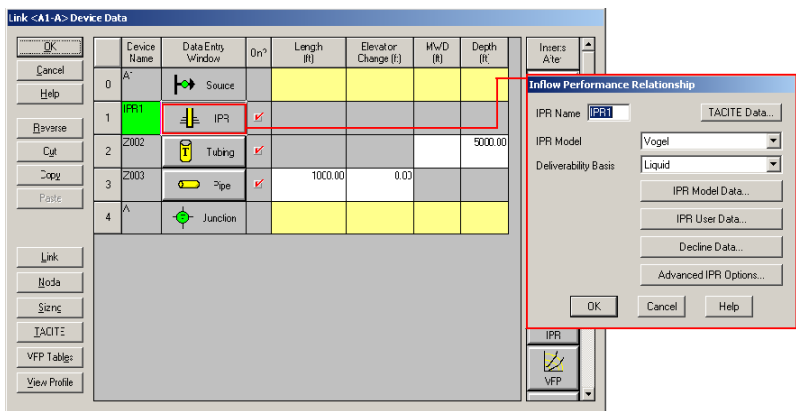
The wells in each area have the same properties and conditions. The reference source facility can be used to simplify the input data for the Source nodes (see Figure 1-43).

Figure 1-43: Blackoil Source



Click the link (A4-A) to display *Device Data dialog box* (see Figure 1-44). The Beggs and Brill (BB) pressure drop correlation is used for all flow lines and trunk line calculations. The Hagedorn and Brown (HB) correlation is used for the wells. The well inflow performance relationships are modeled using Vogel coefficients.

Figure 1-44: Inflow Performance Relationship Dialog Box



# Input Data

```
$General Data Section
$
TITLE PROBLEM=EXAMPLE8, USER=SIMSCI, DATE=10/01/97
$
DESCRIPTION BLACKOIL LOOPED GATHERING NETWORK
$
DIMENSION RATE(LV)=BPD
$
CALCULATION NETWORK, Blackoil, PVTTAB
$
FCODE PIPE=BB, TUBING=HB
$
DEFAULT IDPIPE=10, IDTUBING=3.476, IDRISER=10, *
  IDANNULUS=6.065, TAMBIENT=120, TGRAD=2, *
  UPIPE=1, UTUBING=1, URISER=1, *
  UANNULUS=1
$
PRINT INPUT=FULL, DEVICE=FULL, PLOT=FULL, *
  PROPERTY=FULL, MAP=TAITEL, CONNECT=NONE, *
  DATABASE=FULL, SIMULATOR=PART
$
SEGMENT AUTO=OFF, DLHORIZ(FT)=2000, DLVERT(FT)=500
$
$Network Data Section
$
NETWORK DATA
$
SOLUTION PBALANCE, FLOWAL=2, STEP=1, *
  MAXITER=50, QDAMP=5000, HALVINGS=1
$
TOLERANCE PRESSURE=0.1
$
$PVT Data Section
$
PVT PROPERTY DATA
$
DIME MAXDIME=TABL,10 / VARI,12
SET SETNO=1, GRAV(OIL,API)=33, GRAV(GAS,SPGR)=0.85, *
  GRAV(WATER,SPGR)=1.06
SET SETNO=2, GRAV(OIL,API)=30, GRAV(GAS,SPGR)=0.9, *
  GRAV(WATER,SPGR)=1.06
SET SETNO=3, GRAV(OIL,API)=26, GRAV(GAS,SPGR)=0.95, *
  GRAV(WATER,SPGR)=1.06
$
$Structure Data Section
$
STRUCTURE DATA
$
SOURCE NAME=A1, IDNAME=A1, PRIORITY=0, *
  SETNO=1, PRES=2000, TEMP=220, *
  RATE(ESTI)=9000, GOR=650, WCUT=5, *
  XCORD=245, YCORD=-264
$
SOURCE NAME=G1, IDNAME=G1, PRIORITY=0, *
  SETNO=2, PRES=2400, TEMP=240, *
  RATE(ESTI)=4300, GOR=650, WCUT=5, *
  XCORD=1899, YCORD=-101
$
SOURCE NAME=H1, IDNAME=H1, PRIORITY=0, *
  SETNO=3, PRES=2500, TEMP=260, *
  RATE(ESTI)=4500, GOR=650, WCUT=5, *
  XCORD=1875, YCORD=660
$
SOURCE NAME=I1, IDNAME=I1, PRIORITY=0, *
  SETNO=1, PRES=2100, TEMP=220, *
  RATE(ESTI)=5000, GOR=650, WCUT=5, *
  XCORD=475, YCORD=640
$
SOURCE NAME=A2, IDNAME=A2, PRIORITY=0, *
```

```

REFSOURCE=A1, XCORD=81, YCORD=-38
$
SOURCE NAME=A3, IDNAME=A3, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=A1, XCORD=0, YCORD=216
$
SOURCE NAME=A4, IDNAME=A4, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=A1, XCORD=22, YCORD=453
$
SOURCE NAME=A5, IDNAME=A5, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=A1, XCORD=191, YCORD=618
$
SOURCE NAME=G2, IDNAME=G2, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=G1, XCORD=1970, YCORD=130
$
SOURCE NAME=G3, IDNAME=G3, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=G1, RATE(ESTI)=4400, GOR=0, *
WCUT=0, XCORD=1940, YCORD=395
$
SOURCE NAME=G4, IDNAME=G4, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=G1, XCORD=1753, YCORD=-245
$
SOURCE NAME=H2, IDNAME=H2, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=H1, XCORD=1770, YCORD=867
$
SOURCE NAME=H3, IDNAME=H3, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=H1, XCORD=1475, YCORD=963
$
SOURCE NAME=I2, IDNAME=I2, PRIORITY=0, *
REFSOURCE=I1, XCORD=694, YCORD=810
$
SINK NAME=F, IDNAME=F, PRES=100, *
RATE(ESTI)=80000, XCORD=1410, YCORD=-245
$
JUNCTION NAME=A, IDNAME=A, PRES(ESTI)= 300, *
XCORD=550, YCORD=243
JUNCTION NAME=B, IDNAME=B, PRES(ESTI)= 245, *
XCORD=823, YCORD=304
JUNCTION NAME=C, IDNAME=C, PRES(ESTI)= 240, *
XCORD=1116, YCORD=443
JUNCTION NAME=D, IDNAME=D, PRES(ESTI)= 238, *
XCORD=1468, YCORD=448
JUNCTION NAME=E, IDNAME=E, PRES(ESTI)= 150, *
XCORD=1102, YCORD=153
JUNCTION NAME=G, IDNAME=G, PRES(ESTI)= 220, *
XCORD=1630, YCORD=290
JUNCTION NAME=H, IDNAME=H, PRES(ESTI)= 275, *
XCORD=1372, YCORD=649
JUNCTION NAME=I, IDNAME=I, PRES(ESTI)= 240, *
XCORD=848, YCORD=518
$
LINK NAME=A-B, FROM=A, TO=B, *
IDNAME=A-B, IDFROM=A, IDTO=B, *
PRINT
PIPE NAME=Z016, LENGTH=70000, ECHG=-100, *
ID=19, U=1
$
LINK NAME=A1-A, FROM=A1, TO=A, *
IDNAME=A1-A, IDFROM=A1, IDTO=A, *
PRINT
IPR NAME=IPR1, TYPE=VOGEL, *
IVAL=BASIS, 2, *
RVAL=QMAX, 18400 / VOGCON, 0.2 / VOGEXP, 1 / *
UPTIME,1 / OPEN,1
TUBING NAME=Z002, DEPTH=5000, U=1
PIPE NAME=Z003, LENGTH=1000, ECHG=0, *
ID=3.476, U=1
$
LINK NAME=A2-A, FROM=A2, TO=A, *
IDNAME=A2-A, IDFROM=A2, IDTO=A, *
PRINT
IPR NAME=IPR2, TYPE=VOGEL, *
IVAL=BASIS, 2, *

