

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

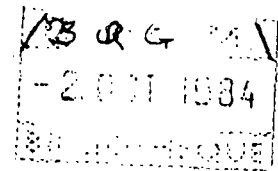
BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B. P. 6009 - 45018 Orléans Cedex — Tél. (38) 63.80.01

# **MODÉLISATION DU COMPORTEMENT HYDRAULIQUE ET THERMIQUE DES RÉSEAUX MAILLÉS**

## **APPLICATION AU RÉSEAU D'EAU THERMALE DE LA VILLE DE DAX**



SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL AQUITAINE

Avenue Docteur-Albert-Schweitzer, 33600 PESSAC — Tél. (56) 80.69.00

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE  
BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

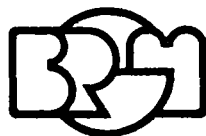
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

MODELISATION DU COMPORTEMENT  
-----  
HYDRAULIQUE ET THERMIQUE  
-----  
DES RESEAUX MAILLES  
-----

Ph.DAUGUET

JC.MARTIN

84 AGI 164 AGI Pessac le 29 juin 1984



SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL AQUITAINE

Avenue Docteur Albert Schweitzer - 33600 PESSAC - Tél.: (56) 80.69.00

- S O M M A I R E -

1 - INTRODUCTION .....	4
-----	
2 - DESCRIPTION D'UN RESEAU, GENERALITES .....	5
-----	
3 - ETUDE HYDRAULIQUE	
-----	
3.1 - MODELISATION DES PERTES DE CHARGES	
a) Pertes de charges dans une conduite simple .....	7
b) Calcul de la résistance à l'écoulement R .....	8
c) Récapitulatif.....	10
3.2 - MODE DE CALCUL DE LA DISTRIBUTION DES DEBITS	
a) Etablissement du systeme d'équations.....	16
b) Exemple .....	19
c) Résolution du systeme non linéaire .....	21
d) Amélioration de la convergence .....	23
3.3 - METHODE DE CALCUL DE LA PIEZOMETRIE	
a) Unités et terminologie employées .....	24
b) Calcul des cotes piézométriques aux noeuds .....	25
c) Calcul des pressions effectives .....	26
3.4 - CAS DES CONDUITES SINGULIERES	
a) Débit "en route" .....	28
b) Vannes et surpresseurs .....	30
3.5 - VALIDITE DES RESULTATS .....	32
3.6 - Extension possible aux réseaux de vapeur .....	32

#### 4 - ETUDE THERMIQUE

##### 4.1 - MODELISATION DES DEPERDITIONS THERMIQUES

a) Déperdition dans une conduite enterrée .....	33
b) Evolution de la température .....	36
c) Récapitulatif .....	38

##### 4.2 - METHODE DE CALCUL DE LA DISTRIBUTION DES TEMPERATURES

a) Exemple .....	39
b) Généralisation .....	40
c) Validité des résultats .....	42

#### 5 - PROGRAMMATION

##### 5.1 - GENERALITES .....

a) Utilisation des fichiers disques .....	44
b) Manipulation des différents fichiers .....	47
c) Structure du logiciel .....	48
d) Synoptique .....	49
e) Description des variables communes .....	50

##### 5.2 - SAISIE ET STOCKAGE DES DONNEES

Programme "SAISIE" .....	51
Sous programme "RECDAT" .....	54
Fichier "DONNEES-D" .....	55

##### 5.3 - MODIFICATION DES DONNEES

Programme "MODIF" .....	56
-------------------------	----

##### 5.4 - ETABLISSEMENT DE LA MATRICE HYDRAULIQUE

Programme "MATRIX" .....	57
--------------------------	----

##### 5.5 - CALCUL DE LA DISTRIBUTION DES DEBITS

Programme "DEBIX" .....	59
-------------------------	----

##### 5.6 - CALCUL DE LA DISTRIBUTION DES PRESSIONS

Programme "PIEZO" .....	61
-------------------------	----

5.7 - CALCUL DE LA DISTRIBUTION DES TEMPERATURES  
    Programme "THERMO" ..... 63

5.8 - INVERSION ET PRODUIT DE MATRICES  
    Sous programmes "INV" et "PROD" ..... 64

BIBLIOGRAPHIE ..... 65  
-----

CONCLUSIONS ..... 66  
-----

ANNEXE 1 : Logiciel LAUREL, Notice d'utilisation.  
=====

ANNEXE 2 : Exploitation sur le réseau géothermal de la ville de DAX.  
=====

-----

1 - INTRODUCTION

## 1 - INTRODUCTION

Dans le cadre d'un contrat d'étude du B.R.G.M. avec la ville de DAX (Landes) portant sur le réseau géothermal de cette ville, il est apparu l'importance de posséder un outil de calcul systématique, d'utilisation locale (sur micro-ordinateur) permettant la simulation des comportements hydraulique et thermique d'un tel réseau, ceci en vue d'optimiser le réseau existant et surtout son extension future.

Le problème de détermination des débits dans un réseau est d'une formulation théorique relativement aisée mais sa résolution se pose de manière très complexe dès l'instant où l'on a affaire à un réseau maillé, ce qui est généralement le cas dans la plupart des réseaux de distribution.

Ce problème, au moins pour sa partie hydraulique, a donné lieu à quelques méthodes de résolution dont la plus connue est sans doute celle mise au point par HARDY-CROSS en 1936 et qui est en fait une méthode de résolution de système non linéaire par relaxation. Celle-ci connaît d'ailleurs quelques applications sur ordinateur (notamment le logiciel HARDY développé par la CISI).

L'analyse des réseaux maillés s'inscrit en effet parfaitement dans le champ d'action des techniques informatiques.

Le logiciel LAUREL, issu de la présente étude, est basé sur la linéarisation d'un système par la méthode de Newton appliquée au calcul matriciel. La partie thermique présente l'originalité de faire également appel au calcul matriciel.

2 - DESCRIPTION D'UN RESEAU - GENERALITES



## 2 - DESCRIPTION D'UN RESEAU - GENERALITES

On appellera réseau un ensemble de conduites reliées entre elles et formant une série de noeuds et de mailles.

- Un noeud est, soit un point de jonction de plusieurs conduites, soit un point d'extrémité d'une ramification.

Les noeuds comprennent les points d'injection de débits et les points de soutirage (consommations ou rejets).

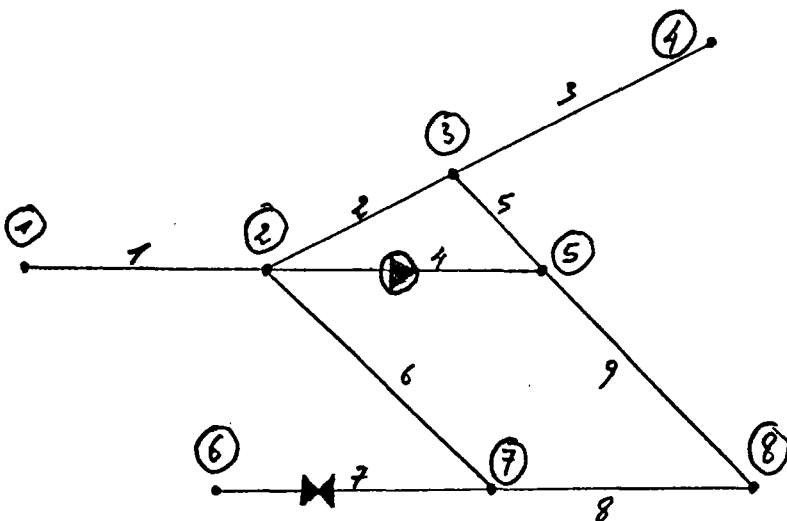
- On dira de manière simple qu'une conduite est une partie du réseau comprise entre deux noeuds.

- Un ensemble de conduites formant une boucle fermée constitue une maille du réseau (une maille ne comportera pas de vanne fermée).

Les réseaux ne comportant pas de mailles sont dits ramifiés.

Il faut noter l'existence possible de vannes et de surpresseurs.

Schema d'un reseau quelconque :



- 9 conduites
- 8 noeuds
- 3 Mailles possibles
- 1 Surpresseur
- 1 Vanne .

GENERALITES -

D'une manière générale, les hypothèses de travail sont les suivantes :

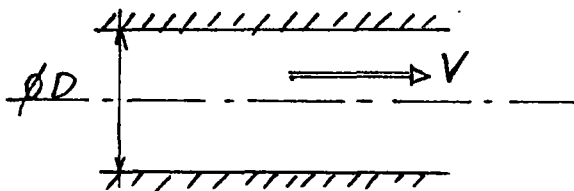
- . Régime hydraulique et régime thermique établis.
- . Sauf dans le cas des vannes, les pertes de charge singulières ne sont pas étudiées spécifiquement mais sont incluses dans le calcul des pertes de charge linéaires.
- . On néglige les déperditions thermiques singulières face aux déperditions linéaires.
- . Le calcul des débits est effectué sur la base des débits aux noeuds imposés (débits extérieurs).

3 - ETUDE HYDRAULIQUE

### 3 - ETUDE HYDRAULIQUE

#### 3.1 - MODELISATION DES PERTES DE CHARGE

##### a) Pertes de charge dans une conduite simple



Le régime est supposé turbulent (1), la perte de charge par unité de longueur est donnée par la formule universelle :

$$j = \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{unités SI})$$

- $\rho$  : masse volumique du fluide ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $v$  : vitesse de débit ( $\text{m}/\text{s}$ )  
 $D$  : diamètre ( $\text{m}$ )  
 $\lambda$  : est un coefficient adimensionnel fonction de la rugosité.  
 $\lambda$  : est calculé à partir de la formule de COLEBROOK :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

avec  $k$  : coefficient de rugosité ( $\text{m}$ )

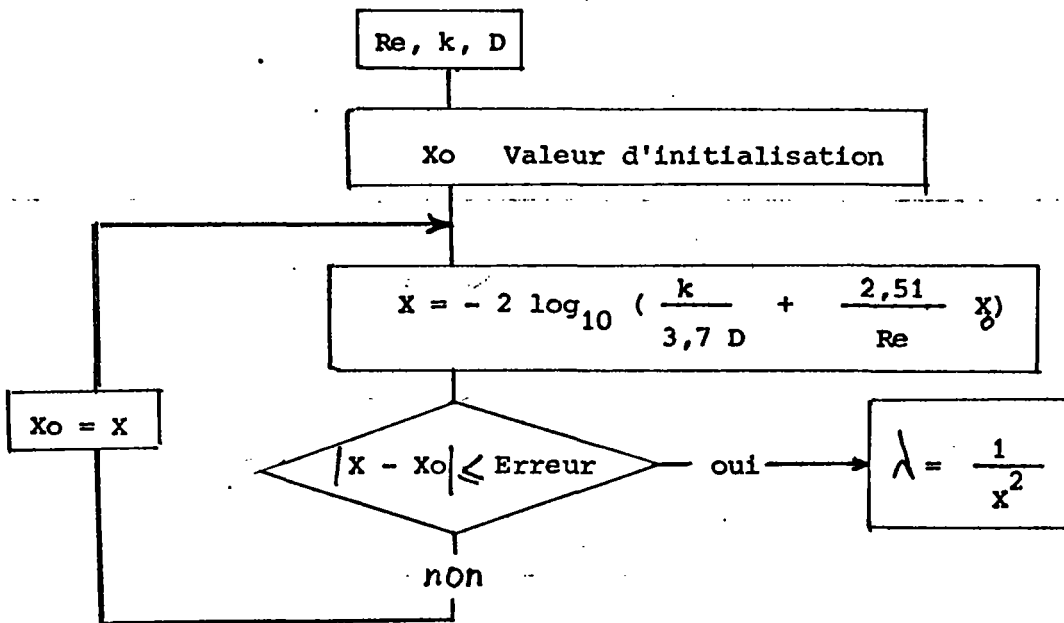
On rappelle que  $\text{Re} = \frac{VD}{\nu}$  (nombre de Reynolds)

Dans la présente étude, la valeur de  $\lambda$  est fournie par un sous-programme utilisant un calcul itératif dont l'algorithme est le suivant :

On pose  $X = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$

---

(1) En pratique, le régime laminaire se limite aux vitesses très faibles, petits diamètres et viscosité forte.



### b) Calcul de la résistance à l'écoulement R

On se donne les hypothèses suivantes :

- La perte de charge est exprimée en hauteur d'eau h (unité m.C.E., mètre de colonne d'eau) :

$$L = \rho_e g h$$

(L : longueur de la conduite)

- Le fluide véhiculé a une masse volumique voisine de l'eau (il s'agira d'eau chaude) :

$$\rho = \rho_e$$

- La perte de charge est calculée à partir du débit :

$$q_v = \frac{\pi D^2 v}{4}$$

D'où la formule :

$$h = \left( \frac{8}{\pi^2 g} \right) \frac{\lambda L}{D^5} q^2$$

$$h = 0,0826 \cdot \frac{\lambda L}{D^5} \cdot q^2$$

ou encore :

$$h = Rq^2 \quad (\text{m.C.E.})$$

avec :

$$R = 0,0826 \cdot \frac{\lambda L}{D^5}$$

(SI)

. Adaptation de la formule théorique

Pratiquement, afin de tenir compte des pertes de charge singulières telles que les coudes ou les raccords entre tronçons, on adapte la formule en diminuant l'exposant du débit (les débits considérés sont inférieurs à l'unité (m<sup>3</sup>/s)).

$$h = Rq^\alpha$$

avec  $1,7 < \alpha \leq 2$

(Voir figure 3.1.1 l'influence du choix de  $\alpha$  sur le calcul des pertes de charge)

Cette adaptation pratique constituera une adaptation globale pour l'ensemble des conduites du réseau.

On aura une adaptation spécifique à chaque conduite par la modulation du coefficient de rugosité  $k$  de la conduite considérée.

.  $k$  est fonction du matériau de la conduite et de son âge (dépôts sur les parois), sa valeur est difficilement appréciable.

(Voir figure 3.1.2 l'influence de  $k$  sur le calcul de la résistance)

REMARQUE

*Le calcul de la distribution des débits dans le réseau nécessite la connaissance des résistances.*

*Or, on sait que :*

$$R = f(D, k, Re)$$

*en toute rigueur,  $R$  est donc fonction de la vitesse ( $Re = \frac{VD}{\nu}$ ).*

*On montre qu'en fait, dans un domaine restreint des valeurs de  $V$ , la variation de  $Re$  n'a que très peu d'influence sur la valeur de la résistance. On se fixe donc préalablement une vitesse  $V_0$  qui correspond à la vitesse la plus probable dans le réseau.*

*Cette approximation est justifiée dans la figure 3.1.3.*

D'autre part, on a affaire à une eau de température qui n'est pas constante pour l'ensemble du réseau.

Or  $\nu$  (viscosité cinématique) dépend de la température.

On fait alors la même remarque que précédemment en se faisant une température  $T_0$  qui correspond à la température la plus probable dans le réseau. (Justification en figure 3.1.4.).

Finalement :

$$Re = \frac{V_0 D}{\nu_0}$$

c) Récapitulatif :

La démarche est la suivante :

Pour une conduite donnée :

. Saisie du diamètre  $D$

de la longueur  $L$

de la rugosité  $k$

. Calcul de  $Re$  avec  $Re = \frac{V_0}{\nu_0} D$

( $V_0$  et  $\nu_0$  vitesse et viscosité les plus probables dans le réseau)

. Calcul itératif de  $\lambda$  ( $Re$ ,  $D$ ,  $k$ )

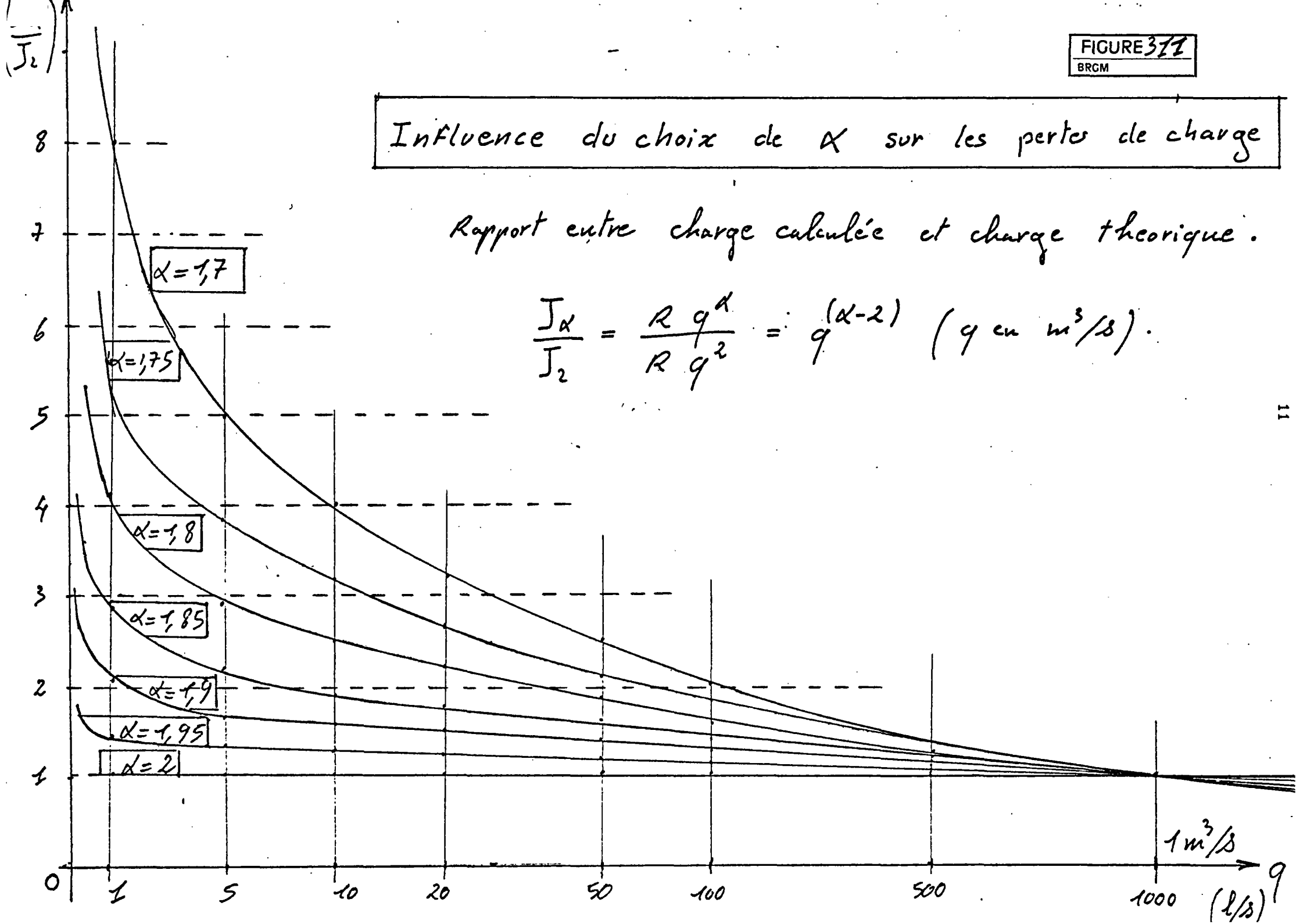
. Calcul de  $R$ ,  $R = 0,0826 \frac{\lambda L}{D^5}$

. Si nécessaire, on modifie la valeur de la rugosité  $k$  (valeur difficilement appréciable) pour se rapprocher des résultats expérimentaux (opération de calage).