```

```

RVAL=QMAX, 18000 / VOGCON, 0.2 / VOGEXP, 1 / *
UPTIME,1 / OPEN,1
TUBING NAME=Z005, LENGTH=5500, DEPTH=5200, *
U=1
PIPE NAME=Z006, LENGTH=800, ECHG=-5, *
ID=3.476, U=1
$
LINK NAME=A3-A, FROM=A3, TO=A, *
IDNAME=A3-A, IDFROM=A3, IDTO=A, *
PRINT
IPR NAME=IPR3, TYPE=VOGEL, *
IVAL=BASIS, 2, *
RVAL=QMAX, 17500 / VOGCON, 0.2 / VOGEXP, 1 / *
UPTIME,1 / OPEN,1
TUBING NAME=Z008, LENGTH=5000, DEPTH=4950, *
U=1
PIPE NAME=Z009, LENGTH=1100, ECHG=5, *
ID=3.476, U=1
$
LINK NAME=A4-A, FROM=A4, TO=A, *
IDNAME=A4-A, IDFROM=A4, IDTO=A, *
PRINT
IPR NAME=IPR4, TYPE=VOGEL, *
IVAL=BASIS, 2, *
RVAL=QMAX, 19000 / VOGCON, 0.2 / VOGEXP, 1 / *
UPTIME,1 / OPEN,1
TUBING NAME=Z011, LENGTH=5500, DEPTH=5300, *
U=1
PIPE NAME=Z012, LENGTH=850, ECHG=0, *
ID=3.476, U=1
$
LINK NAME=A5-A, FROM=A5, TO=A, *
IDNAME=A5-A, IDFROM=A5, IDTO=A, *
PRINT
IPR NAME=IPR5, TYPE=VOGEL, *
IVAL=BASIS, 2, *
RVAL=QMAX, 18100 / VOGCON, 0.2 / VOGEXP, 1 / *
UPTIME,1 / OPEN,1
TUBING NAME=Z014, LENGTH=5440, DEPTH=5100, *
U=1
PIPE NAME=Z015, LENGTH=500, ECHG=0, *
ID=3.476, U=1
$
LINK NAME=B-C, FROM=B, TO=C, *
IDNAME=B-C, IDFROM=B, IDTO=C, *
PRINT
PIPE NAME=Z022, LENGTH=3000, ID=19, *
U=1
$
LINK NAME=C-D, FROM=C, TO=D, *
IDNAME=C-D, IDFROM=C, IDTO=D, *
PRINT
PIPE NAME=Z033, LENGTH=15000, ECHG=100, *
ID=23, U=1
$
LINK NAME=C-E, FROM=C, TO=E, *
IDNAME=C-E, IDFROM=C, IDTO=E, *
PRINT
PIPE NAME=Z044, LENGTH=1.150e+005, ECHG=200, *
ID=23, U=1
$
LINK NAME=D-E, FROM=D, TO=E, *
IDNAME=D-E, IDFROM=D, IDTO=E, *
PRINT
PIPE NAME=Z043, LENGTH=1.100e+005, ECHG=200, *
ID=23, U=1
$
LINK NAME=E-F, FROM=E, TO=F, *
IDNAME=E-F, IDFROM=E, IDTO=F, *
PRINT
PIPE NAME=Z045, LENGTH=1.400e+005, ECHG=-550, *
ID=29, U=1

```

```

$
LINK NAME=G-D, FROM=G, TO=D, *
IDNAME=G-D, IDFROM=G, IDTO=D, *
PRINT
PIPE NAME=Z042, LENGTH=16000, ECHG=-100, *
ID=15.25, U=1
$
LINK NAME=G1-G, FROM=G1, TO=G, *
IDNAME=G1-G, IDFROM=G1, IDTO=G, *
PRINT
TUBING NAME=Z034, LENGTH=7000, DEPTH=6000, *
ID=2.441, U=1
PIPE NAME=Z035, LENGTH=500, ID=4, *
U=1
$
LINK NAME=G2-G, FROM=G2, TO=G, *
IDNAME=G2-G, IDFROM=G2, IDTO=G, *
PRINT
TUBING NAME=Z036, LENGTH=7100, DEPTH=6200, *
ID=2.441, U=1
PIPE NAME=Z037, LENGTH=1000, ECHG=-5, *
ID=4, U=1
$
LINK NAME=G3-G, FROM=G3, TO=G, *
IDNAME=G3-G, IDFROM=G3, IDTO=G, *
PRINT
TUBING NAME=Z038, LENGTH=6900, DEPTH=5900, *
ID=2.441, U=1
PIPE NAME=Z039, LENGTH=600, ECHG=-5, *
ID=4, U=1
$
LINK NAME=G4-G, FROM=G4, TO=G, *
IDNAME=G4-G, IDFROM=G4, IDTO=G, *
PRINT
TUBING NAME=Z040, LENGTH=7050, DEPTH=6000, *
ID=2.441, U=1
PIPE NAME=Z041, LENGTH=750, ECHG=0, *
ID=4, U=1
$
LINK NAME=H-C, FROM=H, TO=C, *
IDNAME=H-C, IDFROM=H, IDTO=C, *
PRINT
PIPE NAME=Z032, LENGTH=33000, ECHG=-50, *
ID=12, U=1
$
LINK NAME=H1-H, FROM=H1, TO=H, *
IDNAME=H1-H, IDFROM=H1, IDTO=H, *
PRINT
TUBING NAME=Z023, LENGTH=9000, DEPTH=7500, *
ID=2.441, U=1
TUBING NAME=Z024, LENGTH=4500, DEPTH=4000, *
ID=2.992, U=1
PIPE NAME=Z025, LENGTH=1000, ID=4, *
U=1
$
LINK NAME=H2-H, FROM=H2, TO=H, *
IDNAME=H2-H, IDFROM=H2, IDTO=H, *
PRINT
TUBING NAME=Z026, LENGTH=9100, DEPTH=7550, *
ID=2.441, U=1
TUBING NAME=Z027, LENGTH=4500, DEPTH=4100, *
ID=2.992, U=1
PIPE NAME=Z028, LENGTH=500, ECHG=-5, *
ID=4, U=1
$
LINK NAME=H3-H, FROM=H3, TO=H, *
IDNAME=H3-H, IDFROM=H3, IDTO=H, *
PRINT
TUBING NAME=Z029, LENGTH=8900, DEPTH=7400, *
ID=2.441, U=1
TUBING NAME=Z030, LENGTH=4300, DEPTH=3900, *
ID=2.992, U=1

```



```

PIPE NAME=Z031, LENGTH=650, ECHG=5, *
  ID=4, U=1
$
LINK NAME=I-B, FROM=I, TO=B, *
  IDNAME=I-B, IDFROM=I, IDTO=B, *
  PRINT
PIPE NAME=Z021, LENGTH=3000, ECHG=-100, *
  ID=10, U=1
$
LINK NAME=I1-I, FROM=I1, TO=I, *
  IDNAME=I1-I, IDFROM=I1, IDTO=I, *
  PRINT
TUBING NAME=Z017, LENGTH=6000, DEPTH=5000, *
  ID=2.441, U=1
PIPE NAME=Z018, LENGTH=500, ECHG=10, *
  ID=4, U=1
$
LINK NAME=I2-I, FROM=I2, TO=I, *
  IDNAME=I2-I, IDFROM=I2, IDTO=I, *
  PRINT
TUBING NAME=Z019, LENGTH=6100, DEPTH=5200, *
  ID=2.441, U=1
PIPE NAME=Z020, LENGTH=650, ECHG=0, *
  ID=4, U=1
$
$ End of keyword file...
$
END

```

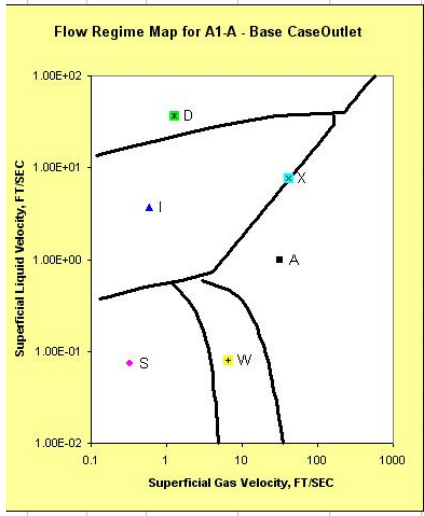
## Case Execution

The pressure drop correlations are used to calculate the flow regime in the wells and pipelines. In addition PIPEPHASE also uses the Taitel-Dukler-Barnea flow pattern map to determine the flow pattern at the exit of each link.

## Results

For Link A1-A, it can be seen that the flow pattern at the outlet (X) straddles the boundary between the Annular and Intermittent flow regimes (see Figure 1-45).

Figure 1-45: Flow Regime Map



A	Annular
B	Bubble
D	Disp. Bubble
I	Intermittent (Slug)
S	Strat. Smooth
W	Strat. Wavy
X	Link Outlet

## Example 20 - Generating Output Reports in Excel

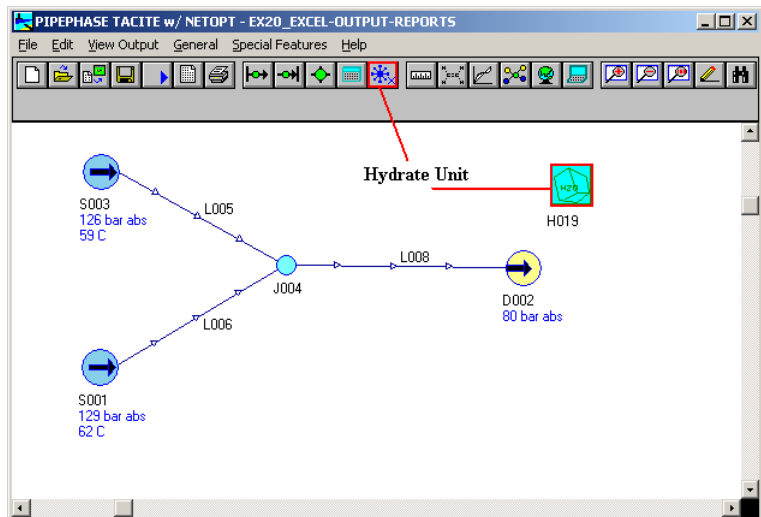
### Simulation Objective

In this simulation, based on EX13, a small composition network model has been created. For compositional simulation, the user has the option to add a Hydrate Unit to analyze the potential of hydrate formation in the network. Hydrate analysis can only be conducted at a "Node", which in PIPEPHASE is defined as a Source, Sink or Junction.

### Simulation Model

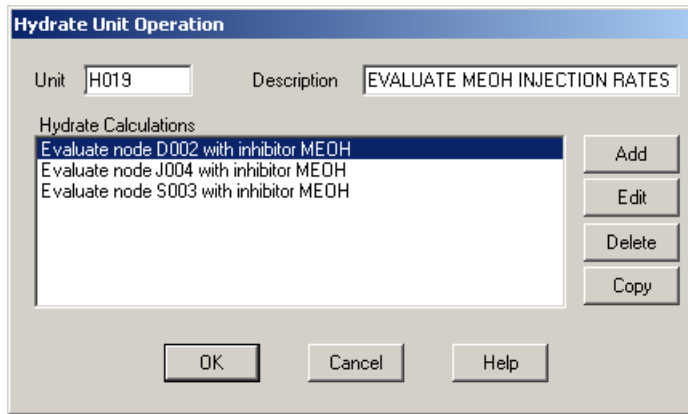
The Simulation Model for this example is shown in Figure 1-100.