Influence du choix de  $\alpha$  sur les pertes de charge

Rapport entre charge calculée et charge théorique.

$$\frac{J_\alpha}{J_2} = \frac{R q^\alpha}{R q^2} = q^{(\alpha-2)} \quad (q \text{ en m}^3/\text{s}).$$

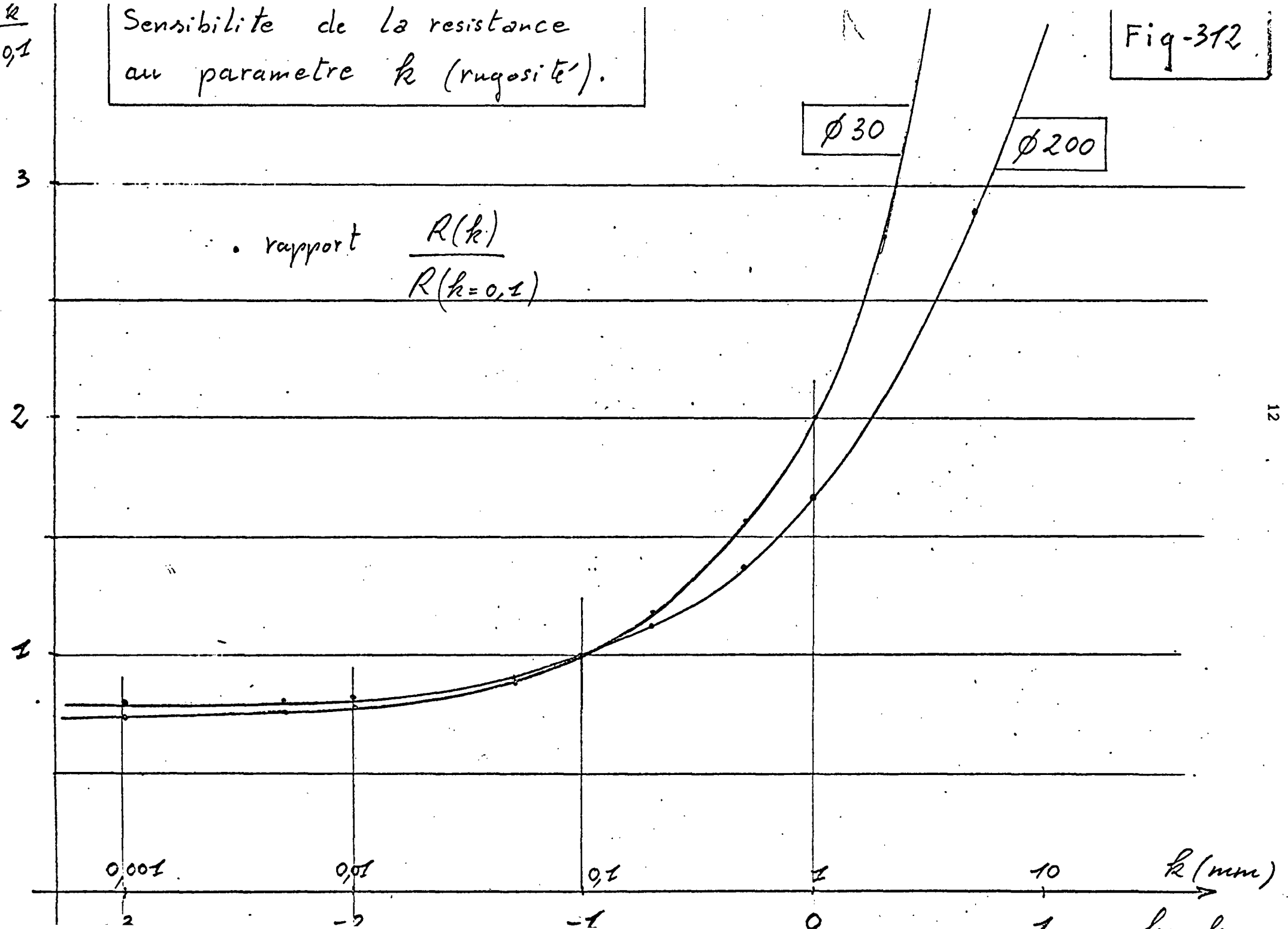




$\frac{R(k)}{R(0,1)}$

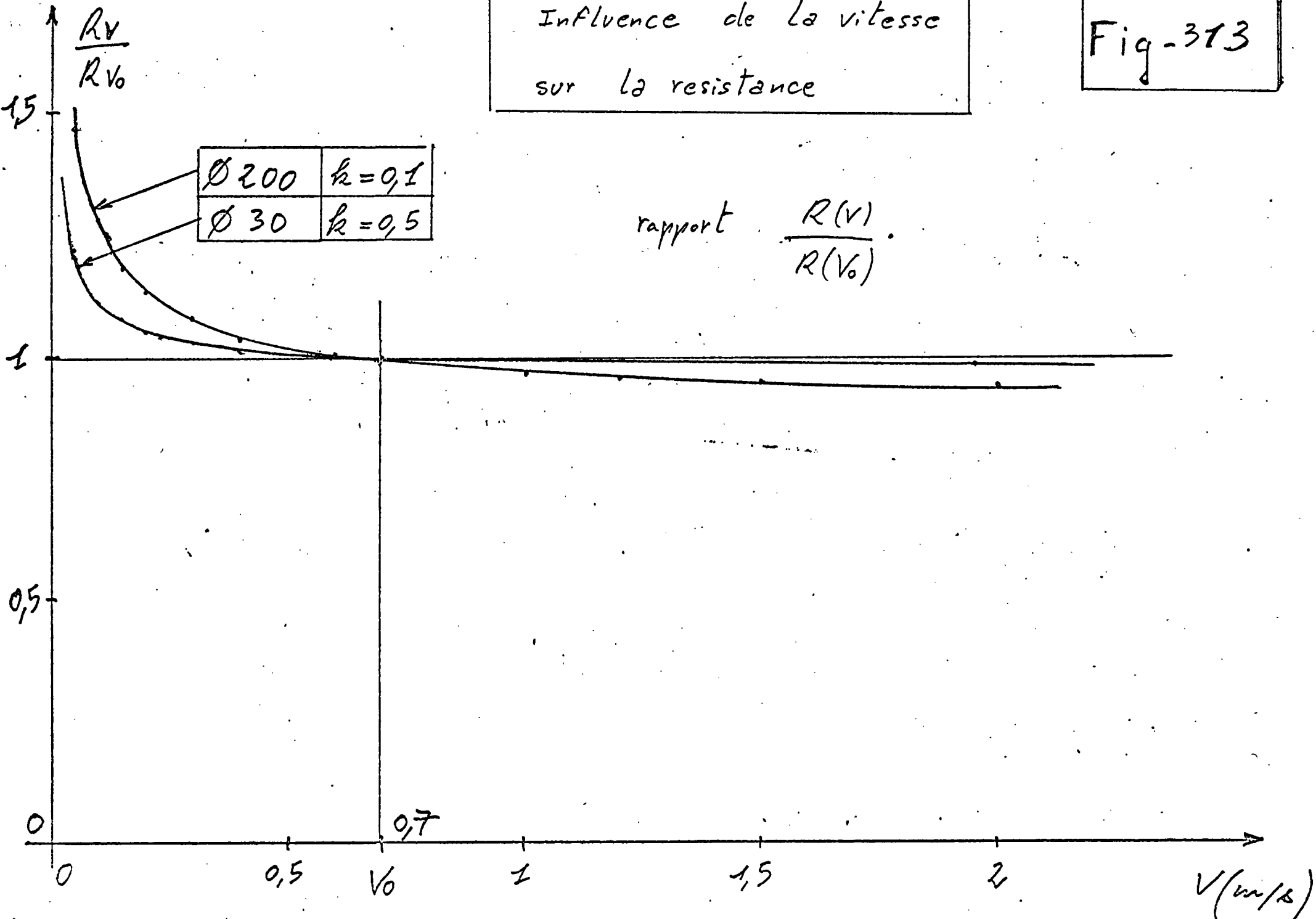
Sensibilité de la résistance  
au paramètre  $k$  (rugosité).

Fig-312



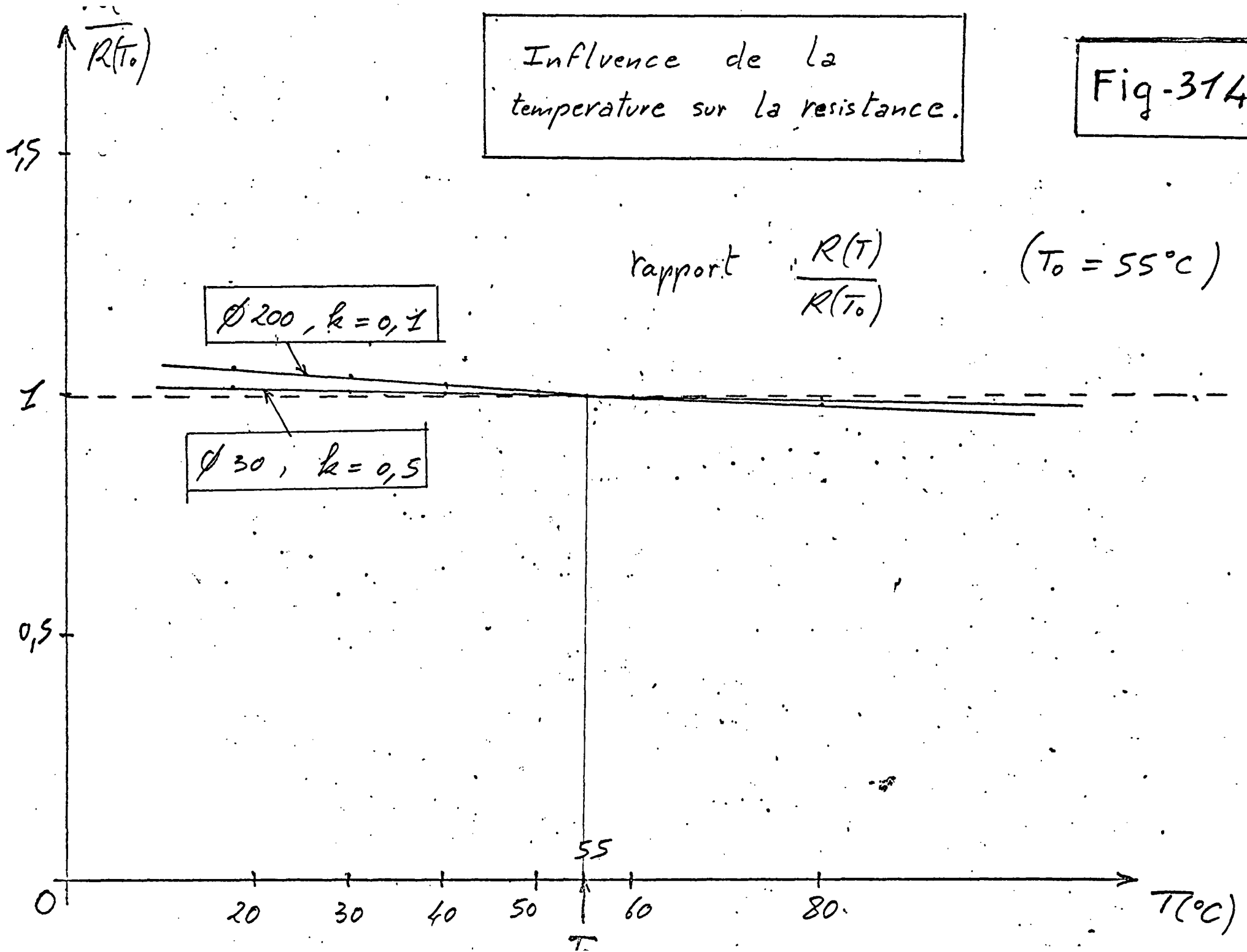
Influence de la vitesse sur la resistance

Fig-313



Influence de la  
temperature sur la resistance.

Fig-314



## Evolution de la viscosité cinématique avec la température.

- Propriétés physiques de l'eau douce à la pression atmosphérique ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

Températures $T$ °C	Poids spécifique $\bar{\omega}$ kg/m <sup>3</sup>	Masse spécifique $\rho$ kg m <sup>-4</sup> s <sup>-2</sup>	Viscosité dynamique $\mu$ kg m <sup>-2</sup> s	Viscosité cinématique $\nu$		Tension superficielle (eau avec l'air) $\sigma$ kg m <sup>-1</sup>	Tension de vapeur $h_v$ m d'eau à 4°C	Module d'élasticité $E$ kg/m <sup>3</sup> (valeurs approchées)
				m <sup>2</sup> /s	Centistokes			
0	999,9	101,93	$181 \times 10^{-6}$	$1,77 \times 10^{-6}$	1,77	0,00771	0,062	$1,99 \times 10^8$
4	1000,0	101,94	$160 \times 10^{-6}$	$1,57 \times 10^{-6}$	1,57	0,00763	0,083	—
10	999,7	101,91	$134 \times 10^{-6}$	$1,31 \times 10^{-6}$	1,31	0,00757	0,125	$2,09 \times 10^8$
20	998,2	101,76	$103 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-6}$	1,01	0,00743	0,239	$2,18 \times 10^8$
30	995,7	101,50	$84 \times 10^{-6}$	$0,83 \times 10^{-6}$	0,82	0,00726	0,433	$2,20 \times 10^8$
40	992,2	101,14	$67 \times 10^{-6}$	$0,66 \times 10^{-6}$	0,66	0,00710	0,753	$2,21 \times 10^8$
50	988,1	100,72	$56 \times 10^{-6}$	$0,55 \times 10^{-6}$	0,55	0,00690	1,258	$2,22 \times 10^8$
60	983,2	100,23	$47 \times 10^{-6}$	$0,46 \times 10^{-6}$	0,46	0,00676	2,033	$2,23 \times 10^8$
80	971,8	99,05	$37 \times 10^{-6}$	$0,37 \times 10^{-6}$	0,37	0,00638	4,831	—
100	958,4	97,70	$28 \times 10^{-6}$	$0,29 \times 10^{-6}$	0,29	0,00600	10,333	—

Dans les calculs hydrauliques ordinaires, on prend  $\bar{\omega} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho = 102 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-2}$ ;  $\nu = 1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Remarque : Indiquons quelques valeurs du poids spécifique de la glace : à 0°C -  $\bar{\omega} = 916,7 \text{ kg/m}^3$ ; à -10°C -  $\bar{\omega} = 918,6 \text{ kg/m}^3$ ; à -20°C -  $\bar{\omega} = 920,3 \text{ kg/m}^3$ .

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

(Source : A. LENCASTRE, "MANUEL D'HYDRAULIQUE GENERALE".)

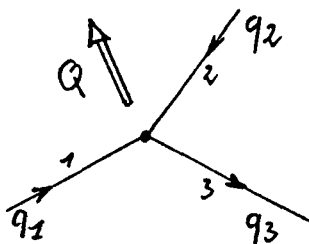
### 3.2 - MODE DE CALCUL DE LA DISTRIBUTION DES DEBITS

#### a) Etablissement du système d'équation

Les équations caractérisant la distribution des débits dans un réseau sont issues des deux principes suivants :

##### 1 - Principe de conservation des débits :

En un noeud quelconque, la somme des débits qui arrivent au noeud est égale à la somme des débits qui en partent.



De manière évidente :

$$q_2 + q_1 = q_3 + Q$$

$$\text{ou } q_1 + q_2 - q_3 = Q$$

Si NNOEUD est le nombre de noeuds du réseau, on aura un système de NNOEUD équations (dites "équations aux noeuds") de la forme :

$$\sum_i (+1) q(i) = Q(j)$$

(somme sur les conduites touchant le noeud j)

où  $q(i)$  représente le débit dans la conduite  $i$  (le sens étant choisi de manière arbitraire) et  $Q(j)$  le débit extérieur au réseau au noeud  $j$ .

La somme des NNOEUD équations de ce système fournit l'équation de conservation des débits extérieurs au réseau :

$$\sum_{j=1}^{NNOEUD} Q(j) = 0$$

Ces débits extérieurs (débits sources/rejets/consommation) étant supposés connus, on retire du système cette dernière équation.

On obtient alors un système de (NNOEUD - 1) équations indépendantes faisant intervenir les  $N$  inconnues  $q(i)$ .

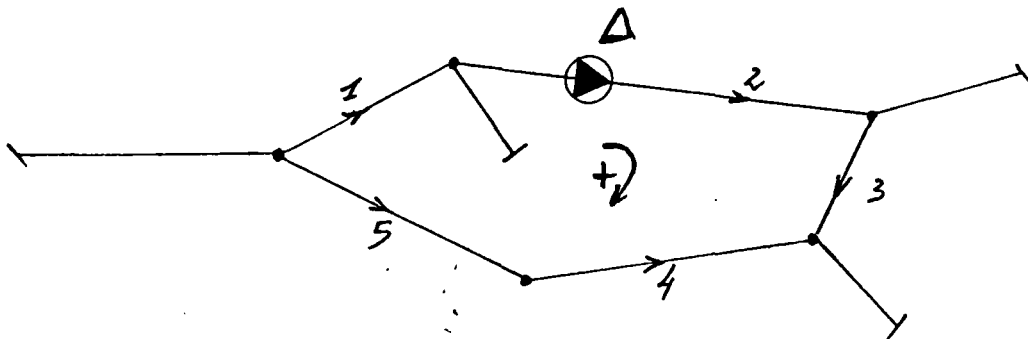
( $N$  : Nombre de conduites du réseau)

## 2 - Principe de continuité de la charge (ou "conservation de l'énergie")

La chute de pression entre deux points étant indépendante du chemin suivi, on écrit que sur le contour fermé d'une maille quelconque, la somme algébrique des pertes de charge est égale à 0 ou à la valeur de la surpression ( $\Delta$ ) s'il existe un surpresseur dans la maille.

On appelle  $J(i)$  la perte de charge sur la conduite  $i$ .  $J(i)$  est compté positivement si le sens du débit dans  $i$  correspond au sens de parcours de la maille, négativement sinon.

$\Delta$  est compté positivement, si le surpresseur est dans le sens de la maille, négativement sinon.



Dans ce cas:

$$J(1) + J(2) + J(3) - J(4) - J(5) = \Delta$$

. A chaque maille du réseau correspond donc une équation du type :

$$\sum_{i \in \text{maille}} (\pm 1) J(i) = \begin{cases} 0 \\ \Delta : \text{valeur du surpresseur} \end{cases} \quad \text{ou}$$

. La perte de charge est une fonction du débit du type :

$$J = Rq^\alpha$$

où  $R$  correspond à la résistance à l'écoulement de la conduite et où  $\alpha$  est un réel voisin de 2.

(voir chapitre "Pertes de charge").

On obtient un système de N équations à N inconnues en ajoutant aux (NOEUD - 1) équations de noeuds, NMAILLE équations de mailles.

avec :

$$NMAILLE = N - (NNOEUD - 1)$$

NMAILLE est le nombre de mailles indépendantes du réseau

(on choisira les mailles élémentaires).

On a donc le système suivant :

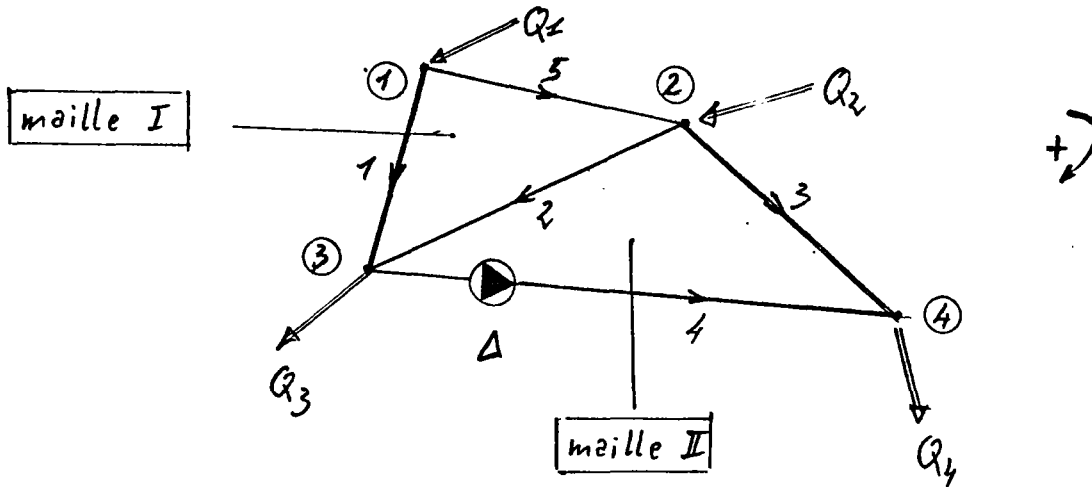
$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_1^{NMAILLE} (+1) R(i) q(i)^\alpha = \Delta(1) \\ \vdots \\ \sum_{NMAILLE}^{NMAILLE} (+1) R(i) q(i)^\alpha = \Delta(NMAILLE) \\ \hline \sum_1^{NNOEUD-1} (+1) q(i) = Q(1) \\ \vdots \\ \sum_{(NNOEUD-1)}^{NNOEUD-1} (+1) q(i) = Q(NNOEUD-1) \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{équations de mailles} \\ \\ \text{équations aux noeuds} \end{array}$$

S'il n'existe pas de surpresseur dans la maille j on écrit que  $\Delta(j) = 0$ .

N.B. Il s'agit d'un système non linéaire.

b) Exemple :

Etablissement du système d'équations de ce réseau :



$$\begin{aligned}
 N &= 5 \\
 \text{NNOEUD} &= 4 \\
 \text{NMAILL} &= N - (\text{NNOEUD} - 1) \\
 &= 2 \text{ mailles indépendantes}
 \end{aligned}$$

- équations de mailles :

$$\begin{aligned}
 \cdot R_5 q_5^\alpha + R_2 q_2^\alpha - R_1 q_1^\alpha &= 0 && \text{(maille I)} \\
 \cdot R_3 q_3^\alpha - R_4 q_4^\alpha - R_2 q_2^\alpha &= -\Delta && \text{(maille II)}
 \end{aligned}$$

- équations de noeuds :

$$\begin{aligned}
 \cdot q_1 + q_5 &= Q_1 && \text{Noeud 1} \\
 q_2 + q_3 - q_5 &= Q_2 && \text{Noeud 2} \\
 -q_1 - q_2 + q_4 &= -Q_3 && \text{Noeud 3}
 \end{aligned}$$

d'où le système non linéaire :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 -R_1 q_1^\alpha + R_2 q_2^\alpha + 0 + 0 + R_5 q_5^\alpha = 0 \\
 0 - R_2 q_2^\alpha + R_3 q_3^\alpha - R_4 q_4^\alpha + 0 = -\Delta \\
 q_1 + 0 + 0 + 0 + q_5 = Q_1 \\
 0 + q_2 + q_3 + 0 - q_5 = Q_2 \\
 -q_1 - q_2 + 0 + q_4 + 0 = -Q_3
 \end{array} \right.$$

D'autre part l'équation :  $Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$  doit être respectée.



On appellera matrice caractéristique du réseau la matrice du système.

$$M = \begin{pmatrix} -R_1 & R_2 & 0 & 0 & R_5 \\ 0 & -R_2 & R_3 & -R_4 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Le vecteur  $(0, -\Delta, Q_1, Q_2, -Q_3)$  constitue le vecteur des termes indépendants (vect.).

On notera qu'à ce stade, il est nécessaire de s'être fixé un sens arbitraire pour chaque conduite, le sens effectif sera donné par le signe du débit dans le résultat.

c) Résolution du système non-linéaire

La méthode utilisée pour résoudre ce système non linéaire est une méthode de calcul numérique itérative qui fait appel au procédé de linéarisation de la méthode de NEWTON :

soit à résoudre  $F(X) = 0$  où  $F$  est une fonction non linéaire.

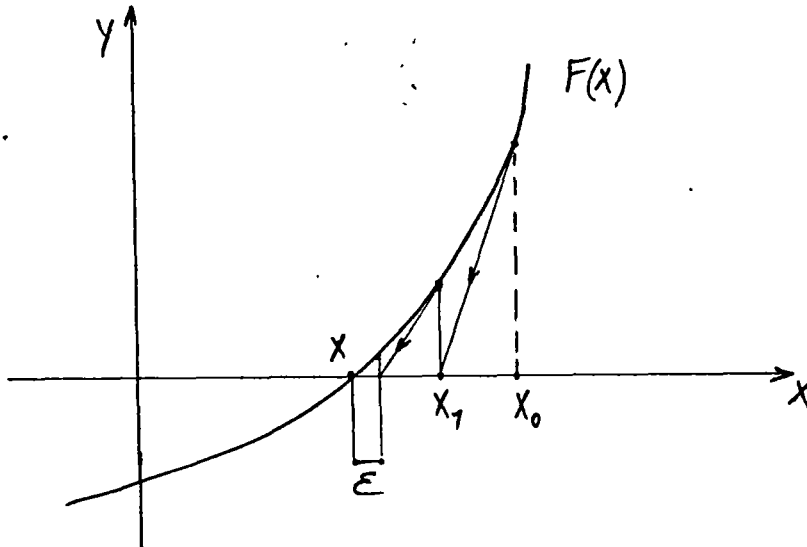
On se donne  $X_0$  suffisamment proche de la solution supposée (pour une fonction  $F$  donnée, la convergence du procédé itératif dépend de  $X_0$ ) et  $\varepsilon$  la précision du résultat.

On détermine  $X_1$  tel que :

$$F(X_1) \neq 0 = F(X_0) + (X_1 - X_0) F'(X_0) \quad (1)$$

(développement au 1er ordre)

On pose  $X_0 = X_1$  et on réitère le calcul jusqu'à ce que  $|X_1 - X_0| \leq \varepsilon$ .