Figure 1-100: Compositional Network Hydrates Model



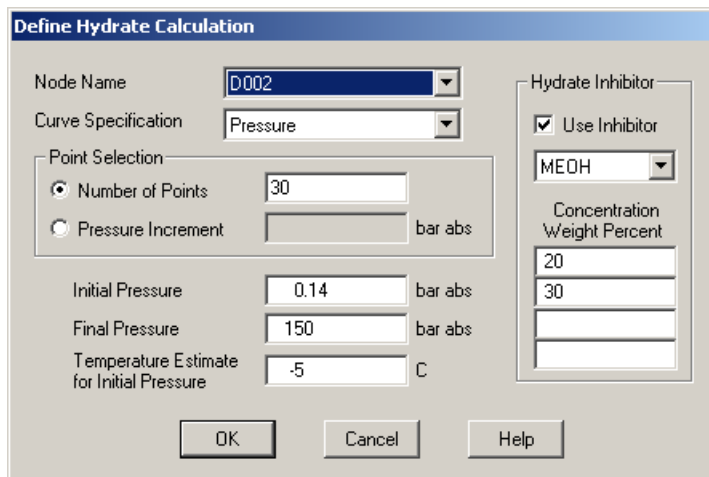
In this simulation, double click **Hydrate Unit** (H019) to bring up the *Hydrate Unit Operation dialog box* (see Figure 1-101).

Figure 1-101: Hydrate Unit Operation



Click **Edit** button located in *Hydrate Unit Operation dialog box* to display the *Define Hydrate Calculation dialog box* (see Figure 1-102). Users can conduct hydrate analysis at any node in a compositional network.

Figure 1-102: Define Hydrate Calculation Operation



Users can also simulate the effects of a hydrate inhibitor such as Methanol. Users are required to enter a temperature or pressure range across which they would like to determine the potential for forming hydrates.

After fully specifying the option in the Hydrate unit, the user can launch the simulation. Hydrate analysis will be conducted after the network simulation has been solved and the final temperature, pressure and compositional profiles have been calculated.

# Input Data

```
$General Data Section
$
TITLE PROJECT=HYDRATEEVAL, PROBLEM=NETWORK, USER=SIMSCI, *
DATE=06/20/02, SITE=BREA
$
DESCRIPTION Simple Compositional Network
DESCRIPTION Evaluate Temperature and Pressure Profiles
DESCRIPTION Generate Phase Envelopes in Excel via RAS
DESCRIPTION Superimpose Hydrate Curves with different MEOH concs.
$
DIMENSION Metric, DUTY=KJHR
$
CALCULATION NETWORK, Compositional, PRANDTL
$
FCODE PIPE=TACITE
$
DEFAULT NOMD=8, SCHE= 40, IDTUBING=102.26035, *
IDRISER=102.26035, IDANNULUS=154.05092, *
TAMBIENT=15.9, AIR, COND=0.02232, *
VISC=0.02, DENSITY(SPGR)=1, VELO=16.09344, *
HAUSEN
$
PRINT INPUT=FULL, DEVICE=FULL, PLOT=FULL, *
PROPERTY=FULL, MAP=TAITEL, DATABASE=FULL, *
SIMULATOR=PART
$
SEGMENT AUTO=ON, DLHORIZ(M)=609.59967, *
DLVERT(M)=152.39992
$
$Component Data Section
$
COMPONENT DATA
$
LIBID 1, CO2 / *
      2, C1 / *
      3, C2 / *
      4, C3 / *
      5, IC4 / *
      6, NC4 / *
      7, NC5 / *
      8, NC6 / *
      9, NC7 / *
     10, NC10
$
PHASE VL=1,10
$
$Network Data Section
$
NETWORK DATA
$
SOLUTION PBALANCE, FLOWAL=2, STEP=1
$
TOLERANCE PRESSURE=0.07
$
$Thermodynamic Data Section
$
THERMODYNAMIC DATA
$
METHOD SET=SET01, SYSTEM(VLE)=SRKS, DENSITY(L)=SRKS
$
KVALUE BANK=SimSci
$
$PVT Data Section
$
PVT PROPERTY DATA
$
SET SETNO=1, SET=SET01
$
$Structure Data Section
```

```

$
STRUCTURE DATA
$
SOURCE NAME=S001, IDNAME=S001, PRIORITY=0, *
PRES=129, TEMP=62, RATE(ESTI,W)=96000, *
XCORD=-979, YCORD=267, *
COMP(M)=1, 0.99 / 2, 20 / 3, 21 / *
4, 52 / 5, 2.11 / 6, 1.4 / *
7, 0.75 / 8, 0.75 / 9, 0.5 / *
10, 0.5
$
SOURCE NAME=S003, IDNAME=S003, PRIORITY=0, *
PRES=126, TEMP=59, RATE(ESTI,W)=56000, *
XCORD=-976, YCORD=-198, *
COMP(M)=1, 1 / 2, 59 / 3, 21 / *
4, 15 / 5, 1.25 / 6, 1 / *
7, 0.5 / 8, 0.5 / 9, 0.25 / *
10, 0.5
$
SINK NAME=D002, IDNAME=D002, PRES=80, *
RATE(ESTI)=1.500e+005, XCORD=28, YCORD=31
$
JUNCTION NAME=J004, IDNAME=J004, XCORD=-514, *
YCORD=47
$
LINK NAME=L005, FROM=S003, TO=J004, *
IDNAME=L005, IDFROM=S003, IDTO=J004
PIPE NAME=P012, LENGTH=234, 1235, *
6789, 4567, 1549, *
ECHG=9, 124, 98, *
34, 45, AIR
PIPE NAME=P011, LENGTH=156, AIR
SEPARATOR NAME=S013, *
COMPONENT=100 / 0 / 0 / *
0 / 0 / 0 / *
0 / 0 / 0 / *
0
$
$
LINK NAME=L006, FROM=S001, TO=J004, *
IDNAME=L006, IDFROM=S001, IDTO=J004
PIPE NAME=P015, LENGTH=2594, 2564, *
3598, 2679, 2578, *
ECHG=58, 65, 59, *
78, 93, AIR
SEPARATOR NAME=S016, PERCENT(GAS)=15
$
LINK NAME=L008, FROM=J004, TO=D002, *
IDNAME=L008, IDFROM=J004, IDTO=D002
PIPE NAME=P018, LENGTH=596, 1579, *
1566, 4851, 849, *
ECHG=-59, -54, -89, *
-23, -94, AIR
$
$UNIT OPERATION Data Section
$
UNIT OPERATION DATA
$
HYDRATE UID=H019, NAME=EVALUATE MEOH INJECTION RATES
EVALUATE STREAM=D002, POINTS=30, IPRES=0.14, *
MAXPRES=150, TESTIMATE=-5, INHIB(MEOH)=20, *
30
EVALUATE STREAM=J004, POINTS=30, IPRES=0.14, *
MAXPRES=150, TESTIMATE=-5, INHIB(MEOH)=20, *
30
EVALUATE STREAM=S003, POINTS=30, IPRES=0.5, *
MAXPRES=150, TESTIMATE=-3, INHIB(MEOH)=20, *
30
$
$ End of keyword file...
$
END

```

## Case Execution

In this simulation, there are a total of four Nodes as indicated below

1. Two sources - S001 & S003 J
2. Junction - J004
3. Sink - D002

Therefore, for this network, Hydrate analysis can only be conducted at four points. The user will need to break up the links and add more junctions if it is required to analyze hydrates at other points in the network.

For this simulation, the user decides to select S003, J004 & D002. The Hydrates unit in PIPEPHASE also allows the user to simulate the effect of adding Hydrate inhibitors such as Methanol, Salt, EG, DEG & TEG.

## Results

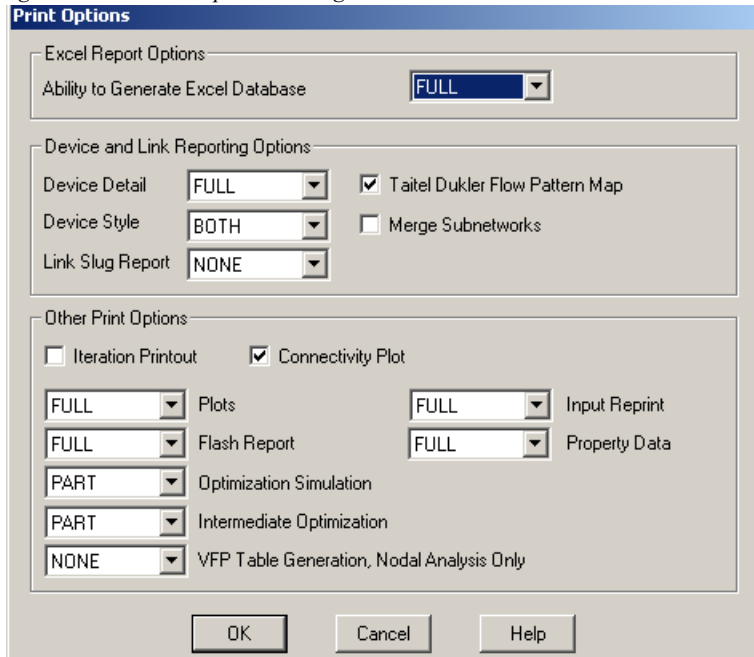
To view the Hydrate analysis in Microsoft Excel, the following procedure is to be followed.

1. Select **File/Run..** or click  to display *Run Simulation and the View Results dialog box*. Click **Run** to solve the network.

**Note:** The generation of Excel output reports does take some time and therefore, users should ensure that their simulation has been solved and converged before generating complex output reports.

2. Select **Print Options** under **General** menu to bring up the *Print Options dialog box* (see Figure 1-103). Ensure that the Ability to Generate Excel Database option is set to Full. The content of the Excel report is controlled from this dialog box. For example, if you want to have Flow Pattern Maps generated for each of the links in the simulation, ensure that the option is highlighted in this dialog box.

Figure 1-103: Print Options Dialog Box




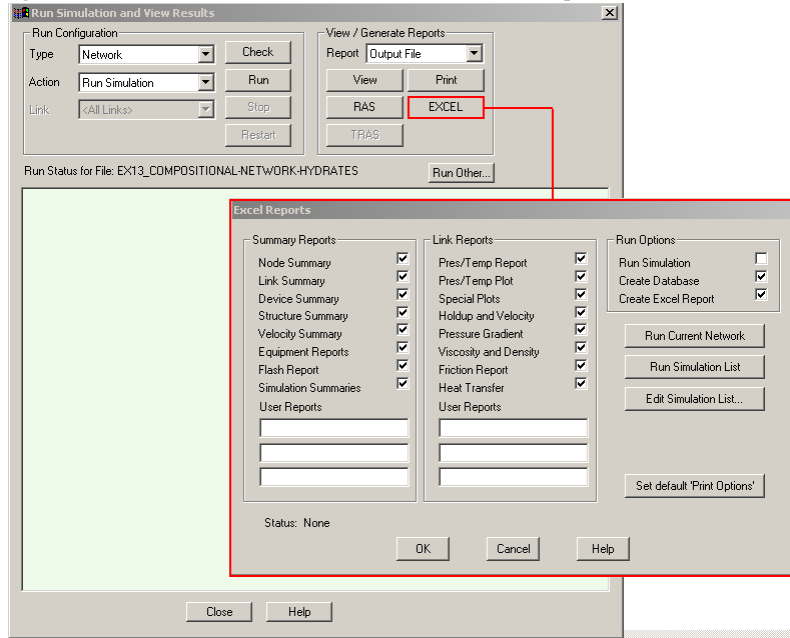
3. Select **File/Run..** or click  to bring up the *Run Simulation and View Results dialog box*.
4. Click **Excel** present in the top right-hand corner of this dialog box. This displays the *Excel Reports dialog box*.
5. The user can select the reports that are to be displayed in Excel. By default, everything is selected. The user should judiciously select the reports to be displayed as large simulation models contain numerous nodes and links. The Links Reports in particular can take several minutes to generate.
6. In the *Excel Reports dialog box*, the user also needs to select **Run Options** located at the top right-hand corner of the dialog box (see Figure 1-104).
  - **Run Simulation** - Simply runs and solves the simulation.
  - **Create Database** - Creates a Microsoft Access database with all the data to be displayed in the Excel Reports. The user must select this option to generate an Excel Report.
  - **Create Excel Report** - Creates a detailed Excel Report.