Pour le système étudié, les équations de maille sont du type :

( $i \in (1, \dots, NMAILL)$ )

$$F_i(q) = \sum M_{ij} q_j^\alpha - \Delta_i$$

où les  $M_{ij}$  sont les composantes de la matrice caractéristique.

$$\text{On a : } F_i'(q) = \sum \alpha M_{ij} q_j^{\alpha-1}$$

La relation entre deux itérations  $q_0$  et  $q_1$  est alors donnée par la formule itérative :

$$\sum \text{Mij } q_{0j}^\alpha - \Delta_i + \sum (q_{1j} - q_{0j}) \alpha \text{Mij } q_{0j}^{(\alpha-1)} = 0 \quad (2)$$

Généralisation :  $(\alpha \text{Mij } q_i^{(\alpha-1)})$  sont les composantes du Jacobien J de la fonction F.

$$\text{On a } F(q_0) + (q_1 - q_0) J(q_0) = 0 \quad (1')$$

avec :

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

De (2) on tire la relation linéaire :

$$\sum \left( \text{Mij } q_{0j}^{(\alpha-1)} \right) q_{1j} = \sum \text{Mij } q_{0j}^\alpha \left( \frac{\alpha-1}{\alpha} \right) + \frac{\Delta_i}{\alpha}$$

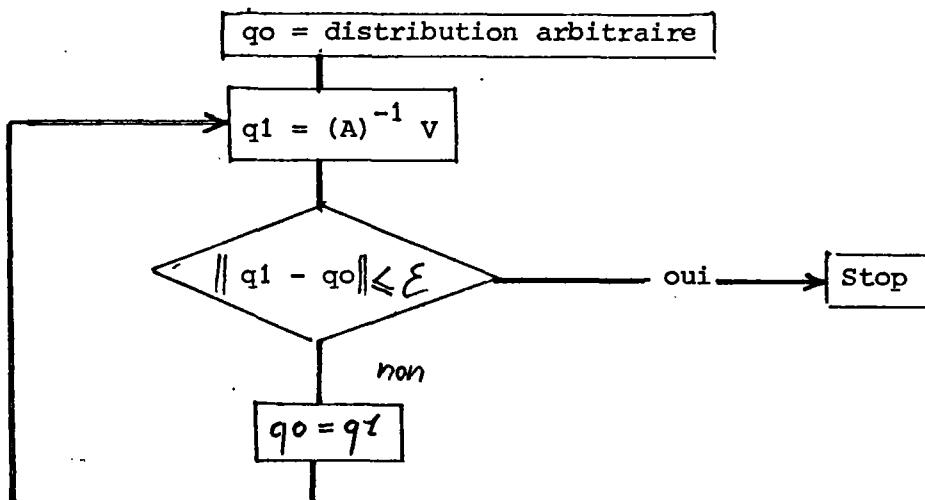
On est donc ramené à chaque itération à la résolution d'un système linéaire de la forme :

avec  $\boxed{[A] q = v} \quad (\alpha-1)$

$$\begin{cases} A_{ij} = \text{Mij } q_{0j} & i \in (1, \text{NMAILL}) \\ A_{ij} = \text{Mij} & i \in (\text{NMAILL} + 1, N) \end{cases}$$

et  $v_i = \sum \text{Mij } q_{0j}^\alpha \left( \frac{\alpha-1}{\alpha} \right) + \frac{\Delta_i}{\alpha}$

L'algorithme est le suivant :



d) Amélioration de la convergence

Il est nécessaire, pour débiter le procédé décrit précédemment, de se fixer une distribution arbitraire des débits (qui doit satisfaire les équations de continuité aux noeuds). Il est possible de lever cette contrainte et d'améliorer en même temps la convergence en faisant la remarque suivante :

Les exemples de calcul de réseau maillés effectués sur la base d'un régime laminaire, c'est-à-dire une loi de perte de charge linéaire ( $J = R \cdot q$ ) ont montré des résultats relativement proche des résultats en régime turbulent.

La distribution initiale  $q_0$  peut donc être calculé par la résolution du système linéaire :  $(M) q_0 = V$  traduisant ainsi un régime laminaire (au rapport près des résistances laminaire/turbulent).

### 3.3 - Méthode de calcul de la piézométrie

#### a) Unités et terminologie employées.

Que ce soit au niveau de la saisie des données, au niveau des calculs ou au niveau de l'édition des résultats, toutes les pressions caractéristiques du réseau sont exprimées en hauteur de colonne d'eau (mètre C.E.)

$$\text{avec } 10 \text{ m CE} = 1 \text{ kg/cm}^2 \neq 1 \text{ bar.}$$

(on ne tient pas compte ici, dans le domaine des pressions considéré, de la variation de masse volumique de l'eau avec la température).

On travaille alors sur les grandeurs suivantes :

- P : pression effective au point considéré (m.CE)  
(pression absolue = P + P.atmosphérique)  
Pour un point à la pression atmosphérique, on aura donc : P = 0
- Z : cote au sol (en m NGF)  
(N.G.F. : nivellement géographique de la France)  
correspond en fait à l'altitude du point considéré.
- H : cote piézométrique (m NGF)
- J<sub>AB</sub> : perte de charge sur la conduite AB (m CE)
- Δ : surpression éventuelle (m CE)

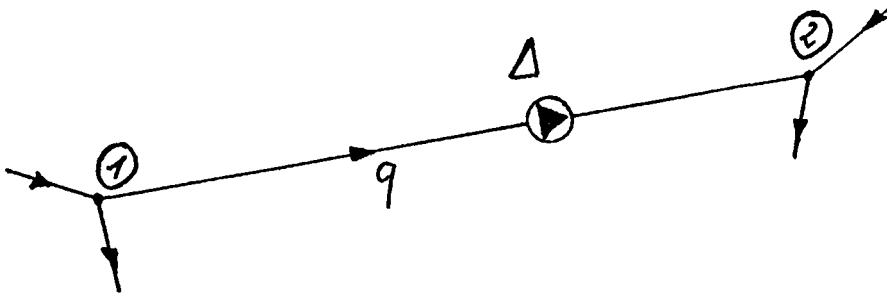
Avec les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} H = Z + P \\ J_{AB} = H_A - H_B + \Delta \end{array} \right.$$

Voir figure 331 le graphe caractéristique des pressions dans une conduite.

REMARQUE : Seule la cote piézométrique H est significative du sens de l'écoulement de l'eau dans un réseau ou dans un milieu quelconque (Analogie Electrique Potentiel/courant).

b) Calcul des cotes piézométriques aux noeuds



Le calcul des cotes piézométriques s'effectue à partir de la formule :

$$H_1 - H_2 = J - \Delta \quad (1)$$

où la perte de charge est donnée par :

$$J = Rq^\alpha$$

Ce calcul intervient donc après le calcul de la distribution des débits.

La méthode utilisée pour connaître la cote piézométrique en chaque noeud du réseau, consiste à venir appliquer la relation (1) sur toutes les conduites dont on connaît déjà la cote piézométrique d'un des deux noeuds extrémités. On boucle sur ce procédé jusqu'à la connaissance totale des cotes piézométriques.

Il faut donc noter, pour démarrer le processus, la donnée nécessaire d'un noeud à pression déterminée (pression de référence).

c) Calcul des pressions effectives

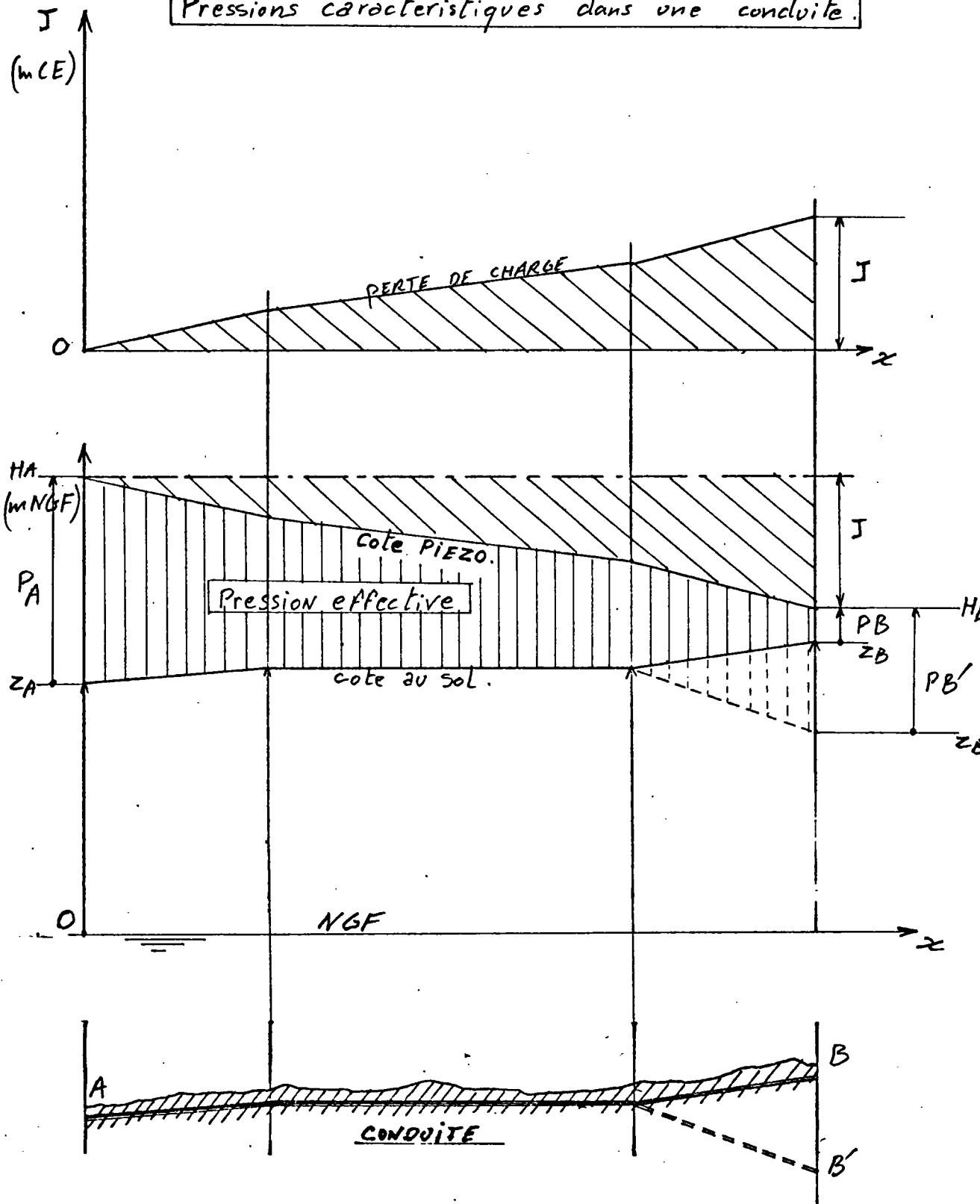
Les cotes piézométriques étant connues, les pressions effectives en chaque noeud s'obtiennent simplement par la relation :

$$P = H - Z$$

où Z est la cote au sol du point considéré.

Figure 331

Pressions caractéristiques dans une conduite.

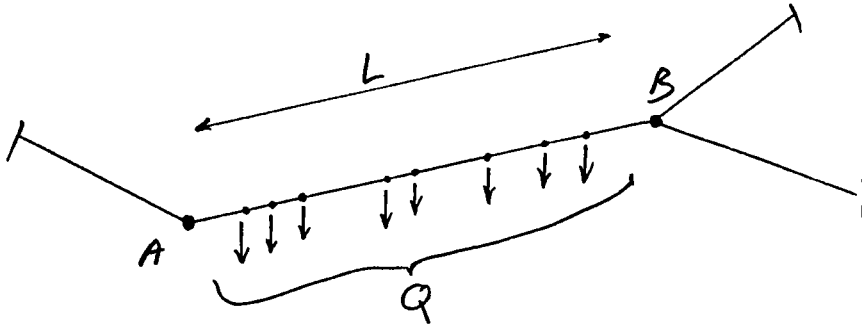




### 3.4 - CAS DES CONDUITES SINGULIERES

#### a) Débit de consommation réparti sur une conduite ("Débit en route")

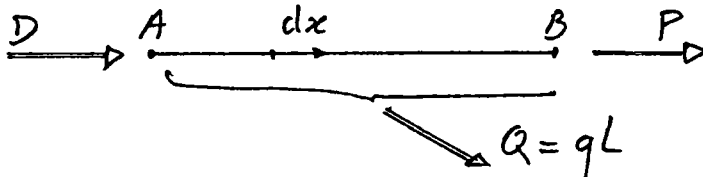
Dans un réseau de distribution, certaines conduites présentent de nombreux points de soutirage répartis plus ou moins uniformément et où les débits sont tous du même ordre de grandeur. Il est alors possible de se ramener au cas d'une conduite simple. (Tous ces points de soutirage devraient être logiquement considérés comme autant de noeuds reliés par des tronçons simples) :



Pour les conduites de ce type on introduit la notion de densité linéique de débit  $q$  ; si  $Q$  est le débit total distribué de A à B et  $L$  la longueur :

$$q = \frac{Q}{L}$$

. Calcul de la perte de charge dans ce cas :



D : débit entrant

P : débit sortant

On a la relation :  $D = P + Q$

$r$  : résistance linéique

On a :  $dH = -rdx \dots$  débit  $^2(x)$

$$= -rdx (D - qx)^2$$

$$= -rdx (D^2 - 2 qDx + q^2 x^2)$$

d'où :

$$HB - HA = -RD^2 + DQR - \frac{R}{3} Q^2$$

$$HA - HB = R \left( D^2 - DQ + \frac{Q^2}{3} \right)$$

avec  $D = P + Q$  :

$$HA - HB = R \left( P^2 + PQ + \frac{Q^2}{3} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{or } P^2 + PQ + \frac{Q^2}{3} &= \left( P^2 + PQ + \frac{Q^2}{4} \right) + \frac{Q^2}{12} \\ &= \left( P + \frac{Q}{2} \right)^2 + \frac{Q^2}{12} > \left( P + \frac{Q}{2} \right)^2 \end{aligned}$$

de même :

$$\begin{aligned} P^2 + PQ + \frac{Q^2}{3} &= \left( P + \frac{Q}{\sqrt{3}} \right)^2 - \frac{(2 - \sqrt{3})}{\sqrt{3}} PQ \\ &= \left( P + \frac{Q}{\sqrt{3}} \right)^2 - 0,1547 PQ < \left( P + \frac{Q}{\sqrt{3}} \right)^2 \end{aligned}$$

On a donc :

$$(P + 0,5 Q)^2 < \left( P^2 + PQ + \frac{Q^2}{3} \right)^2 < (P + 0,577 Q)^2$$

Il apparaît alors que, du point de vue des pertes de charge, on pourra considérer la conduite comme parcourue par un débit fictif  $Q_f$  tel que :

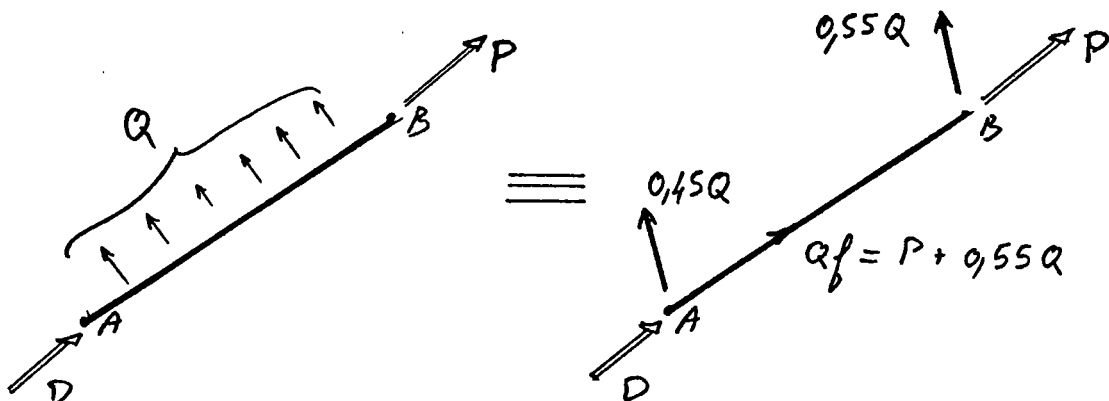
$$P + 0,5 Q < Q_f < P + 0,577 Q$$

On alors  $J = R Q_f^2$  (cas d'une conduite simple).

On prend généralement

$$Q_f = P + 0,55 Q$$

On aura compatibilité des débits aux noeuds en répartissant le débit "en route"  $Q$  en A et B avec 0,45  $Q$  pour A et 0,55  $Q$  pour B:



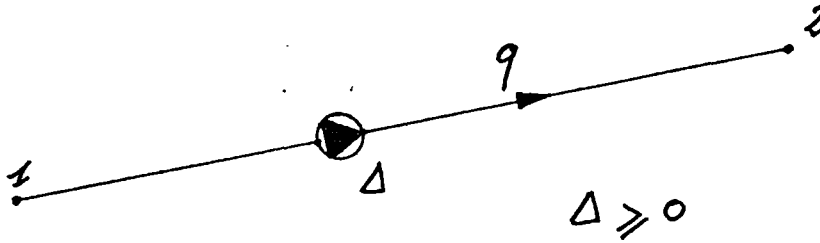
b) Cas des vannes et surpresseurs

- Surpresseurs

Le cas des surpresseurs est envisagé de manière rigoureuse puisque les surpressions éventuelles interviennent dans la méthode de calcul des débits et des pressions (voir § 3.2 a) et 3.3).

Un surpresseur est caractérisé par la valeur de sa surpression (valeur positive). Le sens du débit dans la conduite concernée doit être préalablement connu.

Après calcul des débits, on choisit le surpresseur dont la courbe caractéristique est compatible avec le point de fonctionnement considéré.



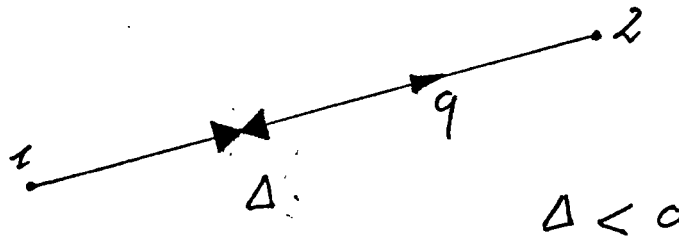
- Vannes

Dans une vanne, la chute de pression est de la forme :

$$\Delta = c \frac{1}{\sqrt{2g}} \frac{Q}{S}$$

où C est un coefficient lié au degré d'ouverture de la vanne (voir tableau ci-après).

Il est possible et commode de traiter les vannes comme des surpresseurs à valeur négative. Le calcul des débits permet alors de déterminer le degré d'ouverture correspondant à la valeur de la chute de pression définie préalablement.

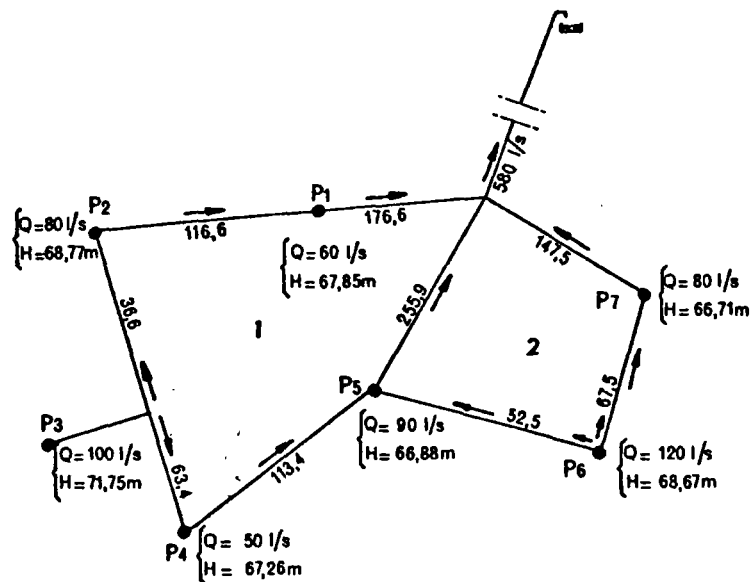


EVOLUTION DU COEFFICIENT C

degré d'ouverture %	100	87.5	75	62.5	50	37.5	25	12.5	0
C	0.12	0.15	0.26	0.81	2.06	5.52	17	98	0

### 3.5 - Validité des résultats

Un exemple de simulation complète de réseau est donné en annexe 1 (réseau "Exemple"). Voici à titre indicatif les résultats obtenus par la méthode de Hardy-Cross manuelle appliquée à ce même réseau (source : A. DUPONT "Hydraulique urbaine, exercices et projets").



Les résultats concordent donc parfaitement tant du point de vue des pressions que des débits.