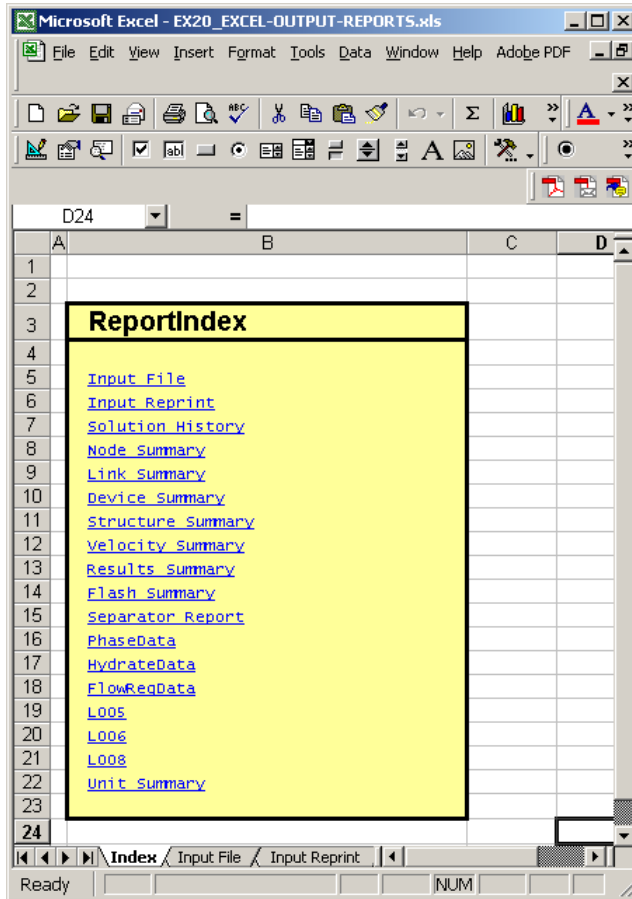


Figure 1-104: Run Simulation and View Results - Excel Reports



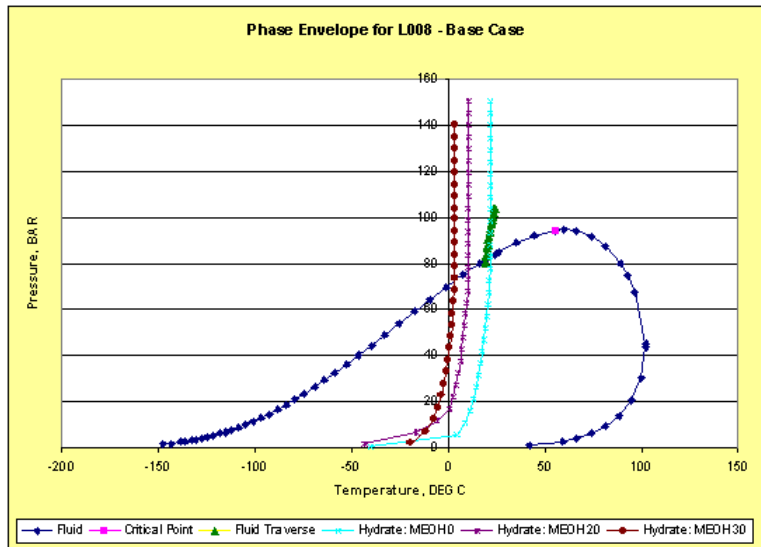
7. After selecting the options in the *Excel Reports dialog box*, the user has to click **Run Current Network**. In the above case (see Figure 1-104), it skips running and converging the network model (it assumes that the user has previously converged the simulation), creates the Access database, and subsequently creates the Excel Report.
8. The Excel Report makes extensive use of hyperlinks allowing the user to easily navigate and find the required information (see Figure 1-105).

Figure 1-105: Excel Report



- To review the Hydrate Analysis at Nodes S003, J004 & D002, click L008 to review a detailed report of the link terminating at the network sink, D002 (see Figure 1-106).

Figure 1-106: Phase Envelope Excel Chart for L008



10. The Phase Envelope generated by PIPEPHASE is for fluid composition present in the final link. The green line represents the traverse of the link - the pressure and temperature profile described by the fluid as it passes through the pipeline. Clearly, the fluid starts as a single phase gas and ends up in the two-phase region of the phase envelope at the terminus.
11. Three Hydrate curves are shown. The one to the right simulates the hydrate curve without the presence of any methanol. The middle curve simulates the hydrate curve with 20 wt% Methanol. The curve to the left shows the hydrate curve with 30 wt% methanol (see graph legends for details).

The above curve depicts the formation of hydrates at the network sink, which is thermodynamically possible in the absence of an inhibitor. Using PIPEPHASE, engineers can evaluate flow assurance strategies to minimize the risk of forming hydrates in wells and production networks.

## **ANNEXE 4**

# Chapter 6

## Technical Reference

---

TACITE is able to simulate transient and steady state two-phase flow in a pipeline. TACITE is based on a compositional tracking approach which allows for the time and space computation of the local mixture composition and associated physical properties. This compositional approach leads to a better estimation of the phase physical properties, and can be useful to predict the hydrates formation conditions.

### Modules Organization

The resolution algorithm involves three main modules:

- The thermodynamic module
- The hydrodynamic module
- The numerical scheme module

### Transport Equations

The mass conservation equation for the  $i$ th component is written as follows:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k=1}^P \rho_k R_k X_k^i \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \sum_{k=1}^P \rho_k R_k X_k^i V_k^i \right) = 0$$

The mass transfer between phases is taken into account through the assumption of thermodynamic equilibrium.

The momentum transport equation is written for the mixture:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k=1}^P \rho_k R_k V_k \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \sum_{k=1}^P \rho_k R_k V_k^2 + P \right) = \tau_w - \rho g \sin \theta$$

The energy equation for the mixture is written as:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k=1}^P \rho_k R_k H_k - P \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \sum_{k=1}^P \rho_k R_k V_k H_k \right) = (Q_w - \rho U_M g \sin \theta)$$

where

$x_k^i$	=	mass fraction of component $i$ in phase $k$
$c^i$	=	total mass fraction of component $i$
$x_k$	=	total mass fraction of phase $k$
$P$	=	pressure, $Pa$
$T$	=	temperature, $K$
$R_k$	=	volumetric fraction of phase $k$
$V_k$	=	velocity of phase $k$ , $m/s$
$\rho_k$	=	density of phase $k$ , $kg/m^3$
$\tau_w$	=	wall shear stress, $Pa/m$
$\theta$	=	local slope, degrees
$g$	=	acceleration of gravity $m/s^2$
$H_k$	=	mass enthalpy, $J/kg$
$Q_w$	=	rate of heat transfer exchange, $Pa/s$
$U_M$	=	mixture velocity, $m/s$

$$U_M = \sum_{k=1}^P R_k V_k$$

$\rho$  = mixture density,  $kg/m^3$

$$\rho = \sum_{k=1}^P \rho_k R_k$$

$V_M$  = center of mass velocity, m/s

$$V_M = \frac{\sum_{k=1}^P \rho_k R_k V_k}{\rho}$$

and where the subscripts

$k$  = phase index: g = gas; l = liquid; w = water

$i$  = component indice (1, 2, ..., n)

## Relations

In the mixture composed of N components and P phases, the following relations are verified.

$$\sum_{k=1}^P R_k = 1 \text{ and } \sum_{i=1}^N x_k^i = 1 \forall k \in [1, P]$$

To close the system, two sets of physical closure laws are used: the first one is related to the thermodynamic model, the second one is related to the hydrodynamic model.