### 3.6 - Extension possible aux réseaux de vapeur

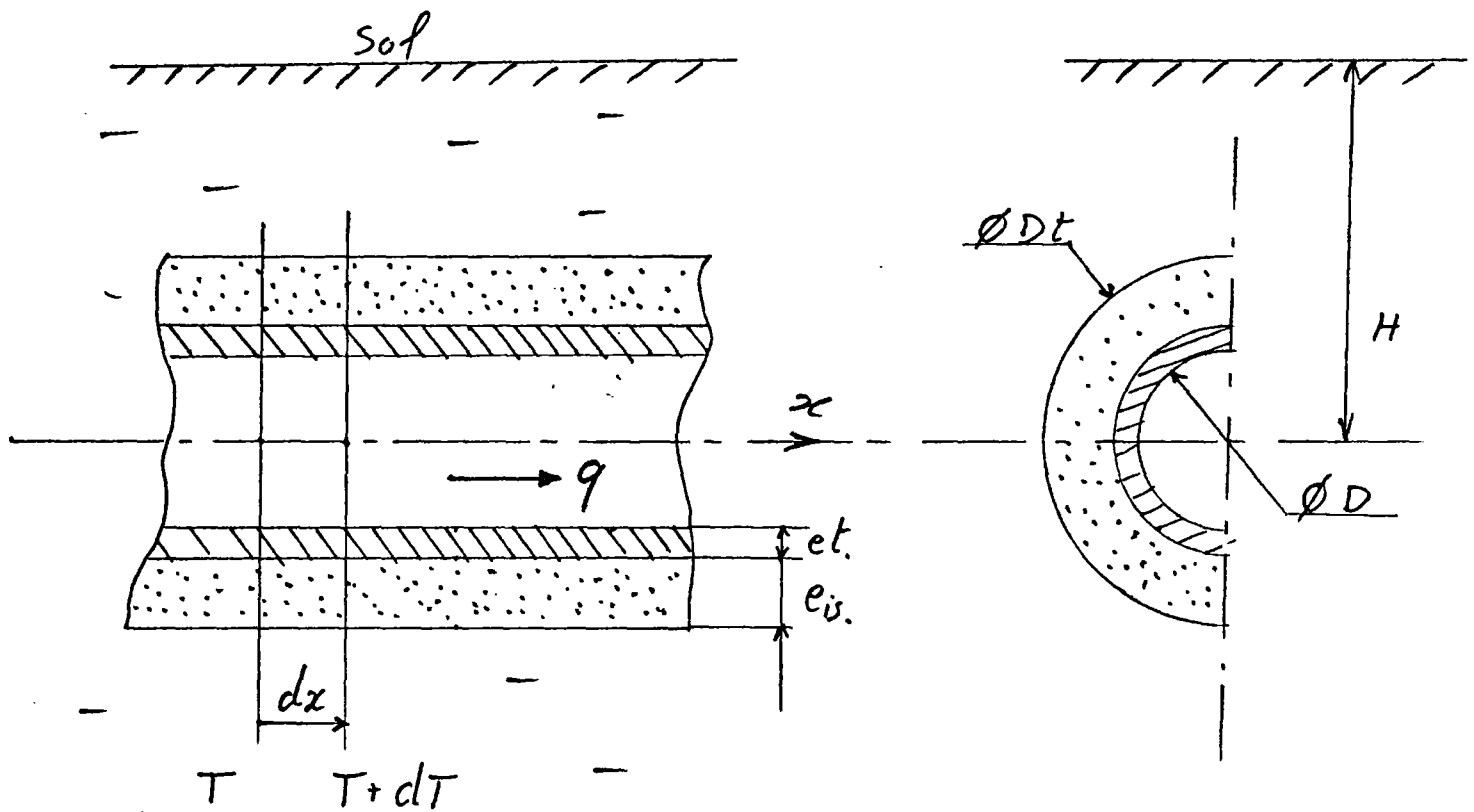
Cette étude peut s'étendre, par analogie, à des réseaux de vapeur (ou de gaz quelconque) moyennant une adaptation adéquate de la modélisation des pertes de charges et la prise en compte de la compressibilité (la conversion des débits est à appliquer aux débits massiques).

4 - ETUDE THERMIQUE

#### 4.1 - Modélisation des déperditions thermiques

##### a) Déperdition thermique dans une conduite enterrée

On suppose le régime thermique établi.



- $D$  : diamètre intérieur de la conduite
- $e_t$  : épaisseur du tube
- $e_{is}$  : épaisseur de l'isolant
- $q$  : débit volumique
- $z$  : profondeur d'enfouissage

On considère un segment de longueur  $dx$ , l'énergie calorifique perdue par le fluide est donnée par :

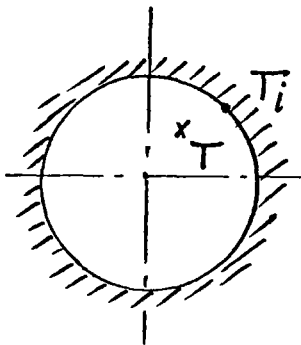
$$W = - \rho (qdt) C dT = \phi dt$$

d'où le flux de chaleur :

$$\boxed{\phi = - \rho C q dT \text{ (watt)}} \quad (1)$$

$\rho$  : masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $C$  : capacité massique ( $\text{W}/\text{kg}$ )

- Echange eau/paroi interne

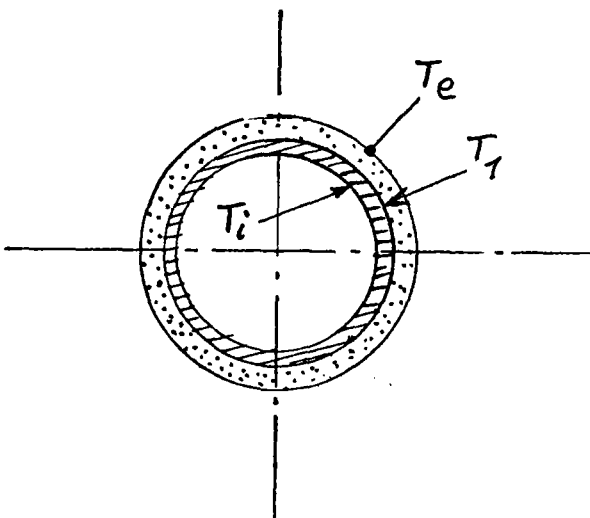


Le flux est donné par :

$$\phi = h_i (\pi D dx) (T - T_i) \quad (1)$$

où  $h_i$  est le coefficient de convection eau/tube ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

- Echange par conduction dans le tube et dans l'isolant



La loi de Fourier ( $\phi = \lambda S \text{ grad } T$ ) donne la relation :

- Pour le tube :

$$\phi = \frac{2\pi \lambda t}{\ln \left( \frac{D + 2et}{D} \right)} dx (T_i - T_1) \quad (2)$$

- pour l'isolant : ( $e_{is} \gg et$ )

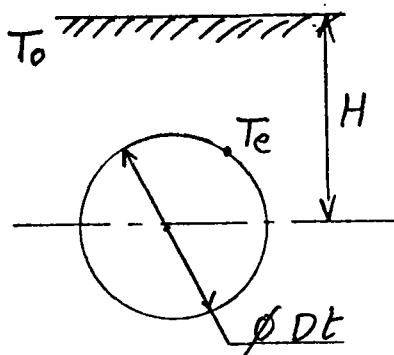
$$\phi = \frac{2\pi \lambda_{is}}{\ln \left( \frac{D + 2e_{is}}{D} \right)} dx (T_1 - T_e) \quad (3)$$

avec  $\lambda t$  : coefficient de conduction du tube

$\lambda_{is}$  : coefficient de conduction de l'isolant ( $\text{W}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$ )



- Echange paroi externe/sol :



On a la relation :

$$\phi = \frac{\lambda_{\text{sol}} dx}{f} (T_e - T_o) \quad (4)$$

où  $T_o$  est la température de surface du sol

$\lambda_{\text{sol}}$  : coefficient de conductivité moyenne du sol

$f$  est un coefficient fonction de la profondeur et du diamètre extérieur.

On a :

$$f = \frac{1}{2\pi} \text{Ln} \left( \frac{2H}{D_t} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D_t}\right)^2 - 1} \right)$$

(facteur de forme).

b) Evolution de la température

Des relations précédentes, on tire la loi de température :

$$\frac{(T - T_0) dx}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} = - \rho C q dT$$

avec :

$$R_1 = \frac{1}{\pi D h_i} \quad ; \quad R_2 = \frac{\text{Ln} \frac{D + 2 \text{ et}}{D}}{2\pi \lambda_t}$$

$$R_3 = \frac{\text{Ln} \frac{D + 2 \text{ eiso}}{D}}{2\pi \lambda_{\text{iso}}} \quad ; \quad R_4 = \frac{f}{\lambda_{\text{sol}}}$$

→ Dans la plupart des cas et dans le domaine des valeurs utilisées ici, les résistances thermiques de convection et de conduction dans le tube sont négligeables devant les résistances de conduction dans l'isolant et dans le sol.

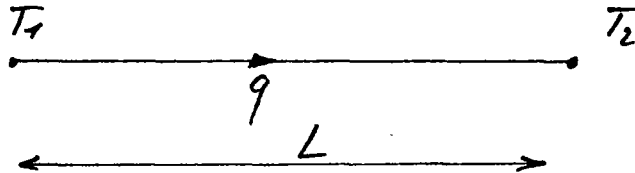
$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 \ll R_4 + R_3 \\ R_2 \ll R_4 + R_3 \end{array} \right. \quad \text{On pose } R = R_4 + R_3$$

On a alors :

$$\frac{d(T - T_0)}{(T - T_0)} = - \frac{dx}{\rho C q R}$$

$$\longleftrightarrow \quad \ln (T - T_0) = - \frac{x}{\rho C q R} + K_0$$

$$\longleftrightarrow \quad (T - T_0) = K_1 e^{-\frac{x}{R \rho C q}}$$



Conditions aux limites :

$$T(0) = T_1$$

$$T(L) = T_2$$

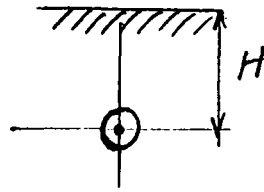
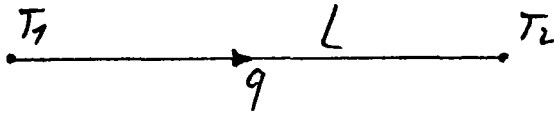
$$\text{d'où : } (T_2 - T_0) = (T_1 - T_0) e^{-\left(\frac{1}{R \rho C} \frac{L}{q}\right)}$$

ou encore :

$$T_2 = AT_1 + B$$

en posant :

$$\begin{cases} A = e^{-\left(\frac{1}{R \rho C} \frac{L}{q}\right)} \\ B = (1 - A) T_0 \end{cases}$$

c) Déperditions thermiques, récapitulatif

Pour chaque conduite  $i$ , on a :

$$T_2(i) = A(i) T_1(i) + B(i)$$

<u>DONNEES</u> ←	{	$\rho, C$ (propriétés physiques de l'eau) .	}	<u>Calcul de R</u>
		$L(i)$ longueur (m)		
		$q(i)$ débit ( $m^3/s$ )		
		$H(i)$ } <u>calcul de f</u>		
		$D(i)$ }		
		$e(i)$ épaisseur isolant ou tube		
		$\lambda(i)$ conductivité isolant ou tube		
$\lambda_{sol}$				
		$T_o$ : température de surface		

$$A(i) = \exp \left( - \frac{1}{\rho C} \frac{L(i)}{R(i) q(i)} \right)$$

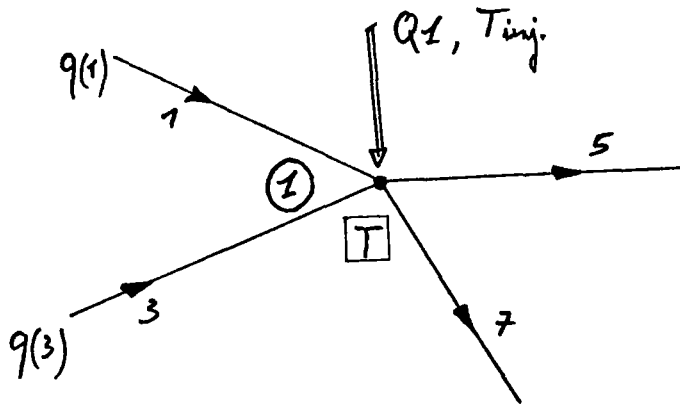
$$B(i) = (1 - A(i)) T_o$$

$$R(i) = \frac{f}{\lambda_{sol}} + \frac{\ln \left( \frac{D + 2e}{D} \right)}{2\pi \lambda}$$

#### 4.2 - Méthode de calcul de la distribution des températures

##### a) Exemple

Considérons l'exemple du noeud suivant :



On pose :  $T_1(i)$  : température de début de la conduite  $i$

$T_2(i)$  : température de fin de la conduite  $i$

Pendant l'instant  $dt$ , la conservation de l'énergie calorifique au noeud se traduit par l'équation :

$$\rho C (q(1) T_2(1) + q(3) T_2(3) + Q_1 T_{inj}) dt =$$

$$\rho C (q(1) + q(3) + Q_1) T dt .$$

c'est-à-dire :

$$T = \frac{q(1) T_2(1) + q(3) T_2(3) + Q_1 T_{inj}}{q(1) + q(3) + Q_1} \quad (1)$$

-  $T$  : température au noeud (température de mélange)

-  $T_{inj}$  : température d'injection au noeud 1

T est aussi la température de début des conduites qui partent du noeud.

$$T_1(5) = T_1(7) = T \quad (2)$$

De plus, on a vu précédemment que la relation entre  $T_2$  et  $T_1$  est de la forme :

$$T_2 = aT_1 + b \quad (3)$$

de (1), (2) et (3), on tire la relation :

$$T_1(5) = \frac{q(1) a(1) T_1(1) + q(3) a(3) T_1(3)}{q(1) + q(3) + Q_1} = \frac{b(1) q(1) + b(3) q(3) + Q_1 T_{inj}}{q(1) + q(3) + Q_1}$$

#### b) Généralisation

Pour chaque conduite  $i$  du réseau, on a donc la relation :

$$T_1(i) = \frac{\sum q(k) a(k) T_1(k)}{\sum q(k) + Q} = \frac{\sum b(k) q(k) + Q T_{inj}}{\sum q(k) + Q}$$

- . La sommation se faisant sur les conduites débouchant sur le noeud origine de  $i$
- .  $Q$  et  $T_{inj}$  sont respectivement le débit et la température d'injection sur ce noeud.
- . On a donc affaire finalement à un système linéaire de dimension  $N$  ( $N$  : nombre de conduite du réseau) d'inconnue  $T_1$ , température de départ des conduites.

$$\boxed{[G] T_1 = W}$$

Les composantes de  $G$  sont données par :

$$G(i,i) = 1$$

$$G(i,k) = \frac{q(k) a(k)}{\sum q(k) + Q}$$

si  $k$  est une conduite débouchant sur le noeud origine de  $i$

$$G(i,k) = 0 \quad \text{sinon} \quad .$$

les éléments de  $W$  sont donnés par :

$$W(i) = \frac{b(k) q(k) + Q T_{inj}}{q(k) + Q}$$

La résolution de système fournit les températures de début de conduites, donc uniquement les températures des noeuds correspondant à au moins un départ de conduite.

On calcule les températures aux noeuds exclusivement d'extrémité en appliquant la relation entre noeud départ et noeud extrémité d'une conduite :

$$T_2 = a T_1 + b$$

On a alors la température en chaque noeud du réseau.

c) Validité des résultats obtenus

Le calcul des températures se fait sur la base du régime thermique établi.

En fait, le temps d'établissement de ce régime dans un sol est supérieur à celui des fluctuations de température en surface et ce régime thermique n'est donc jamais atteint. Compte tenu de cet état de fait, il n'est pas utile de chercher à affiner au maximum la modélisation thermique.

On considèrera donc de manière globale :

- une conductivité moyenne et épaisseur moyenne d'isolant (ou de tube),
- une conductivité moyenne du sol,
- une profondeur moyenne d'enfouissage.

Il n'est alors pas question de considérer les résultats fournis exacts à moins de 0,1° près, mais de les interpréter comme significatifs de la distribution des températures dans des conditions défavorables (faible température de surface) et révélateurs des éventuels défauts thermiques du réseau.



5 - PROGRAMMATION

### 5.1 - Généralités

La programmation s'est effectuée essentiellement sur MICRAL - 21 C dont les caractéristiques sont les suivantes :

- microprocesseur    8 bits    Z 80
- mémoire vive        64 K.O.
- 2 unités de disquettes 5" 1/4    600 K.O.

Système d'exploitation PROLOGUE, langage FORTRAN 80 (microsoft).

Principaux utilitaires du système PROLOGUE :

- Mode edit :
  - > EDIT, Nom de fichier
- Mise à jour (sous edit) :
  - ESC ; \*E
- Compilation :
  - > F80, Nom de fichier
- Link :
  - > L80
  - \* Fichier source, fichiers compilés associés + bibliothèque fortran (FORLIB/S), fichier objet/N/E ou G(exécution)
- Listing des fichiers (duplication) :
  - > CP, DF, Nom de fichier-S, LO (imprimante) .

a) Utilisation des fichiers disques

L'utilisation des fichiers permet, pendant l'exécution d'un programme, de venir stocker ou saisir des données numériques ou littéraires sur un support magnétique de manière séquentielle ou de manière sélective (accès direct). Un fichier est caractérisé par son nom.

- Accès séquentiel

Les données sont stockées de manière linéaire au fur et à mesure de leur écriture. Les formats de lecture doivent être compatibles avec les formats d'écriture. (1)

Les fichiers A.S. sont analogues aux fichiers sources, il est possible de les créer et de les modifier sous le mode EDIT.

L'écriture sur un fichier déjà existant provoque son effacement.

L'utilisation de ces fichiers se fait de la manière suivante :

- ouverture du fichier nommé
- lecture ou écriture des données
- fermeture du fichier

La série des instructions utilisées est la suivante :

```
CALL OPEN (num, 'NOM-S', 0 ou 1)
READ ou WRITE (num, 1) liste
1 FORMAT
ENDFILE num
```

Num : numéro logique affecté au fichier dans le programme.

0 ou 1 : unité de disquette support.

(1) Remarque :

L'intérêt de stocker les données sous forme formatée réside dans le fait de permettre le contrôle, l'édition, voire la modification de ces données.

Si ce contrôle ne se justifie pas, on préférera une écriture/lecture sur fichier des données non interprétées (sans format), l'opération se faisant alors beaucoup plus rapidement.

- Accès direct

Le fichier A.D est divisé en enregistrements. L'intérêt de ce fichier est qu'il permet l'opération d'entrée/sortie à un endroit précis du fichier correspondant à un enregistrement. Chaque enregistrement occupe une place de longueur prédéfinie (ici, chaque enregistrement occupe un secteur du disque), ces fichiers présentent donc l'inconvénient d'utiliser une place plus importante, pour une même masse d'informations que les fichiers A.S.

Un fichier existant peut être prolongé par création de nouveaux enregistrements.

L'utilisation de ces fichiers se fait de la manière suivante :

- ouverture du fichier nommé
- lecture ou écriture sur les enregistrements nommés
- fermeture du fichier.

La série des instructions est la suivante :

```
CALL OPEN D (num, NOM - D, 0 ou 1, Nrec)
READ (num, f, REC = n1) liste
WRITE (num, f, REC = n2) liste
CALL SVREC (num, n2)
f   FORMAT
CALL CLOSED (num)
```

Nrec : numéro du dernier enregistrement effectué

n1, n2 : numéros d'enregistrement.

OPEN D, CLOSED, SVREC sont des sous-programmes appartenant au programme de gestion des fichiers à accès direct propre au système d'exploitation.

L'effacement ou la suppression d'un fichier A.D. se fait par lancement du programme-système : CHPURGC.

Exemple d'utilisation d'un fichier à accès séquentiel

```

C
WRITE(1,150)
150 FORMAT(//,3X,'Mise en fichier.')
CALL OPEN(4,'MATRICE-S ',1)
DO 222 I=1,NBRAN
WRITE(4)(M(I,J),J=1,NBRAN)
222 CONTINUE
ENDFILE 4
C
CALL OPEN(5,'RESIST-S ',1)
WRITE(5,161)(R(I),I=1,NBRAN)
161 FORMAT(SF15.2,/)
ENDFILE 5
C

```

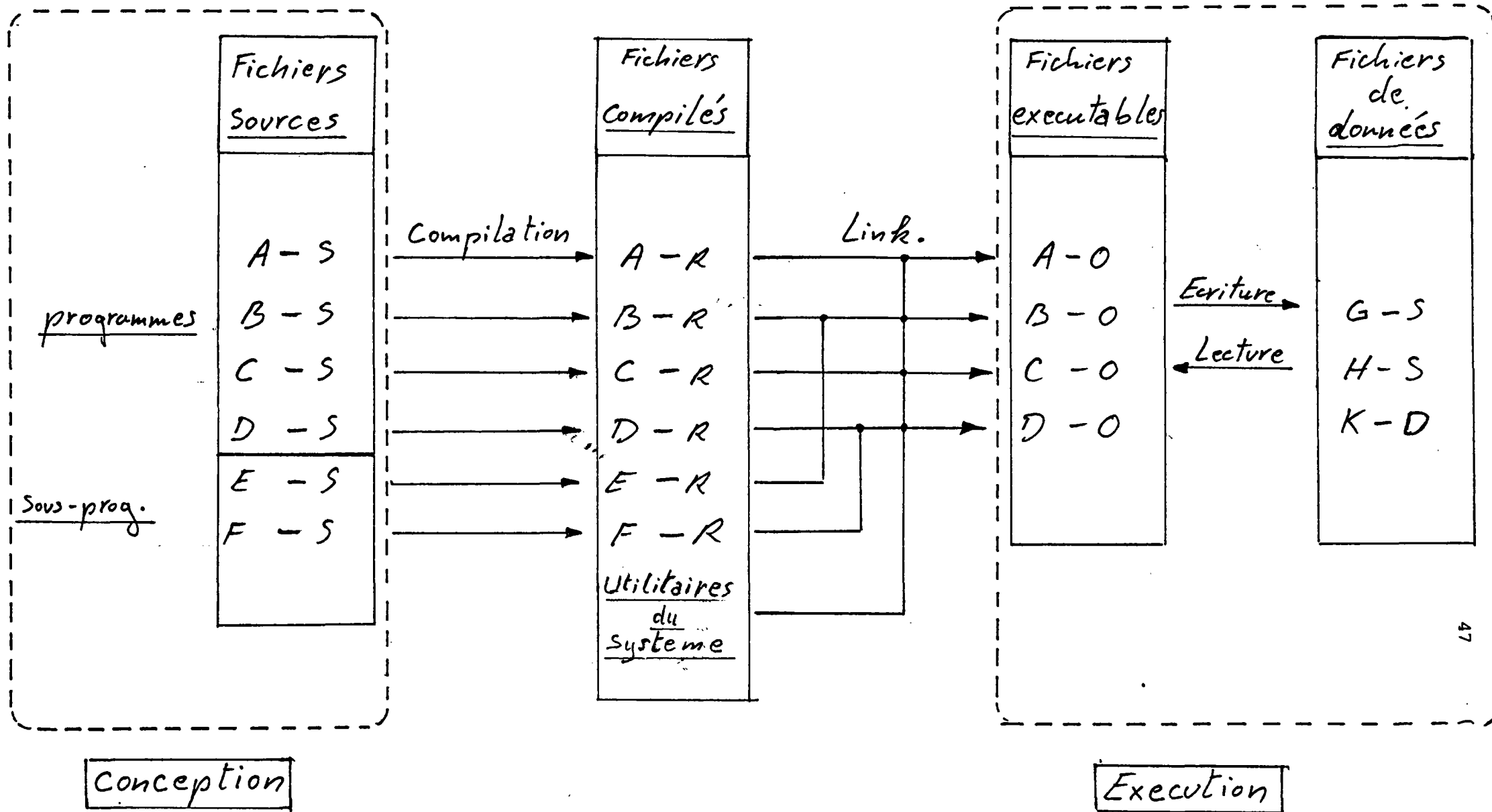
Exemple d'utilisation d'un fichier à accès direct

```

CALL OPEND(3,'DONNEES-D ',1,NREC3)
READ(3,451,REC=5) NMAX
READ(3,451,REC=6) NBRAN
READ(3,451,REC=7) NNOEUD
READ(3,451,REC=8) NMAILL
C
97 READ(1,501) MAILL(J)
K1=20+2*NMAX+I
WRITE(3,420,REC=K1) I,NCMA,(MAILL(J),J=1,NCMA)
420 FORMAT(1X,I3,1X,I3,1X,30(I4))
CALL SVREC(3,K1)
C
999 CONTINUE
CALL CLOSED(3)
C

```

b.) Manipulation des différents fichiers



c) Structure du logiciel

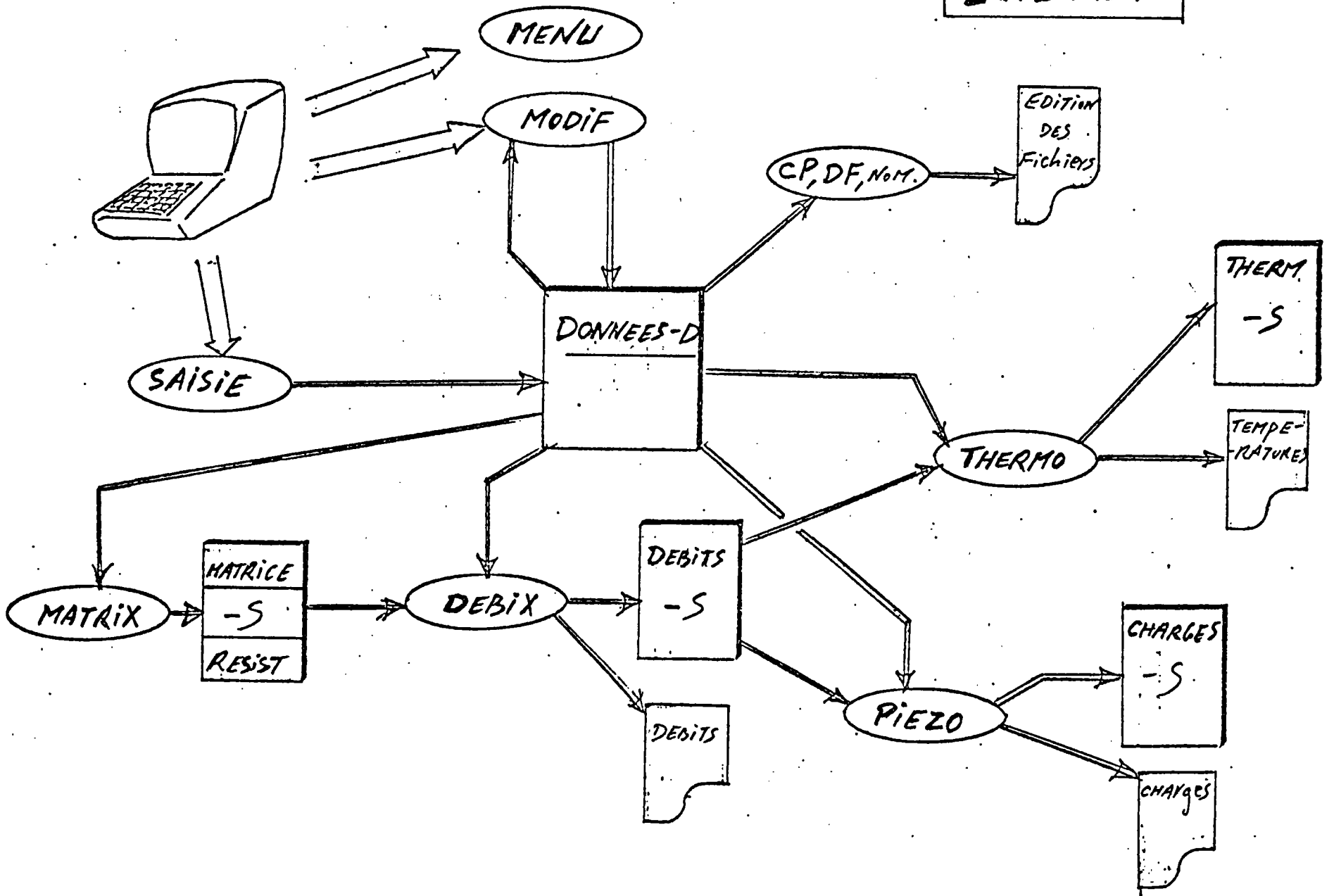
Le logiciel décrit ici a une structure "chaîne", il est composé de plusieurs programmes indépendants lisant ou écrivant sur des fichiers communs (accès séquentiel ou direct) et utilisant des sous-programmes communs.

Outre la souplesse d'emploi du logiciel, une telle structure apporte une certaine aisance dans la conception et dans la manipulation des fichiers-source (possibilités de modifications séparées, temps de lecture sur disque et de compilation réduits).

De plus, l'ensemble peut être facilement complété par l'apport de nouveaux modules.

Cela permet enfin une optimisation de la place mémoire vive occupée lors de l'exécution.

# LAUREL





e) Description des variables communes à tous les programmes

ALPHA : Exposant du débit dans la formule des pertes de charge  
 ERREUR : Pourcentage d'erreur dans le calcul des débits  
 NBRAN : Nombre de conduites du réseau  
 NMAILL : Nombre de mailles  
 NMAX : Nombre maximum de conduites  
 NNOEUD : Nombre de noeuds du réseau  
 N°REF : Numéro du noeud de référence  
 PREF : Pression de référence

TABLEAUX :

COTE (i) : Cotes au sol des noeuds  
 DEB (i) : Débits aux noeuds  
 D (i) : Diamètre des conduites  
 K (i) : Rugosité  
 L (i) : Longueur  
 MAILL (i,j) : Composition de la maille i  
 NCMA (i) : Nombre de conduite par maille  
 O1 (i) : Noeud origine des conduites  
 O2 (i) : Noeud extrémité des conduites  
 DELTA (i) : Valeur des surpressions  
 DELTAM (i) : Surpressions dans les mailles  
 R (i) : Résistances hydrauliques  
 Q (i) : Débit dans la conduite i  
 M (i, j) : Matrice hydraulique du réseau  
 VECT (i) : Vecteur des termes indépendants  
 P (i) : Pression effective au noeud i  
 H (i) : Cote piézométrique au noeud i  
 TI (i) : Température d'injection  
 T (i) : Température au noeud

## 5.2 - Saisie et stockage des données

### PROGRAMME SAISIE

Le but de ce programme est d'établir le fichier principal des données caractéristiques d'un réseau quand celui-ci correspond à une nouvelle étude (nouveau réseau). Le titre de ce fichier correspondra au titre de l'étude.

Ce fichier est à accès direct et a pour nom : DONNEES - D

L'organisation de ce fichier est décrite plus loin.

Avant cette mise en fichier, le programme "SAISIE" effectuée en mode conversationnel la saisie de toutes les caractéristiques géométriques et numériques du réseau nécessaire à l'ensemble de l'étude.

C'est donc dans le cas d'un nouveau réseau, le premier programme à lancer dans la chaîne constituant le logiciel.

#### Particularités

La mise en fichier se fait par appel à un sous-programme extérieur nommé RECDAT.

Les variables communes à SAISIE et à RECDAT sont déclarées par l'instruction COMMON.

La saisie est divisée en rubriques et se fait sous forme de questions ou sous forme de tableau pour les données répétitives (conduites, mailles, noeuds). Chaque rubrique est suivie d'une option correction.

#### Description des variables spécifiques

I, J : test de modification

N, KO, KOND, KONDAB: variables auxiliaires de calcul

NSurp : nombre de surpresseur

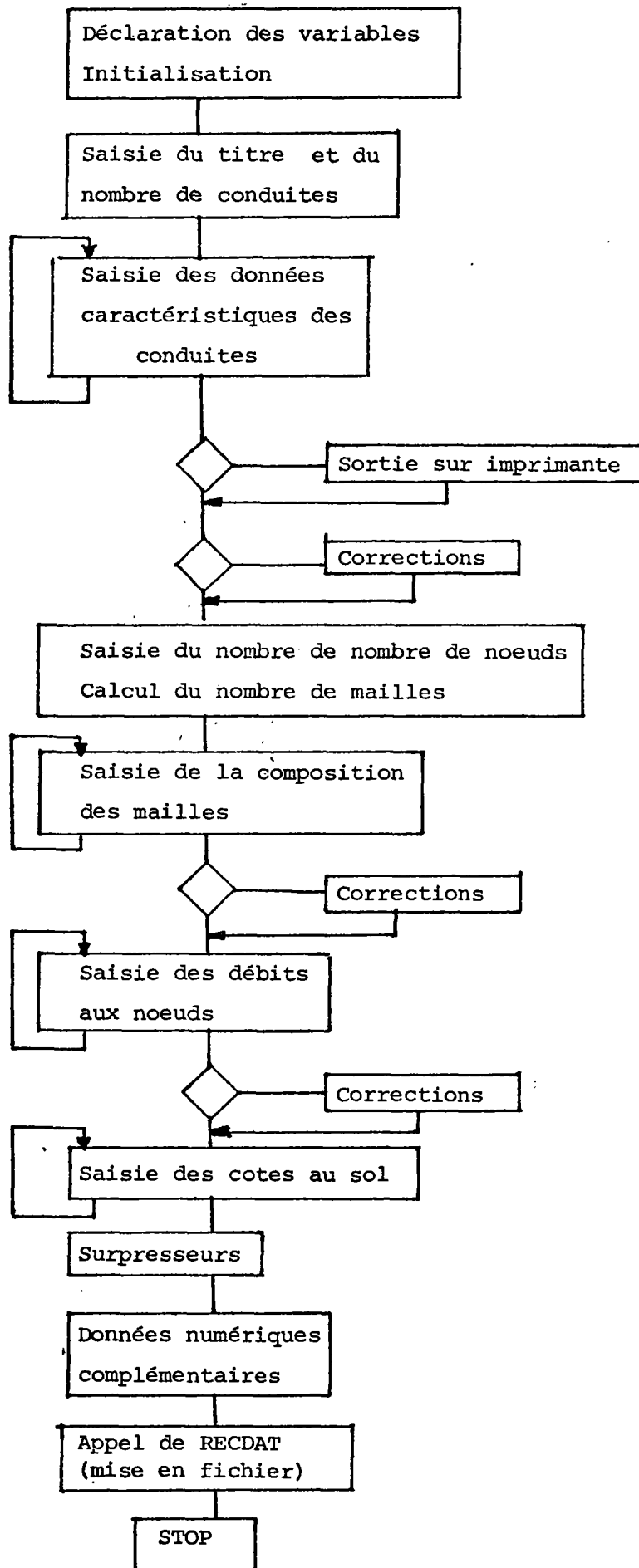
REP, NON, OUI : variables caractères de test

ESC, CH, CHO, CH1, CH2 ... : caractères de contrôle de l'imprimante ou de l'écran.

Remarque sur la saisie des mailles

Une maille est caractérisée de la manière suivante :

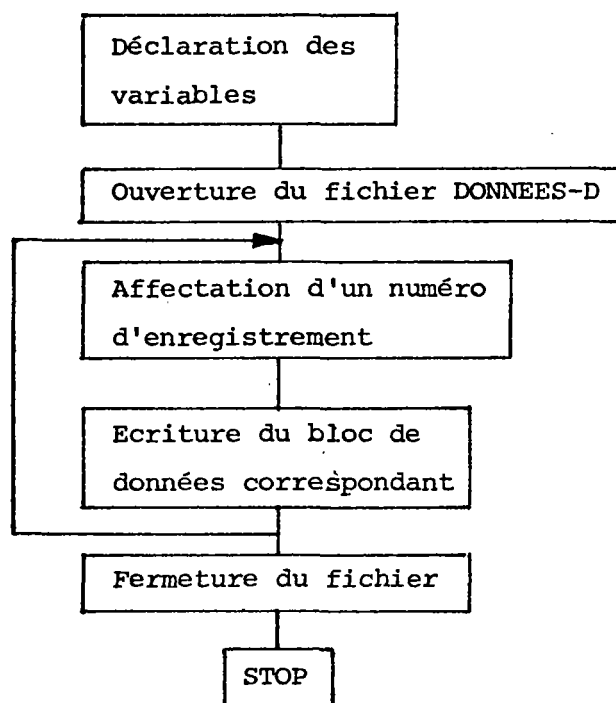
NCMA (i) : nombre de conduite de la maille  
MAILL (i,j) : numéro de la jème conduite de la maille i  
affecté du signe - si le sens de la conduite  
est l'inverse du sens de la maille

Algorithme du programme SAISIE

**SOUS-PROGRAMME RECDAT**

Ce sous-programme, appelé par SAISIE, crée le fichier à accès direct DONNEES - D et écrit les données saisies après les avoir structurées en bloc, chaque bloc est affecté d'un numéro d'enregistrement.

L'algorithme est le suivant :



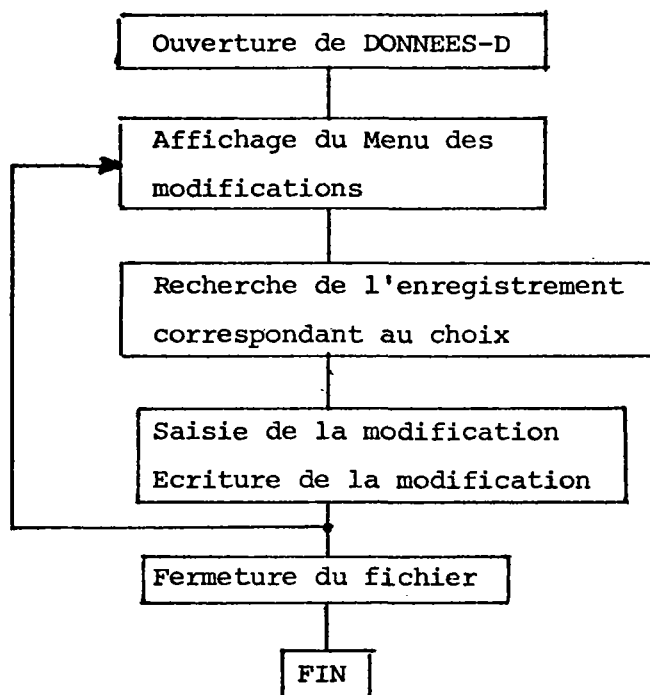
REC	DONNEES	Format d'écriture
1		
2	TITRE	39X,15A1
3	NSIM	39X,15
4		
5	NMAX	39X,15
6	NBRAN	39X,15
7	NNOEUD	39X,15
8	NMAILL	39X,15
9	ERREUR	39X,F5.2
10	ALPHA	39X,F5.3
11	NOREF	39X,15
12	PREF	39X,F6.2
13		
.		
.		
20		
21	Cote(1)	F7.2
.	.	.
.	.	.
20+NNOEUD	Cote(NNOEUD)	F7.2
.		
.		
20+NMAX		
20+NMAX+1	1,O1(1),O2(1),D(1),K(1), L(1),DELTA(1)	3(1X,I3),1X,F5.0,1X,F6.3, F9.2,5X,F9.2
.	.	.
20+NMAX+NBRAN	.	.
.		
.		
20+2NMAX		
20+2NMAX+1	1,NCMA(1),MAILL(1,1)...	1X,I3,1X,I3,1X,30(I4)
.	.	.
.	.	.
20+2NMAX+NMAILL	.	.
.		
.		
20+3NMAX		
20+3NMAX+1	DELTAM(1)	F11.5
.	.	.
.	.	.
20+3NMAX+NMAILL	.	.
21+3NMAX+NMAILL	DEB(1)	F11.5
.	.	.
.	.	.
20+3NMAX+NMAILL	.	.
+NNOEUD		

### 5.3 - Modifications des données

#### PROGRAMME MODIF

Le but de ce programme est de modifier une ou plusieurs valeurs des données présentes sur le fichier DONNEES-D. Ce programme est utilisé entre chaque simulation d'une même étude. Il incrémente le numéro de simulation.

Algorithme :



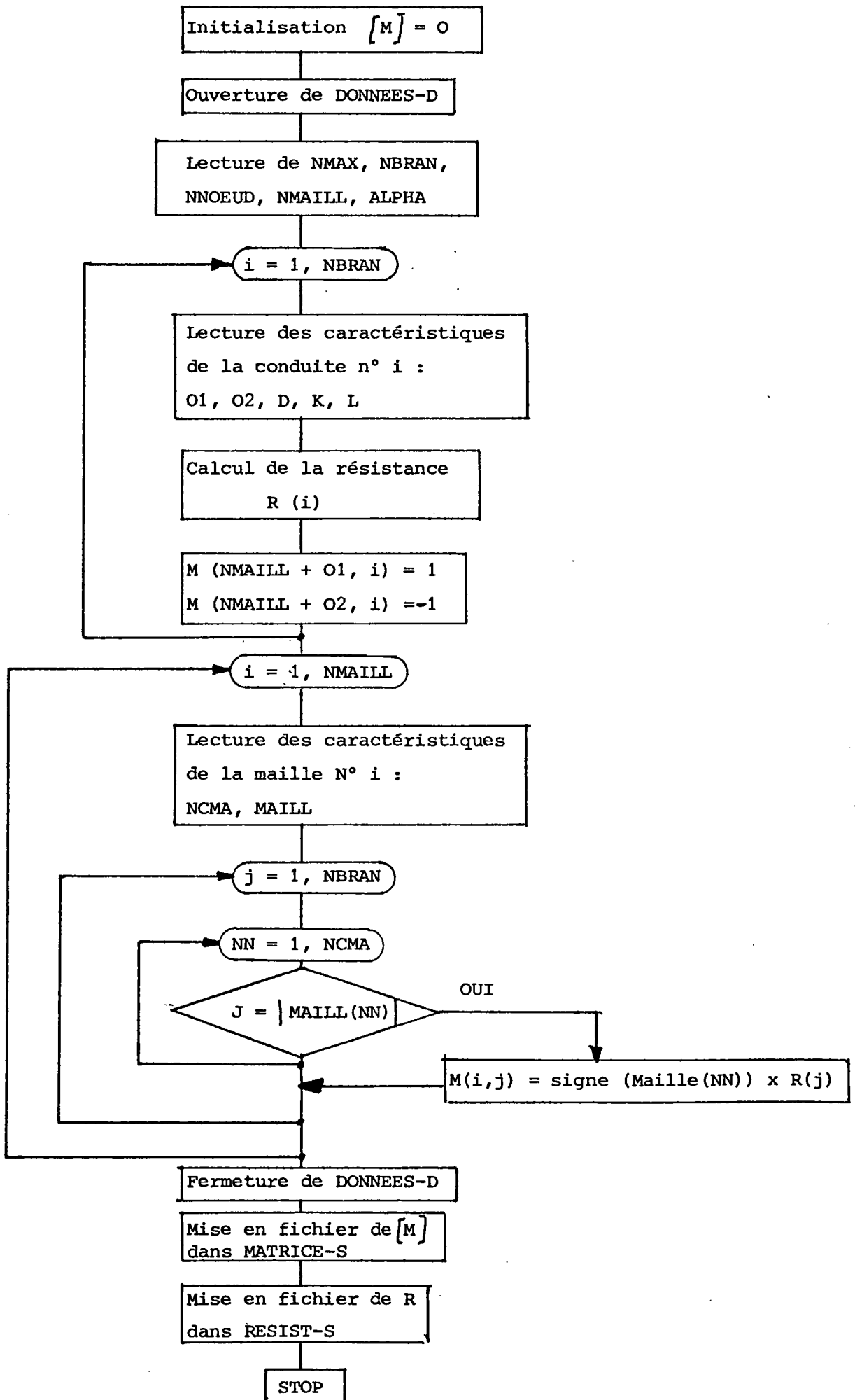
#### 5.4 - Etablissement de la matrice caractéristique du réseau

PROGRAMME MATRIX
------------------

Le but de ce programme est d'établir la matrice hydraulique du réseau telle qu'elle a été définie dans le paragraphe 3.2. Il établit également le tableau des résistances dont le calcul est décrit au paragraphe 3.1. Il crée les fichiers MATRICE-S et RESIST-S.

En principe, il est utilisé à chaque simulation après SAISIE ou MODIF.





### 5.5 - Calcul de la distribution des débits

PROGRAMME DEBIX
-----------------

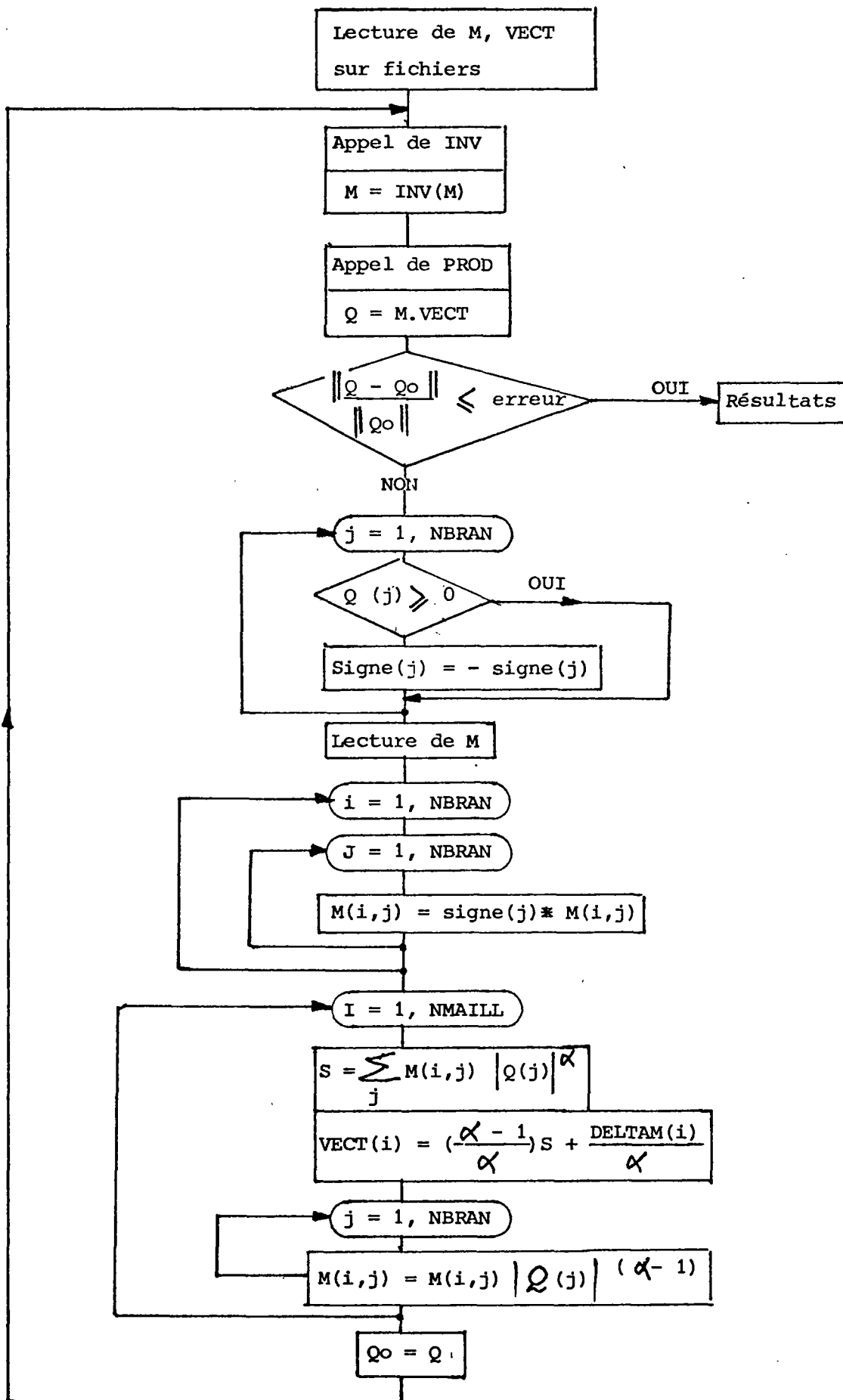
Ce programme effectue le calcul itératif sous forme matricielle des débits tel qu'il est décrit au paragraphe 3.2.