## Thermodynamic Model

The thermodynamic closure law computes the equilibrium state of the mixture, and determines the transport properties such as viscosity, surface tension and heat transfer properties such as conductivity, heat capacity and enthalpy per unit mass for each phase.

It is represented by the following equation:

$$\Gamma(P, T, c^{i=1, N-2}, x_{k=1, P}^{j=1, N-1}, \rho_k, \nu_k, \sigma_k, \lambda_k, c_{pk}, H) = 0$$

where

$\nu$  = kinematic viscosity of phase  $k$ ,  $m^2/s$

$\sigma$  = interfacial tension,  $N/m$

$c_{pk}$  = specific heat of phase  $k$ ,  $J/kg \cdot K$

$\lambda$  = thermal conductivity of phase  $k$ ,  $W/m \cdot K$

TACITE uses an integrated flash algorithm and thermodynamic model that is solved at each time and space increment, which is very accurate and robust especially near the vicinity of the phase envelope (this is not the case when using the table interpolation approach).

TACITE has one option for thermodynamic computation:

- Flash — single phase or three phases

This option has two equations of state which are available: Peng-Robinson or SRK.

At each time step and each pipeline cell of calculation the thermodynamic module is called to perform a flash calculation for the specific fluid present in this cell at this time. This allows:

- Variation of composition along the line
- Mass and heat transfer between phases
- Realistic modeling of fluid thermodynamic behavior

To reduce CPU time computation, specific flashes have been developed, integrated and optimized within TACITE. These are:

- A standard P,T flash is used when pressure, temperature and mass fractions are known. This flash computes the equilibrium phase mass fractions.
- A T, V flash is used when temperature and masses are known. This flash computes the pressure and the equilibrium.
- A U, V flash is used when mixture energy and masses are known. This flash computes the pressure, temperature and equilibrium phase mass fractions.

These algorithms have been designed to meet the following objectives:

- Accuracy of the computation
- Robustness near the phase envelope
- Computing speed

To solve the nonlinear hyperbolic system of conservation equations, the Jacobian of fluxes versus conservative variables has to be computed at each time step and at each space location. This



computation is very time consuming, especially when numerical derivatives are performed. For robustness and computation efficiency, analytical derivatives of the thermodynamic properties versus conservative variables are performed within the flash module.

As a result of the flash optimization in TACITE, the transient simulation of a two-phase multi-component mixture consumes no more time when using these specific flash algorithms, than through interpolation in tables.

To be able to use the thermodynamic module it is necessary to define the fluid composition with  $N$  lumped pseudo-components. A lumping technique was set up to optimize the fluid representation with two lumped pseudocomponents. The lumped component characterization is optimized to reproduce as well as possible, over a given (pressure, temperature) window, the fluid properties of the original mixture.

The goal of the lumping module is to create a PVT file which provides data set for each pseudocomponent. This result file is used to run TACITE.

## **Lumping Procedure**

In this version of TACITE, a specific module running as a preprocessor of TACITE does the lumping of the initial composition into the lumped components that will be fed into the TACITE flash algorithm. The lumping technique is briefly described in the next section.

### **Lumping method**

The method used for lumping was developed by C. Leibovici<sup>2a,b</sup>. The idea of the lumping technique is to optimize the characterization of the lumped components in a pressure, temperature domain, consistent with the pressure and temperature profiles estimated for a given pipeline simulation.

The user has the possibility to use the automatic procedure or to impose the wished number of pseudocomponents.

The successive steps of the automatic procedure are:

9. Verification of pressure temperature windows: only two phase points are kept; for single phase points, they are moved inside the phase envelope if possible.

10. If the resulting number of two phase points is sufficient, lumping procedure is activated in the following ways:
  - Determination of the best clustering obtained for a given number of pseudocomponents between 2 and 7 using an objective function based on a and b equation of state phase parameters.
  - Determination of the minimum number of pseudo-components determined in the previous step respecting minimum error values on the less present phase mass fraction and the most present phase density.
11. If the number of two phase points is not sufficient, the procedure determined seven pseudocomponents using the dynamic clustering method.

The successive steps of the non-automatic procedure are:

1. Verification of pressure temperature windows: only two phase points are kept. For single phase points, they are moved inside phase envelope if possible.
2. If the resulting number of two phase points is sufficient, lumping procedure is activated: the best clustering obtained for the given number of pseudocomponents is determined using an objective function based on a and b equation of state phase parameters.
3. If the number of two phase points is not sufficient, the procedure determined the given number of pseudo-components using the dynamic clustering method.

## ***Hydrodynamic Model***

The hydrodynamic closure law computes the flow regime, the slip velocity between the phases and the friction terms. It is represented by the following equation:

$$\Phi(V_M, x_k, dV_{jk}, T) = 0$$

A mechanistic slip model has been developed and widely validated against experimental data. TACITE considers eight types of flow regimes: single-phase liquid, dispersed, slug, annular dispersed, stratified smooth, stratified wavy, annular, and single-phase gas flow. TACITE also models flow regime characterization for all pipe slopes.

The transition between the regimes are modeled and an important effort has been made to ensure continuity of the slip solution when flow regime transitions occur. The hydrodynamic slip model<sup>3</sup> has been validated on several data banks. Its originality lies in the choice of a limited set of closure laws continuous with respect to slope and fluid properties. As a consequence, TACITE produces good pressure drop/pressure profile estimations and liquid holdup and liquid slug volume predictions.

The closure laws together with the flow regime transitions have been chosen in order to make the overall transport model hyperbolic.