L'algorithme est le suivant :

- lecture sur DONNEES-D des variables concernées
- lecture sur MATRICE-S de M
- calcul des débits
- mise en fichier (DEBITS-S)
- édition du résultat

Particularités : l'inversion et le produit des matrices se fait par appel à des sous-programmes extérieurs contenus dans BIBLIO. Les variables communes sont déclarées sous l'instruction COMMON.

ORGANIGRAMME SIMPLIFIE  
DU CALCUL DES DEBITS



## 5.6 - Calcul de la distribution des pressions

### PROGRAMME PIEZO

Ce programme effectue le calcul des cotes piézométriques et des pressions effectives aux noeuds tel qu'il est décrit au paragraphe 3.3.

#### Algorithme :

- Lecture sur DONNEES-D des variables concernées
- Lecture des résistances sur RESIST-S
- Lecture des débits sur DEBIT-S
- Calcul des cotes piézométriques et des pressions effectives
- Mise en fichier (CHARGES-S)
- Edition du résultat



## 5.7 - Calcul de la distribution des températures

PROGRAMME THERMO

Ce programme effectue le calcul des températures tel qu'il est décrit au paragraphe 4.2 .

Algorithme :

- Saisie des données thermiques
- Lecture sur DONNEES-D des variables concernées
- Lecture des débits sur DEBITS-S
- Calcul des températures
- Mise en fichier (THERM-S)
- Edition du résultat.

Ce programme fait appel, pour la résolution du système

[G]  $T_1 = W$ , aux sous-programmes INV et PROD contenus dans BIBLIO-R.

## 5.8 - Inversion d'une matrice, produit d'une matrice par un vecteur

### Sous-programme INV et PROD

Le sous-programme d'inversion utilisé reprend la méthode du Pivot (méthode de GAUSS).

Cette méthode a pour avantage de réduire la taille mémoire utilisée, la matrice initiale est détruite et remplacée par son inverse. Cette méthode étant numérique, la précision est excellente mais le temps d'exécution sur micro-ordinateur peut s'avérer très long dans le cas de grands réseaux.

Pour les très grands réseaux, on aura tout intérêt à chercher à remplacer le sous-programme d'inversion utilisé ici par un autre utilisant une méthode numérique (méthode de GAUSS-SEIDEL).

## B I B L I O G R A P H I E

-----

CARNAHAN B.

Applied numerical methods.

DUPONT A.

Hydraulique urbaine.

LANCASTRE A.

Manuel d'hydraulique générale.

Technique de l'eau (La) - n° 438/439

VILLEGAS E.Etude de calcul automatique des réseaux de distribution  
d'eaux (thèse).



- CONCLUSIONS -

---

L'application de ce logiciel sur un exemple précis a montré outre des résultats très satisfaisants, une convergence rapide du procédé (nombre d'itérations réduit) et une grande souplesse d'utilisation issue de la structure "chainée" de ce logiciel. De plus, l'existence de nombreux contrôles de compatibilité des données et la possibilité d'édition de tous les fichiers de travail apportent une certaine fiabilité d'utilisation.

L'inconvénient majeur reste actuellement, pour de grands réseaux, et pour une utilisation sur micro-ordinateur, une durée trop longue pour l'inversion de matrice due à la méthode d'inversion utilisée. Il est possible de lever cet inconvénient de 3 manières différentes :

- soit utiliser un sous-programme d'inversion plus rapide (méthode numérique)
- soit effectuer l'opération d'inversion sur une unité centrale de classe supérieure (le SGR Aquitaine est relié au centre de calcul du BRGM d'Orléans (VAX et IBM) par le réseau TRANSPAC)
- soit si cela est possible, scinder le réseau en plusieurs sous-réseaux.

La programmation de ce logiciel est adaptée à son utilisation sur MICRAL 21-C. Son extension à d'autre micro-ordinateur ne doit guère poser de problèmes, la principale modification résidant sans doute dans les commandes d'accès fichiers qui sont ici des sous-programmes propres au système. L'intérêt d'un tel logiciel, et notamment dans le cas de DAX où est envisagé le recyclage des nombreux rejets du réseau existant, est de permettre le dimensionnement des conduites de bouclage, des pompes, vannes, circulateurs, nouvelles conduites, etc... apportant ainsi une aide importante à la décision au niveau de l'étude du projet. Son exploitation permettra également une optimisation du fonctionnement par des réglages ajustés au fonctionnement désiré.

Tout cela se traduisant en fait par des économies au niveau de la ressource en eau, des frais d'exploitation et des investissements.

Le logiciel LAUREL devrait donc se révéler un outil de travail important pour l'étude des réseaux maillés.

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE  
BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

ANNEXE 1

Logiciel LAUREL

=====

Notice d'utilisation

et exemple

84 AGI 164 AQI Pessac le 29 juin 1984

MODELISATION DU COMPORTEMENT HYDRAULIQUE ET  
THERMIQUE DES RESEAUX MAILLES



SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL AQUITAINE  
Avenue Docteur Albert Schweitzer - 33600 PESSAC - Tél.: (56) 80.69.00

# Logiciel LAUREL

## - SOMMAIRE -

1 - BUT .....	1
2 - PRINCIPE .....	2
3 - DESCRIPTION	
- Description .....	2
- Composition.....	3
4 - DESCRIPTION D'UN RESEAU, TERMINOLOGIE .....	4
5 - DESCRIPTION DES DONNEES .....	5
6 - EXPLOITATION	
- Utilisation sur MICRAL .....	6
- Déroulement de l'exploitation .....	6
- Ajustement du modèle hydraulique .....	8
- Débit "en route" .....	8
- Modification du réseau .....	9
- Condition d'exécution des programmes .....	10
7 - EXEMPLE D'UTILISATION	
- Réseau "exemple" .....	11
- Déroulement des programmes et résultats .....	13

NOTICE D'UTILISATION

```
=====
oo                oo
oo      L A U R E L      oo
oo                oo
=====
```

```
=====
1 - BUT
=====
```

Ce logiciel est destiné à simuler les comportements hydraulique et thermique en régime établi des réseaux maillés et/ou ramifiés de conduites véhiculant de l'eau (chaude ou non) sous pression.

#### Aspect hydraulique

-----

Sont concernés tous les réseaux de distribution correspondants à la description précédente.

#### Aspect thermique

-----

Sont concernés les réseaux de chaleur monotubes composés de conduites enterrées véhiculant de l'eau chaude sous pression.

Il peut être utilisé lors de la conception d'un réseau ou sur un réseau existant que l'on souhaite optimiser.

Une simulation complète fournit l'état des débits, pressions et températures à partir du scénario de fonctionnement qui est appliqué au réseau. Pour un réseau donné, on établit ce scénario à partir de la modification des données d'ordre géométriques, topographiques, hydrauliques ou thermiques.

=====  
2 - PRINCIPE  
=====

Tous les résultats sont issus du calcul des débits qui constitue la partie essentielle de l'exploitation. Ce calcul, effectué sous forme matricielle, utilise une méthode de calcul numérique itérative basée sur la méthode de Newton (Linéarisation d'un système).

La matrice caractéristique du réseau est issue des principes de continuité de charge et de conservation des débits. Cette matrice et la distribution initiale des débits sont générés automatiquement ce qui réduit le travail préliminaire de l'utilisateur au minimum.

La convergence du procédé est généralement rapide mais chaque itération nécessite l'inversion d'une matrice qui, si elle effectuée sur micro-ordinateur, prendra un temps relativement long dans le cas d'un grand réseau. ( Il est possible de remplacer le sous-programme d'inversion utilisé par un autre plus rapide (méthode numérique)).

=====  
3 - DESCRIPTION  
=====

Le logiciel LAUREL se présente sous la forme d'une chaîne de programmes et de sous-programmes indépendants exploitant des fichiers de données communs.

Composition :

-----

- Programmes (fichiers exécutable)

.....

- SAISIE
- MODIF
- MATRIX
- DEBIX
- PIEZO
- THERMO

- Sous-programmes (fichiers non exécutable)

.....

- RECDAT
- BIBLIO
- MENUX

- Fichiers de données (non exécutable)

.....

- DONNEES (Acces direct)
- MATRICE (Acces séquentiel)
- RESIST ( " " " " " )
- DEBITS ( " " " " " )
- CHARGES ( " " " " " )
- THERM ( " " " " " )

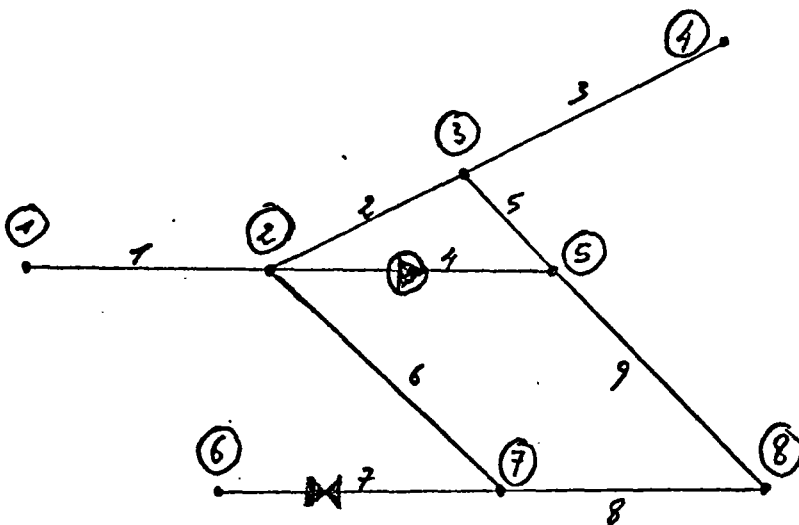
=====  
 4 - DESCRIPTION D'UN RESEAU, TERMINOLOGIE  
 =====

On adopte la terminologie suivante :

- Un NOEUD est, soit un point de jonction de plusieurs conduites, soit un point extrémité d'une ramification.  
 Les noeuds comprennent les points d'injection de débit et les points de soutirage (consommations ou rejets).
- On dira de manière simple qu'une CONDUITE est une partie du réseau comprise entre deux noeuds.
- Un ensemble formant une boucle fermée constitue une MAILLE du réseau (une maille ne comportera pas de vannes fermées).

Il faut noter l'existence possible de vannes et de surpresseurs.

Schema d'un reseau quelconque :



- 9 conduites
- 8 noeuds
- 3 mailles possibles
- 1 surpresseur
- 1 Vanne .



=====  
5 - DESCRIPTION DES DONNEES  
=====

L'étude nécessite :

- La numérotation des conduites
- La numérotation des noeuds
- La numérotation des mailles
  
- Un sens arbitraire pour chaque débit
- Le sens arbitraire de contour des mailles

Les données nécessaires sont les suivantes :

- Le nombre de conduites maximum
- Le nombre de conduites de l'étude
- Le nombre de noeuds
  
- Les noeuds départ et arrivée pour chaque conduite
- Le diamètre de chaque conduite
- La rugosité " " " (coefficient k)
- La longueur " " "
  
- Le nombre de conduites dans chaque maille
- Le numéro des " " " "
  
- Le débit sur chaque noeud
- La cote au sol de chaque noeud
  
- La donnée des surpresseurs éventuels
- La donnée des vannes éventuelles
  
- Une pression effective de référence
- Le numéro du noeud de référence
  
- La valeur de l'exposant du débit dans la formule de perte de charge
- Le pourcentage d'erreur désiré dans le calcul des débits

Remarque

.....

Le programme de calcul de la distribution des débits travaille sur la base des débits aux noeuds imposés et non sur celle des pressions imposées. Ces pressions sont déterminées par la suite et font partie des résultats

=====  
6 - EXPLOITATION  
=====

Utilisation sur MICRAL  
-----

Le lancement sur MICRAL se fait de la manière suivante :

- Disquette programmes (LAUREL) dans FL0
- Disquette fichiers dans FL1  
(cette disquette doit déjà contenir le fichier CATADIR-D)
- Taper RETURN

Edition des fichiers sur imprimante :

- Taper CP,DF,Nom du fichier -S ou -D,LO

Effacement de DONNEES-D (réinitialisation) :

- Taper CHPURGC

Déroulement de l'exploitation  
-----

Une étude est caractérisée par son nom (nom du réseau) et chaque simulation porte un numéro. L'exécution de MODIF incrémente le numéro de simulation.

L'exploitation s'effectue en plusieurs phases différentes suivant les cas.

- Saisie des données caractéristiques du réseau lors d'une nouvelle étude ( nouveau réseau ) : exécution de SAISIE :
  - . Le fichier DONNEES est vide
  - . Saisie des données au clavier
  - . Mise en fichier sur DONNEES
- Modification d'un réseau donné en vue d'une nouvelle simulation : exécution de MODIF
  - . Saisie des modifications au clavier
  - . Modification du fichier DONNEES

- Simulation du réseau présent sur DONNEES, l'utilisateur a les possibilités suivantes :

Exécution de MATRIX :

- . Lecture sur DONNEES
- . Constitution de la matrice du réseau
- . Ecriture sur RESIST et sur MATRICE

Exécution de DEBIX

- . Lecture sur DONNEES, MATRICE
- . Calcul des debits
- . Ecriture sur DEBITS
- . Edition

Exécution de PIEZO

- . Lecture sur DONNEES, RESIST, DEBITS
- . Calcul des charges
- . Ecriture sur CHARGES
- . Edition

Exécution de THERMO

- . Saisie des données thermiques
- . Lecture sur DONNEES, DEBITS
- . Calcul des températures
- . Ecriture sur THERM
- . Edition

- Ajustement du modèle hydraulique  
-----

Les pertes de charges sont modélisées par une relation du type :

$$J = R \cdot Q^{\text{Alpha}}$$

ou R est fonction, entre autres, du coefficient de rugosité k (formule de Colebrook).

L'ajustement du modèle hydraulique se fera donc :

- Soit sur la modulation de Alpha (Alpha inférieur ou égal à 2 pour des débits inférieur au m<sup>3</sup>/s). Ceci constitue une adaptation globale.
- Soit par la modulation de k sur chaque conduite, la valeur de k étant en général difficilement appréciable (adaptation spécifique).

- Debit "en route" :  
-----

Une conduite distribuant un débit Q réparti sur toute sa longueur peut être traitée comme une seule conduite simple en répartissant le débit Q à chacune de ses extrémités,

avec :

- 0.45 Q pour le noeud départ
- 0.55 Q pour le noeud arrivé .

Les débits prélevés doivent être d'un ordre de grandeur inférieur au débit de la conduite principale.

- Modification du réseau  
-----

Menu des modifications (programme MODIF) :

.Nombre de conduites.....	6
.Nombre de noeuds.....	7
.Nombre de mailles.....	8
.Precision.....	9
.Alpha.....	10
.Noeud de reference.....	11
.Charge de reference.....	12
.Cotes au sol.....	13
.Caractéristiques des conduites.....	14
.Caractéristiques des mailles.....	15
.Débits aux noeuds.....	16
.Surpresseurs et vannes.....	17

\* L'ensemble des données devant être cohérent, il est nécessaire de modifier toutes les données concernées par une modification du réseau

entre autres :

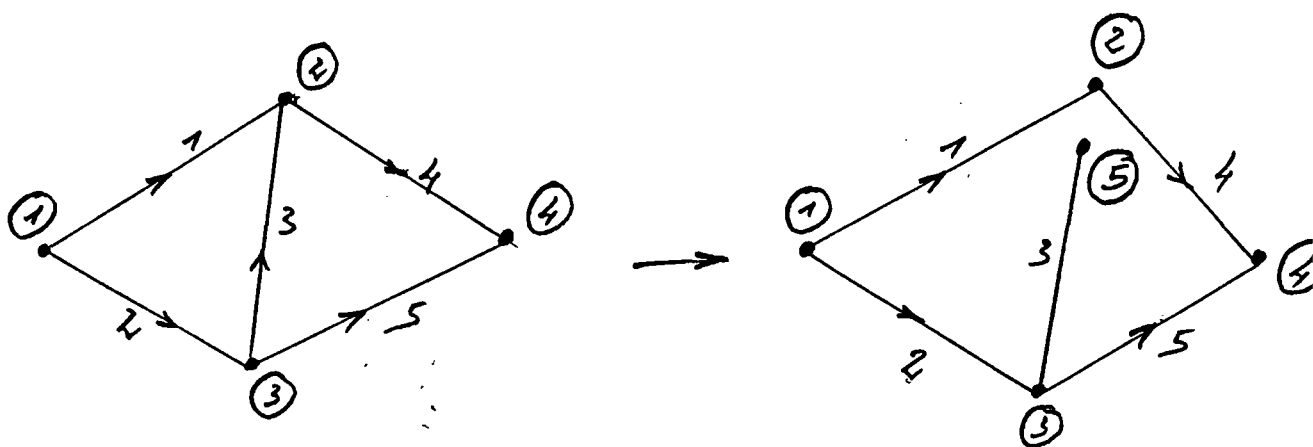
- . Les noeuds supplémentaires entraînent la données de leur débit extérieur et de leur cote au sol.
- . Les conduites supplémentaires peuvent entraîner la création ou la modification de mailles.

etc...

\* Suppression de conduites:

Pour des raisons de compatibilité de numérotation d'enregistrement sur fichiers, la suppression d'une conduite se fait par sa mise en "conduite morte" (ce qui pourrait se traduire en fait par la fermeture d'une vanne).

Exemple : suppression de 3 :



Il est important de noter qu'ainsi, la suppression d'une conduite n'entraîne pas la diminution du nombre de conduites.

- Condition d'exécution des programmes après passage par MODIF  
(nouvelle simulation)

\* Les modifications numérotées 9,10,11,12,13,16 et 17 ne nécessitent pas l'exécution de MATRIX avant DEBIX .

\* Le calcul des pressions et des températures étant issue du calcul des débits, PIEZO et THERMO ne s'exécutent pas si DEBIX ne l'a pas été auparavant (apparition d'un message d'erreur)

(Remarque : Au cours d'une même simulation, le programme THERMO peut être ré-exécuté avec de nouvelles données thermiques.)

EXEMPLE

EXEMPLE D'UTILISATION  
 =====

On considere le reseau "Exemple" de la figure page suivante

- 11 conduites
- 10 noeuds

Les donnees supplementaires sont les suivantes :

Noeud	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Debits	60 l	80 l	100 l	50 l	90 l	120 l	80 l	0 l	0 l	580
Cote au sol	44.6	45	44.5	46.2	45.3	44.75	45	50	50	105

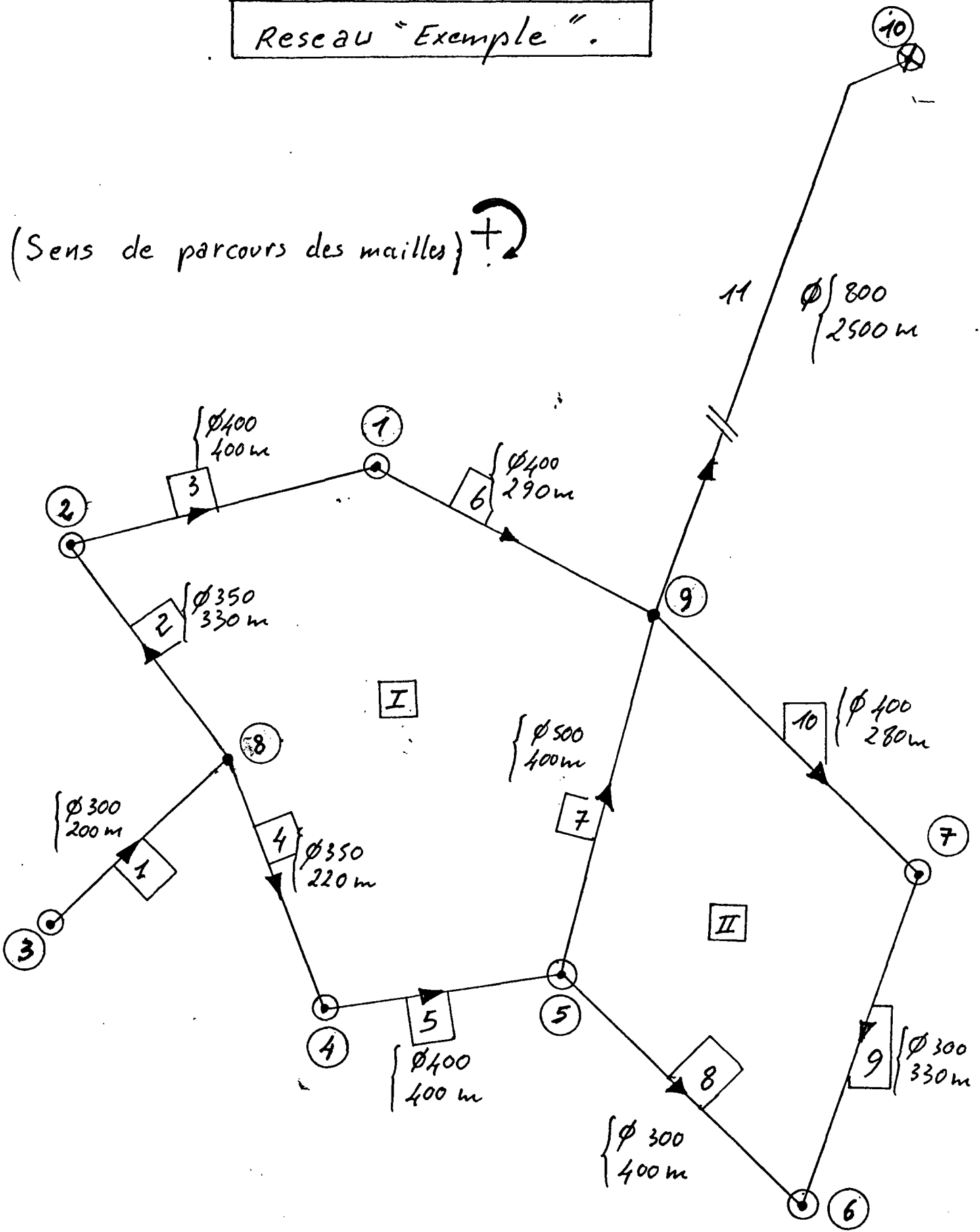
- Noeud de reference : 10
- Pression de reference : 0 (p. atmospherique)

On fixe  $\alpha = 1.98$  et l'erreur  $e=0.1\%$  .



Reseau "Exemple".

(Sens de parcours des mailles)  $\oplus$



Coefficient de rugosité:  $k = 2 \text{ mm}$  pour l'ensemble des conduites.

$\odot$  : injections

$\otimes$  : rejets





PROGRAMME " SAISIE "

\* Titre de l'etude : EXEMPLE

Quel est le nombre maximum suppose de conduites du reseau ? 15

Nombre de conduites de cette etude ? 11



COMPOSITION DES CONDUITES

Conduite	Noeud origine	Noeud extremite
Cond. 1	3	8
Cond. 2	8	2
Cond. 3		

etc...



=====

DONNEES DIMENSIONNELLES DES CONDUITES

=====

\* Diametre \* Rugosite \* Longueur \*  
 \* ( mm ) \* ( mm ) \* ( m ) \*

-----

\* Cond 1 \* ( 3 - 8 ) \* 300

\* \* \* \* 2

\* \* \* \* 200

-----

\* Cond 2 \* ( 8 - 2 ) \* 350

\* \* \* \* 2

\* \* \* \* \*

-----

\* Cond 3 \* ( 2 - 1 ) \*

*etc...*

\* Ecriture des donnees sur imprimante ? (O/N) : 0

Nombre de conduites : 11



Conduite	N.origine-N.extrem.	Diametre ( mm )	Rugosite k ( mm )	Longueur ( m )
1	3 - 8	300.	2.00	200.00
2	8 - 2	350.	2.00	330.00
3	2 - 1	400.	2.00	400.00
4	8 - 4	350.	2.00	220.00
5	4 - 5	400.	2.00	400.00
6	1 - 9	400.	2.00	290.00
7	5 - 9	500.	2.00	400.00
8	5 - 6	300.	2.00	400.00
9	7 - 6	300.	2.00	330.00
10	9 - 7	400.	2.00	280.00
11	9 - 10	800.	2.00	2500.00

\* Y a t il des corrections a apporter ? (O/N) :  N



NOMBRE DE NOEUDS ?  10

Il doit y avoir 2 mailles independantes  
PAUSE <CR>



COMPOSITION DES MAILLES

La maille 1 est formee de combien de conduites ?  6

Quelles sont ces conduites ?  
(Avec + : sens de parcours  
- : sens inverse ).

2
3
6
-5
-7
-4

La maille 2 est formee de combien de conduites ?

*etc.*

Y a t il des corrections a apporter dans  
la composition des mailles ? (O/N) :  N

Entrez les debits sur chaque noeud: (en m<sup>3</sup>/s)

( Avec + : debit entrant  
- : debit sortant )

Noeud	Debit
1	0.06
2	

*etc...*

Le debit sur le no 10 vaut : -.580

Correction sur les debits ? (O/N) :  N

Saisie des cotes au sol des noeuds

( en m N.G.F. )

Noeud	Cote(m)
1	44.6
2	

*etc...*

Quel est le noeud de reference ?  
(noeud a pression fixee) :  10

Pression a ce noeud ( en m.C.E ) :  0

SURPRESSEURS

Combien y a t'il de surpresseurs dans ce reseau ? :  0

VANNES

Combien y a t'il de vannes dans ce reseau ? :  0



Precision desirée dans le calcul des débits ? (en %) :

ALPHA ? :

---



EXEMPLE - 0 .

STOCKAGE DES DONNEES DANS LE FICHER "DONNEES" (Acces direct) .

\*\*\*\*\*

Veillez patienter

STOCKAGE TERMINE .

STOP

```

TITRE DE L'ETUDE           : RESEAU EXEMPLE
NUMERO DE LA SIMULATION    :      0

NOMBRE MAXIMUM DE CONDUITES :      15
NOMBRE DE CONDUITES        :      11
NOMBRE DE NOEUDS           :      10
NOMBRE DE MAILLES         :       2
ERREUR                     :     .10
ALPHA                      :    1.980
NOEUD DE REFERENCE        :      10
PRESSION DE REFERENCE     :     0.00
    
```

COTES AUX NOEUDS (m.NGF) :

```

44.60
45.00
44.50
46.20
45.30
44.75
45.00
48.00
48.00
105.00
    
```

CONDUITES(numero - N.origine - N.final - D. - K - L. - Surp. (mCE) :

numero	N.origine	N.final	D.	K	L.	Surp. (mCE)
1	3	8	300.	2.000	200.00	0.00
2	8	2	350.	2.000	330.00	0.00
3	2	1	400.	2.000	400.00	0.00
4	8	4	350.	2.000	220.00	0.00
5	4	5	400.	2.000	400.00	0.00
6	1	9	400.	2.000	290.00	0.00
7	5	9	500.	2.000	400.00	0.00
8	5	6	300.	2.000	400.00	0.00
9	7	6	300.	2.000	330.00	0.00
10	9	7	400.	2.000	280.00	0.00
11	9	10	800.	2.000	2500.00	0.00

MAILLES (numero - nbre. conduites- num. conduite:

numero	nbre. conduites	num. conduite:
1	6	2 3 6 -5 -7 -4
2	4	10 9 -8 7

VECTEUR DES TERMES INDEPENDANTS (Surp.- Debits) :

```

0.00000
0.00000
.06000
.08000
.10000
.05000
.09000
.12000
.08000
0.00000
0.00000
-.58000
    
```



Retour au menu principal

PROGRAMME " MATRIX "

=====

Lecture sur "DONNEES-D" en acces direct.

Mise en fichier.

Retour au menu principal

Programme DEBIX

=====

Lecture sur fichiers en cours

Calcul des debits

Numeros des conduites dont vous souhaitez voir  
l'evolution du debit au cours du calcul (4 numeros) :

1  
3  
7  
8

Iter.	Cond. 1	Cond. 3	Cond. 7	Cond. 8	Ecart.max	Cond.
1	.1000	.1094	.2671	-.0565	100.00 %	1
2	.1000	.1156	.2568	.0524	206.37 %	9
3	.1000	.1156	.2568	.0524	.06 %	2

\* Mise en fichier

\* Edition des resultats

-----  
RESEAU EXEMPLE 0

### CALCUL DES DEBITS



Precision : .10 %

RESULTATS :

Nombre d'iterations : 3

Conduite	Debit ( m3/s )	Vitesse (m/s)	Remarque
1	.1000	1.41	
2	.0356	.37	
3	.1156	.92	
4	.0644	.67	
5	.1144	.91	
6	.1756	1.40	
7	.2568	1.31	
8	.0524	.74	*
9	.0676	.96	*
10	.1476	1.17	*
11	.5800	1.15	

ATTENTION : \* = Changement de sens .

Retour au menu principal

PROGRAMME PIEZO

=====

Lecture sur fichiers en cours

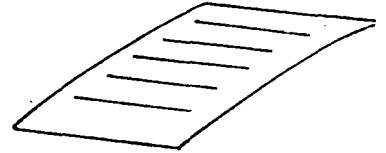
\* Mise en fichier

\* Edition des resultats

-----  
RESEAU EXEMPLE 0

CALCUL DES PRESSIONS

oeud de reference : 10  
Pression de reference : 0.00 m



RESULTATS :

Noeud	Cote (m)	Cote piezo (m)	P.Effective (m)
1	44.60	112.64	68.04
2	45.00	114.01	69.01
3	44.50	116.61	72.11
4	46.20	113.75	67.55
5	45.30	112.41	67.11
6	44.75	113.73	68.98
7	45.00	111.92	66.92
8	48.00	114.24	66.24
9	48.00	110.36	62.36
10	105.00	105.00	0.00

Retour au menu principal

PROGRAMME THERMO  
=====

Saisie globale des donnees thermiques :

\* Epaisseur moyenne de l'isolant (mm)  
( 0 si pas d'isolation ) :

\* Epaisseur moyenne des tubes (mm) :

\* Conductivite des tubes (lambda,W/m.deg) :

\* Valeur de LAMBDA SOL (W/m.deg) :

\* Profondeur moyenne d'enfouissage (m) :

\* Temperature de surface du sol (deg C) :

Lecture sur fichiers des autres donnees .

Quelle est la temperature d'injection au noeud 3 (deg.C) :

Quelle est la temperature d'injection au noeud 2 (deg.C) :

Quelle est la temperature d'injection au noeud 4 (deg.C) :  ... etc..

Mise en fichier du resultat .

Edition du resultat .

## CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne(isolant ou conduites) : 25.0  
 Lambda (isolant ou conduites, W/m.deg) : 30.000000  
 Lambda sol (W/m.deg) : 1.700000  
 Profondeur moyenne (m) : .80  
 Temperature de surface : 0.

## Temperatures d'injection :

Ti( 1 ) = 80.0  
 Ti( 2 ) = 80.0  
 Ti( 3 ) = 80.0  
 Ti( 4 ) = 80.0  
 Ti( 5 ) = 80.0  
 Ti( 6 ) = 80.0  
 Ti( 7 ) = 80.0

## RESULTATS :

Noeud	Temperature ( Deg.C )
1	80.
2	80.
3	80.
4	80.
5	80.
6	80.
7	80.
8	80.
9	79.
10	79.

On constate ici des déperditions thermiques inférieures ou égales à 1° C sans isolation (celle-ci n'est donc pas nécessaire). Ceci est dû en partie à des vitesses d'écoulement relativement grandes.

On se propose alors de faire une nouvelle simulation avec des débits divisés par dix.

Retour au menu principal

RESEAU EXEMPLE - 0 : Modifications .

Faites votre choix :

Attention a bien modifier TOUTES les rubriques concernees

Nombre de conduites	:	6
Nombre de noeuds	:	7
Nombre de mailles	:	8
Precision	:	9
ALPHA	:	10
Noeud de reference	:	11
Charge de reference	:	12
Cotes au sol	:	13
Caracteristique des conduites	:	14
Caracteristique des mailles	:	15
Debits aux noeuds	:	16
Suppresseurs et vannes	:	17
Fin de modif.	:	18

Selection :

Modification des debits aux noeuds - entrez le numero du noeud :

Entrez la valeur du debit 1 (m3/s) :

*..etc..*

RESEAU EXEMPLE 1

### CALCUL DES DEBITS

Precision : .10 %

RESULTATS :

Nombre d'iterations : 3

Conduite	Debit ( m3/s )	Vitesse ( m/s )	Remarque
1	.0100	.14	
2	.0036	.04	
3	.0116	.09	
4	.0064	.07	
5	.0114	.09	
6	.0176	.14	
7	.0257	.13	
8	.0052	.07	*
9	.0068	.10	*
10	.0148	.12	*
11	.0580	.12	

ATTENTION : \* = Changement de sens .

-----  
RESEAU EXEMPLE 1

### CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne(isolant ou conduites) : 25.0  
Lambda (isolant ou conduites, W/m.deg) : 30.000000  
Lambda sol (W/m.deg) : 1.700000  
Profondeur moyenne (m) : .80  
Temperature de surface : 0.

Temperatures d'injection :

Ti( 1 ) = 80.0  
Ti( 2 ) = 80.0  
Ti( 3 ) = 80.0  
Ti( 4 ) = 80.0  
Ti( 5 ) = 80.0  
Ti( 6 ) = 80.0  
Ti( 7 ) = 80.0

RESULTATS :

Noeud	Temperature ( Deg.C )
1	76.
2	77.
3	80.
4	77.
5	76.
6	80.
7	78.
8	78.
9	75.
10	69.



MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

ANNEXE 2

Exploitation sur le réseau  
geothermal de la ville  
de DAX (Landes)

Réseau restreint

84 AGI 164 AQI Pessac le 29 juin 1984

MODELISATION DU COMPORTEMENT HYDRAULIQUE ET  
THERMIQUE DES RESEAUX MAILLES



SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL AQUITAINE

Avenue Docteur Albert Schweitzer - 33600 PESSAC - Tél.: (56) 80.69.00

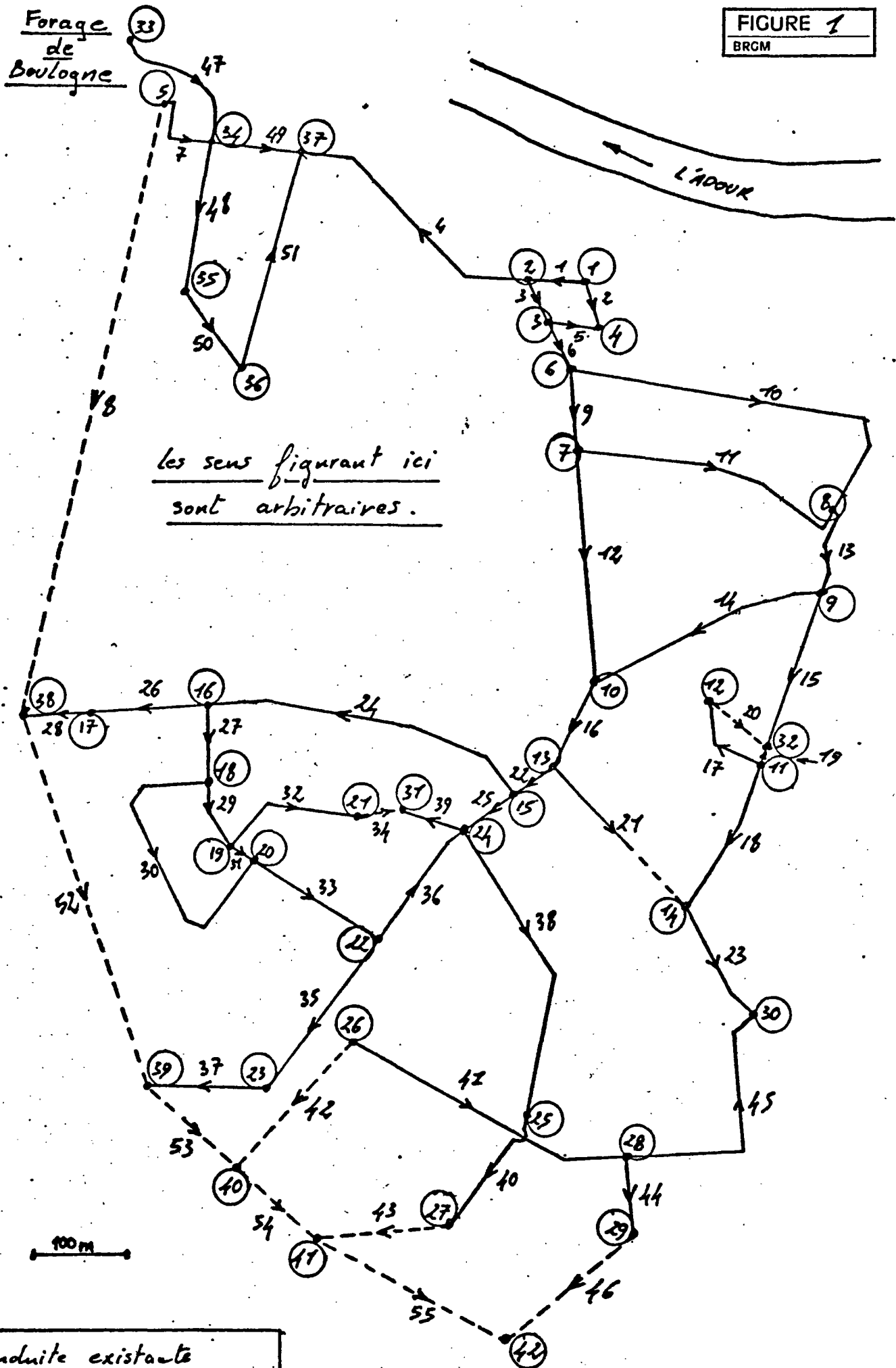
Exemple d'application : réseau restreint (Dax).  
-----

Cette étude, qui concerne une partie du réseau de Dax, ne constitue pas une étude complète d'optimisation d'un réseau mais simplement une illustration de ce que sera l'exploitation du logiciel LAUREL sur le réseau de Dax. En fait, elle reprend une étude de ce réseau restreint déjà faite en 1979 et utilisant un logiciel de la CISI (compagnie de service en informatique). Pour le réseau restreint considéré, le but de l'étude est d'envisager le recyclage des rejets existants.

On trouvera dans cette annexe :

- La numérotation et le maillage du réseau considéré initialement (figure 1 et 2).
- Les données initiales pour ce réseau.
- Les fichiers et résultats issus de la simulation 1
- " " " " " " " " 2
- " " " " " " " " 3
- " " " " " " " " 4
- Un plan d'ensemble du réseau de Dax.

FIGURE 1  
BRGM



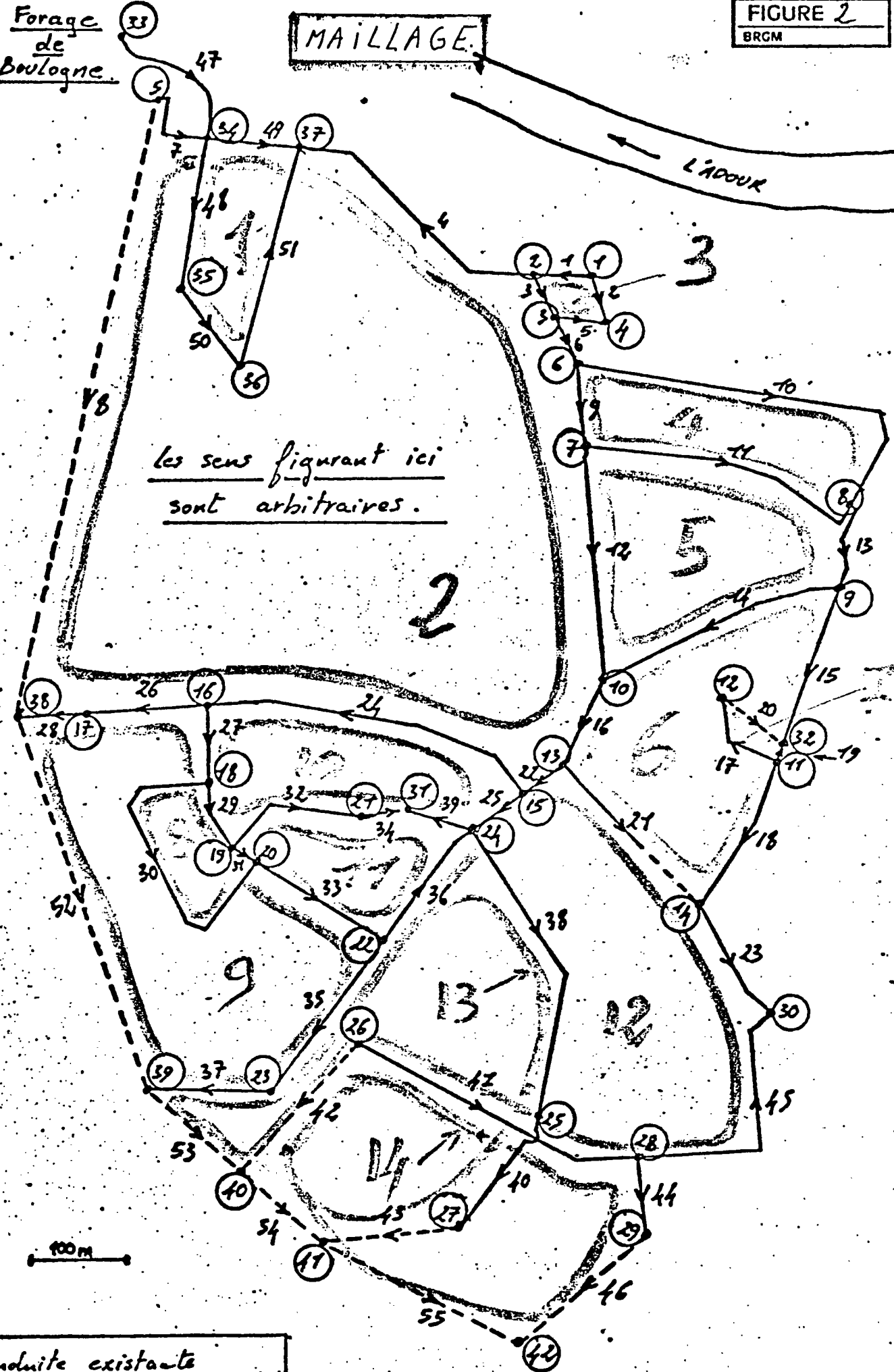
	Conduite existante
	Conduite projetée
	Nœud
	Conduite

Forage  
de  
Boulogne.

MAILLAGE

L'ADOUR

les sens figurant ici  
sont arbitraires.



- Conduite existante
- - - Conduite projetée
- (37) Noeud
- ↗ Conduite

Tableau des conduites (donnees)

Conduite	NOEUD INITIAL	-	NOEUD FINAL	LONGUEUR (M)	DIAMETRE (M)
1	1	-	2	60.0	.150
2	1	-	4	54.0	.125
3	2	-	3	50.0	.125
4	2	-	37	300.0	.125
5	3	-	4	56.0	.125
6	3	-	6	60.0	.125
7	5	-	34	100.0	.125
8	5	-	38	700.0	.100
9	6	-	7	90.0	.125
10	6	-	8	444.0	.100
11	7	-	8	300.0	.080
12	7	-	10	260.0	.125
13	8	-	9	100.0	.125
14	9	-	10	260.0	.100
15	9	-	32	140.0	.125
16	10	-	13	100.0	.125
17	11	-	12	100.0	.050
18	11	-	14	175.0	.125
19	11	-	32	10.0	.125
20	12	-	32	100.0	.050
21	13	-	14	220.0	.050
22	13	-	15	60.0	.125
23	14	-	30	150.0	.050
24	15	-	16	360.0	.080
25	15	-	24	70.0	.125
26	16	-	17	140.0	.080
27	16	-	18	84.0	.080
28	17	-	38	1.0	.200
29	18	-	19	60.0	.080
30	18	-	20	410.0	.060
31	19	-	20	24.0	.080
32	19	-	27	160.0	.060
33	20	-	22	160.0	.080
34	21	-	37	100.0	.050
35	22	-	23	200.0	.080
36	22	-	24	150.0	.080
37	23	-	39	1.0	.200
38	24	-	25	380.0	.080

Conduite	NOEUD INITIAL - NOEUD FINAL		LONGUEUR (M)	DIAMETRE (M)
39	24	- 37	80.0	.060
40	25	- 27	120.0	.050
41	26	- 28	320.0	.080
42	26	- 40	1.0	.200
43	27	- 41	1.0	.200
44	28	- 29	90.0	.030
45	28	- 30	120.0	.080
46	29	- 42	1.0	.200
47	33	- 34	370.0	.250
48	34	- 35	150.0	.100
49	34	- 37	100.0	.125
50	35	- 36	150.0	.100
51	36	- 37	250.0	.050
52	38	- 39	500.0	.100
53	39	- 40	150.0	.060
54	40	- 41	250.0	.060
55	41	- 42	200.0	.040

• Rugosité de conduites

On a retenu, à priori, pour l'ensemble des conduites un coefficient  $k = 0,5 \text{ mm}$

Tableau des noeuds (Données).