## ***Numerical Scheme***

In TACITE the numerical scheme<sup>4</sup> ensures a good front tracking with an optimized CPU simulation time. The TACITE numerical scheme is:

- Based on a finite volume discretization in space to be conservative.
- Explicit in time on void fraction waves to ensure good front tracking.
- Implicit in time on pressure waves to reduce the time computation.

The scheme is conservative, so it provides excellent mass and energy balance along the pipeline cells and along the iteration loops. It is an approximate Riemann solver algorithm similar to the well-known Roe<sup>5</sup> scheme, and its' modifications have been based on the ideas described by Gallouët<sup>6</sup>. It is accurate to second order in space and time, implicit in time for the pressure waves and explicit for the description of void waves. This insures a good representation of steep void fronts with a reduced computing time.

The emphasis of the numerical scheme implemented in TACITE is to obtain a fast and robust front tracking algorithm, in order to be able to detect large liquid slugs transported in the pipeline system and to predict correctly the amplitude of these slugs.

A mixed implicit/explicit scheme is used to optimize the computing speed and front tracking capability. This is particularly important in the case of a terrain or severe slugging when void fraction waves travel in both directions.

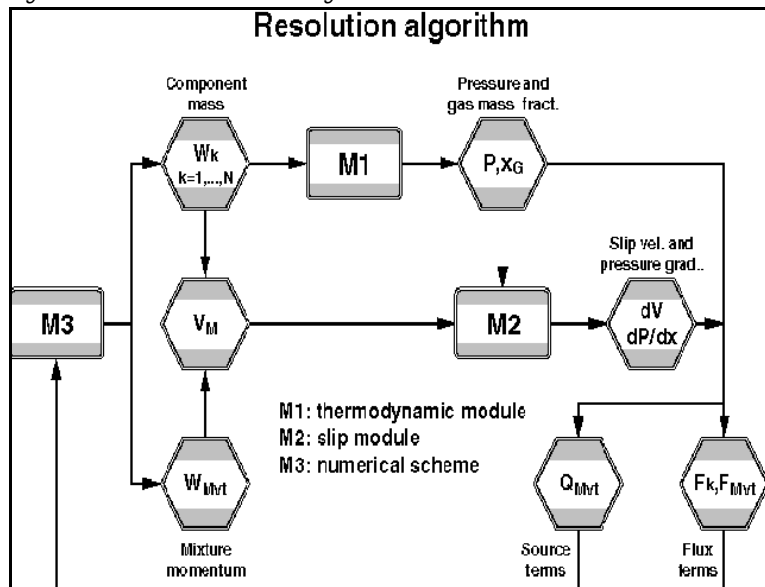
## Resolution Algorithm

The conservation equations are written in conservative form with  $W$  representing the conservative variables,  $F$  representing the flux, and  $S$  the source terms.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S$$

The resolution algorithm which encompasses all three modules is shown in Figure 7-1.

Figure 0-1: TACITE Resolution Algorithm



The time advancing scheme gives the mass per unit volume of each component and the total energy of the mixture, from which the pressure, the volumetric fraction of each phase and the temperature can be calculated by an internal flash algorithm.

The time-advancing scheme also gives the total mass flowrate, from which the phase velocities and the frictional pressure gradient are computed using the hydrodynamic module. By knowing the phase velocities, the pressure, the temperature and the frictional pressure drop, the fluxes for the next time step as well as the source terms included in the momentum and energy transport equations can be determined. Thus the conservative variables can be computed for the next time step.

## ***List of Available Equipments***

### **Equipment modules**

- Pipe inlet.
  - Source with given component mass flow-rates
  - Reservoir productivity index
- Pipe outlet.
  - Sink with given pressure
- Separator with controlled gas pressure and liquid level (two phase separator).
- Valve which can be located anywhere on the pipe except at the inlet.
- Lateral injector which can be located anywhere on the pipe except at the inlet and the outlet:
  - Injector with given fluid mass flow-rate
  - Injector with compressible option using an injection volume to regulate the fluid mass flow-rate
- Relief valve which can be located anywhere on the pipe except at the inlet and the outlet. It opens up when pressure in pipe exceeds the relief valve set point pressure.
- Pump<sup>7</sup> with a two phase flow model.
- Pig<sup>8</sup> which is moving all along the pipe from a given pig launcher to a given pig trap.
- PID controller<sup>9</sup> which can operate on the main variables of the system.
- PI Model (IPR) which models the pressure drop in a reservoir.

### **References**

- 1 Henroit, V. Pauchon, C., Duchet-Suchaux, P., Leibovici, C.F., "TACITE: Contribution of Fluid Composition Tracking on Transient Multiphase Flow". Proceedings of the Offshore Technology Conference, held in Houston Texas, May 1997.

- 2-a Leibovici, C.F., 1993, "A consistent procedure for the estimation of properties associated to lumped systems". Fluid Phase Equilibria, Vol. 87, 1993, p 189-197.
- 2-b Leibovici, C.F., Govel, P.L., Piacentino, T., 1993, "A consistent procedure for the estimation of pseudo-component properties". SPE Paper 26611 presented at the 68th annual technical conference and exhibition of the SPE held in Houston, Texas, October 1993.
- 3 Pauchon, C., Dhulesia, H., Lopez, D., Fabre, J., 1993: "TACITE: A comprehensive mechanistic model for two-phase flow". Proceedings of 6th International Conference on Multiphase Production, Cannes, France.
- 4 Faille, I., Heintze, E., "A Rough Finite Volume Scheme for Modeling Two-Phase Flow in a Pipeline". Computers and Fluids 28 (1999) 213-24.
- 5 Roe, P.L., 1981, "Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes". J. Comput. Phys., 43, pp 357-372.
- 6 Gallouët T., 1996: "Rough schemes for complex hyperbolic systems". Proceedings of the First International Symposium on Finite Volume for Complex Applications, Rouen (France), July 1996.
- 7 De Salis, J., Heintze, E., Charron, Y., 1999: "Dynamic simulation of multiphase pumps", Proceedings of 9th International Conference on Multiphase Production, Cannes, France.
- 8 Coadou, L., Heintze, E., Henroit, V., Pauchon, C., Ferre, D., Duchet-Suchaux, P., Gummuluri, K., 1999: "Pigging operation: measurement and simulation", Proceedings of 9th International Conference on Multiphase Production, Cannes, France.
- 9 Henroit, V., Courbot, A., Heintze, E., Moyeux, L., 1999: "Simulation of process to control severe slugging: application to the Dunbar pipeline". SPE Paper 56461 presented at the annual technical conference and exhibition of the SPE held in Houston, Texas, October 1999.