NOEUD	ALTITUDE (M)	DEBIT (L/S)
1	8.50	0.0
2	8.50	0.0
3	8.50	0.0
4	9.00	0.0
5	6.50	-2.9
6	9.50	-3.8
7	11.00	0.0
8	10.00	-6.9
9	12.50	0.0
10	15.00	0.0
11	14.50	0.0
12	14.50	0.0
13	19.50	-0.8
14	18.50	0.0
15	19.50	0.0
16	18.50	0.0
17	18.50	0.0
18	21.50	-0.8
19	23.00	0.0

NOEUD	ALTITUDE (M)	DEBIT (L/S)
20	23.00	0.0
21	20.50	0.0
22	24.00	-0.6
23	22.00	0.0
24	20.00	0.0
25	23.00	-0.3
26	24.00	0.0
27	24.00	-0.9
28	23.00	-0.5
29	23.00	0.0
30	18.50	0.0
31	20.00	0.0
32	14.50	0.0
33	6.00	28.0
34	6.50	0.0
35	12.90	-8.3
36	32.00	-2.2
37	6.50	0.0

NOEUD	ALTITUDE (M)	DEBIT (L/S)
38	18.50	0.0
39	22.00	0.0
40	24.00	0.0
41	24.00	0.0
42	23.00	0.0

La répartition des débits aux noeuds a été définie préalablement à partir d'une étude sur les consommations mesurées in situ.

SIMULATION 1





## CALCUL DES DEBITS

Precision : .50 %

RESULTATS :

Nombre d'iterations : 10

Conduite	Debit ( m3/s )	Vitesse (m/s)	Remarque
1	.0039	.22	*
2	.0039	.32	
3	.0064	.52	
4	.0104	.84	*
5	.0039	.32	*
6	.0104	.84	
7	.0071	.58	*
8	.0042	.54	
9	.0041	.33	
10	.0025	.31	
11	.0015	.30	
12	.0026	.21	
13	.0030	.24	*
14	.0023	.30	*
15	.0006	.05	*
16	.0003	.02	
17	.0000	.01	
18	.0006	.05	*
19	.0006	.05	
20	.0000	.01	
21	.0004	.19	
22	.0009	.07	*
23	.0003	.13	*
24	.0008	.16	*
25	.0001	.01	*
26	.0021	.42	*

27	.0013	.26	
28	.0021	.07	*
29	.0004	.09	
30	.0001	.03	
31	.0002	.05	
32	.0002	.07	
33	.0003	.07	
34	.0002	.07	
35	.0008	.16	*
36	.0005	.11	
37	.0008	.03	*
38	.0007	.13	
39	.0002	.07	*
40	.0004	.18	
41	.0008	.16	
42	.0008	.03	*
43	.0005	.02	*
44	.0001	.08	
45	.0003	.05	
46	.0001	.00	
47	.0280	.57	
48	.0095	1.21	
49	.0113	.92	
50	.0012	.16	
51	.0010	.49	*
52	.0021	.27	
53	.0013	.26	
54	.0005	.17	
55	.0001	.04	*

ATTENTION : \* = Changement de sens .

## CALCUL DES PRESSIONS

Noeud de reference : 33  
 Pression de reference : 44.00 m

## RESULTATS :

Noeud	Cote (m)	Cote piezo (m)	P.Effective (m)
1	8.50	45.26	36.76
2	8.50	45.29	36.79
3	8.50	45.10	36.60
4	9.00	45.18	36.18
5	6.50	48.88	42.38
6	9.50	44.52	35.02
7	11.00	44.38	33.38
8	10.00	43.70	33.70
9	12.50	43.78	31.28
10	15.00	44.21	29.21
11	14.50	43.79	29.29
12	14.50	43.79	29.29
13	19.50	44.21	24.71
14	18.50	43.80	25.30
15	19.50	44.21	24.71
16	18.50	44.45	25.95
17	18.50	45.09	26.59
18	21.50	44.29	22.79

19	23.00	44.28	21.28
20	23.00	44.28	21.28
21	20.50	44.25	23.75
22	24.00	44.26	20.26
23	22.00	44.40	22.40
24	20.00	44.21	24.21
25	23.00	44.04	21.04
26	24.00	44.14	20.14
27	24.00	43.84	19.84
28	23.00	43.93	20.93
29	23.00	43.86	20.86
30	18.50	43.92	25.42
31	20.00	44.23	24.23
32	14.50	43.79	29.29
33	6.00	50.00	44.00
34	6.50	49.35	42.85
35	12.90	45.33	32.43
36	32.00	45.26	13.26
37	6.50	48.19	41.69
38	18.50	45.08	26.58
39	22.00	44.40	22.40
40	24.00	44.14	20.14
41	24.00	43.84	19.84
42	23.00	43.86	20.86

## CALCUL DES PRESSIONS

Noeud de reference : 33  
 Pression de reference : 44.00 m

## RESULTATS :

Noeud	Cote (m)	Cote piezo (m)	P.Effective (m)
1	8.50	45.26	36.76
2	8.50	45.29	36.79
3	8.50	45.10	36.60
4	9.00	45.18	36.18
5	6.50	48.88	42.38
6	9.50	44.52	35.02
7	11.00	44.38	33.38
8	10.00	43.70	33.70
9	12.50	43.78	31.28
10	15.00	44.21	29.21
11	14.50	43.79	29.29
12	14.50	43.79	29.29
13	19.50	44.21	24.71
14	18.50	43.80	25.30
15	19.50	44.21	24.71
16	18.50	44.45	25.95
17	18.50	45.09	26.59
18	21.50	44.29	22.79

19	23.00	44.28	21.28
20	23.00	44.28	21.28
21	20.50	44.25	23.75
22	24.00	44.26	20.26
23	22.00	44.40	22.40
24	20.00	44.21	24.21
25	23.00	44.04	21.04
26	24.00	44.14	20.14
27	24.00	43.84	19.84
28	23.00	43.93	20.93
29	23.00	43.86	20.86
30	18.50	43.92	25.42
31	20.00	44.23	24.23
32	14.50	43.79	29.29
33	6.00	50.00	44.00
34	6.50	49.35	42.85
35	12.90	45.33	32.43
36	32.00	45.26	13.26
37	6.50	48.19	41.69
38	18.50	45.08	26.58
39	22.00	44.40	22.40
40	24.00	44.14	20.14
41	24.00	43.84	19.84
42	23.00	43.86	20.86

Avec isolation.

## CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne (isolant ou conduites) : 30.0  
 Lambda (isolant ou conduites, W/m.deg) : .035000  
 Lambda sol (W/m.deg) : 2.000000  
 Profondeur moyenne (m) : .80  
 Temperature de surface : 0.

Temperatures d'injection :

TI( 33 ) = 57.0

RESULTATS :

Noeud	Temperature ( Des.C )
1	56.5
2	56.6
3	56.4
4	56.4
5	56.8
6	56.4
7	56.3
8	54.3
9	53.0
10	55.6
11	48.1
12	25.8
13	52.5
14	49.7
15	52.6

16	55.5
17	55.8
18	55.2
19	54.3
20	50.1
21	51.4
22	51.8
23	54.5
24	50.0
25	47.6
26	54.0
27	49.1
28	52.1
29	48.1
30	50.0
31	49.6
32	47.4
33	57.0
34	56.8
35	56.8
36	56.0
37	56.8
38	55.8
39	54.5
40	54.0
41	50.8
42	47.9

## CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne (isolant ou conduites) : 10.0  
 Lambda (isolant ou conduites, W/m.deg) : 30.000000  
 Lambda sol (W/m.deg) : 1.800000  
 Profondeur moyenne (m) : .80  
 Temperature de surface : 0.

Temperatures d'Injection :

Ti ( 33 ) = 57.0

RESULTATS :

SANS isolation

Noeud	Temperature ( Deg.C )
1	53.6
2	54.4
3	53.4
4	53.0
5	55.5
6	53.1
7	52.1
8	41.0
9	36.4
10	47.8
11	13.3
12	.0
13	30.2
14	16.9
15	30.0

16	46.0
17	48.4
18	43.8
19	38.0
20	26.0
21	21.2
22	28.6
23	39.8
24	19.9
25	12.7
26	36.4
27	17.7
28	26.7
29	8.3
30	18.4
31	14.7
32	12.9
33	57.0
34	56.2
35	55.5
36	48.6
37	55.8
38	48.5
39	39.9
40	36.5
41	22.9
42	8.2

## NOTES

-Pression effective minimale : 13.26 mCE au noeud 36

-Température minimale : 25.8 °C au noeud 12 (avec isolation)

La simulation suivante a pour but d'augmenter la circulation dans les conduites 18,17,20 et dans la partie sud du réseau afin d'obtenir des températures plus élevées dans ces zones.

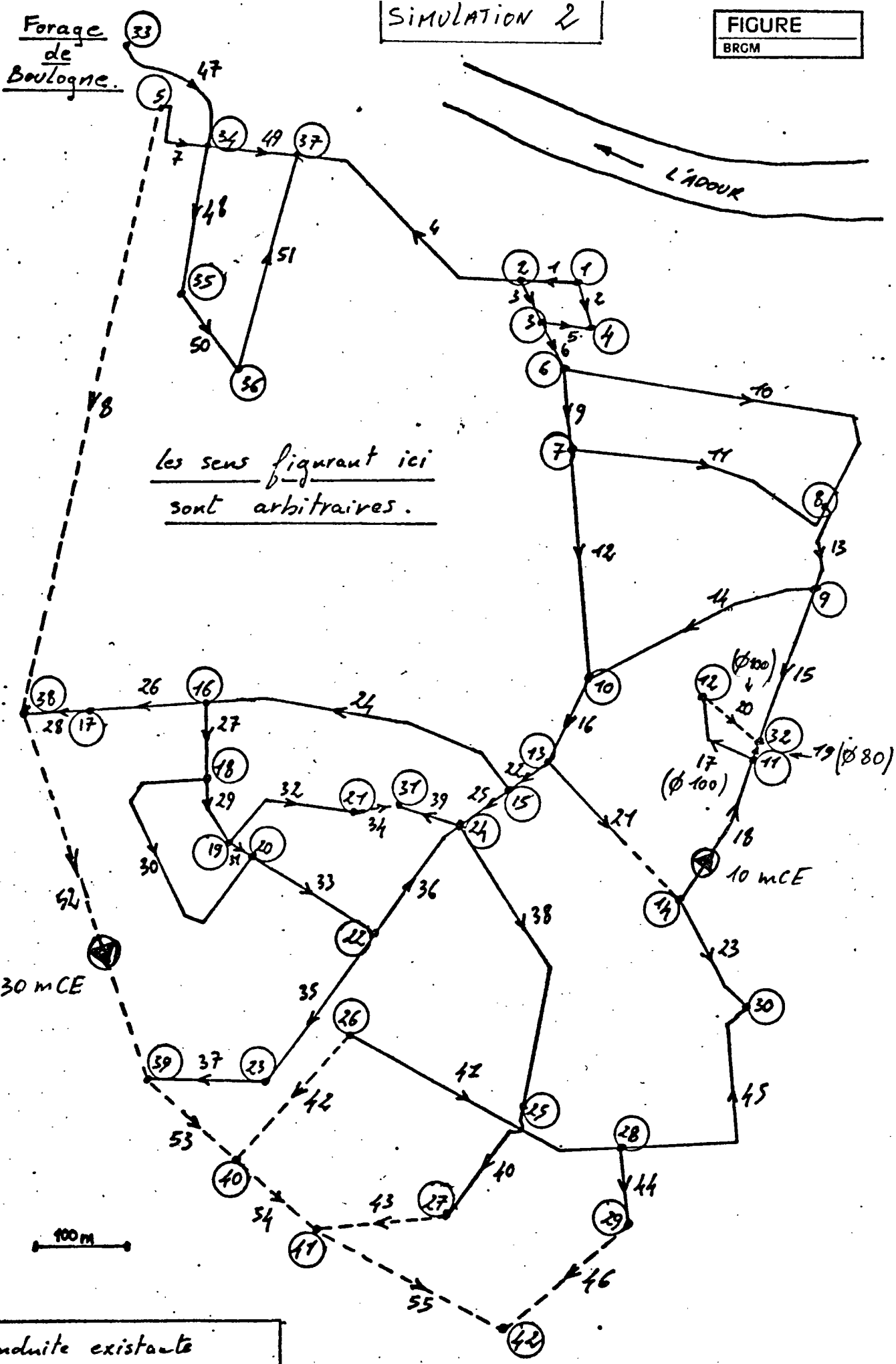


## SIMULATION 2

Les modifications sont les suivantes :

- Conduites 17 et 20 : diamètre 100
- Conduite 19 : diamètre 80
- Surpresseur 10 mCE sur la conduite 18 après rétablissement du sens correct
- Surpresseur 30 mCE sur la conduite 52

Forage de  
Boulogne.



les sens figurant ici  
sont arbitraires.

- Conduite existante
- - - Conduite projetée
- (37) Nœud
- ↗ Conduite

TITRE DE L'ETUDE  
 NUMERO DE LA SIMULATION

: DAX RESTREINT  
 : 2

NOMBRE MAXIMUM DE CONDUITES : 70  
 NOMBRE DE CONDUITES : 55  
 NOMBRE DE NOEUDS : 42  
 NOMBRE DE MAILLES : 14  
 ERREUR : .50  
 ALPHA : 1.970  
 NOEUD DE REFERENCE : 33  
 PRESSION DE REFERENCE : 44.00

Listing de

DONNEES-D

MAILLES (numero - nbre. conduites- num. conduite):

1	4	49	-51	-50	-48												
2	13	7	49	-4	3	6	9	12	16	22	24	26	28	-8			
3	4	-1	2	-5	-3												
4	3	10	-11	-9													
5	4	11	13	14	-12												
6	6	-14	15	-19	-18	-21	-16										
7	3	20	-19	17													
8	3	29	31	-30													
9	9	-28	-26	27	29	31	33	35	37	-52							
10	7	-24	25	39	-34	-32	-29	-27									
11	6	32	34	-39	-36	-33	-31										
12	11	21	23	-45	-41	42	-53	-37	-35	36	-25	-22					
13	8	38	40	43	-54	-53	-37	-35	36								
14	6	41	44	46	-55	-54	-42										

CONDUITES(numero - N.origine - N.final - D. - K - L. - Surp. (mCE) :

1	1	2	150.	.500	60.00	0.00
2	1	4	125.	.500	54.00	0.00
3	2	3	125.	.500	50.00	0.00
4	2	37	125.	.500	300.00	0.00
5	3	4	125.	.500	56.00	0.00
6	3	6	125.	.500	60.00	0.00
7	5	34	125.	.500	100.00	0.00
8	5	38	100.	.500	700.00	0.00
9	6	7	125.	.500	90.00	0.00
10	6	8	100.	.500	444.00	0.00
11	7	8	80.	.500	300.00	0.00
12	7	10	125.	.500	260.00	0.00
13	8	9	125.	.500	100.00	0.00
14	9	10	100.	.500	260.00	0.00
15	9	32	125.	.500	190.00	0.00
16	10	13	125.	.500	100.00	0.00
17	11	12	100.	.500	100.00	0.00
18	14	11	125.	.500	175.00	10.00
19	11	32	80.	.500	10.00	0.00
20	12	32	100.	.500	100.00	0.00
21	13	14	50.	.500	220.00	0.00
22	13	15	125.	.500	60.00	0.00
23	14	30	50.	.500	150.00	0.00
24	15	16	80.	.500	360.00	0.00
25	15	24	125.	.500	70.00	0.00
26	16	17	80.	.500	140.00	0.00
27	16	18	80.	.500	84.00	0.00
28	17	38	200.	.500	1.00	0.00
29	18	19	80.	.500	80.00	0.00
30	18	20	60.	.500	410.00	0.00
31	19	20	80.	.500	24.00	0.00
32	19	21	60.	.500	160.00	0.00
33	20	22	80.	.500	160.00	0.00
34	21	31	60.	.500	100.00	0.00
35	22	23	80.	.500	200.00	0.00
36	22	24	80.	.500	150.00	0.00
37	23	39	200.	.500	1.00	0.00
38	24	25	80.	.500	380.00	0.00
39	24	31	60.	.500	80.00	0.00
40	25	27	50.	.500	120.00	0.00
41	26	28	80.	.500	320.00	0.00
42	26	40	200.	.500	1.00	0.00
43	27	41	200.	.500	1.00	0.00
44	28	29	30.	.500	90.00	0.00
45	28	30	80.	.500	120.00	0.00
46	29	42	200.	.500	1.00	0.00
47	33	34	250.	.500	370.00	0.00
48	34	35	100.	.500	150.00	0.00
49	34	37	125.	.500	100.00	0.00
50	35	36	100.	.500	150.00	0.00
51	36	37	50.	.500	250.00	0.00
52	38	39	100.	.500	500.00	30.00
53	39	40	80.	.500	150.00	0.00
54	40	41	60.	.500	250.00	0.00
55	41	42	40.	.500	200.00	0.00

VECTEUR DES TERMES INDEPENDANTS (Surp.- Debits) :

0.00000	
0.00000	
0.00000	
0.00000	
0.00000	
-10.00000	
0.00000	
0.00000	
-30.00000	8.50
0.00000	8.50
0.00000	9.00
0.00000	6.50
0.00000	9.50
0.00000	11.00
0.00000	10.00
0.00000	12.50
0.00000	15.00
0.00000	14.50
-.00290	14.50
-.00380	19.50
0.00000	18.50
-.00690	19.50
0.00000	18.50
0.00000	18.50
0.00000	21.50
0.00000	23.00
-.00080	23.00
0.00000	20.50
0.00000	24.00
0.00000	22.00
0.00000	20.00
-.00080	23.00
0.00000	24.00
0.00000	24.00
-.00060	23.00
0.00000	18.50
0.00000	20.00
-.00030	14.50
0.00000	6.00
-.00090	6.50
-.00050	12.90
0.00000	32.00
0.00000	6.50
0.00000	18.50
0.00000	22.00
.02800	24.00
0.00000	24.00
-.00830	23.00
-.00220	
0.00000	
0.00000	
0.00000	
-.00000	

## CALCUL DES DEBITS

Precision : .50 %

RESULTATS :

Nombre d'iterations : 10

Conduite	Debit ( m3/s )	Vitesse (m/s)	Remarque	!
1	.0032	.18		*
2	.0032	.26		
3	.0053	.43		
4	.0086	.70		*
5	.0032	.26		*
6	.0086	.70		
7	.0089	.73		*
8	.0060	.77		
9	.0031	.26		
10	.0016	.21		
11	.0010	.19		
12	.0022	.18		
13	.0043	.35		*
14	.0001	.01		*
15	.0042	.35		*
16	.0021	.17		
17	.0012	.15		
18	.0042	.35	Surpresseur: 10.0 mCE	
19	.0030	.60		
20	.0012	.15		
21	.0018	.94		
22	.0005	.04		*
23	.0024	1.22		*
24	.0021	.42		
25	.0027	.22		*
26	.0047	.94		

27	.0026	.52	*
28	.0047	.15	
29	.0028	.56	*
30	.0006	.22	*
31	.0023	.45	*
32	.0005	.19	*
33	.0029	.57	*
34	.0005	.19	*
35	.0061	1.20	*
36	.0026	.51	
37	.0061	.19	*
38	.0006	.13	*
39	.0005	.19	
40	.0009	.47	*
41	.0030	.60	
42	.0030	.10	*
43	.0018	.06	*
44	.0001	.18	
45	.0024	.48	
46	.0001	.00	
47	.0280	.57	
48	.0095	1.21	
49	.0096	.78	
50	.0012	.15	
51	.0010	.51	*
52	.0108	1.37	Surpresseur: 30.0 mCE
53	.0047	.94	
54	.0017	.60	
55	.0001	.10	*

ATTENTION : \* = Changement de sens .

## CALCUL DES PRESSIONS

Noeud de reference : 33  
 Pression de reference : 44.00 m

## RESULTATS :

Noeud.	Cote (m)	Cote piezo (m)	P.Effective (m)
1	8.50	46.50	38.00
2	8.50	46.52	38.02
3	8.50	46.39	37.89
4	9.00	46.44	37.44
5	6.50	48.62	42.12
6	9.50	45.99	36.49
7	11.00	45.91	34.91
8	10.00	45.62	35.62
9	12.50	45.79	33.29
10	15.00	45.79	30.79
11	14.50	46.24	31.74
12	14.50	46.15	31.65
13	19.50	45.75	26.25
14	18.50	36.53	18.03
15	19.50	45.75	26.25
16	18.50	44.12	25.62
17	18.50	41.01	22.51
18	21.50	44.70	23.20

19	23.00	45.33	22.33
20	23.00	45.46	22.46
21	20.50	45.55	25.05
22	24.00	46.79	22.79
23	22.00	53.95	31.95
24	20.00	45.80	25.80
25	23.00	45.95	22.95
26	24.00	50.66	26.66
27	24.00	47.26	23.26
28	23.00	47.74	24.74
29	23.00	47.41	24.41
30	18.50	47.05	28.55
31	20.00	45.68	25.68
32	14.50	46.10	31.60
33	6.00	50.00	44.00
34	6.50	49.35	42.85
35	12.90	45.36	32.46
36	32.00	45.30	13.30
37	6.50	48.52	42.02
38	18.50	41.02	22.52
39	22.00	53.95	31.95
40	24.00	50.66	26.66
41	24.00	47.26	23.26
42	23.00	47.41	24.41

## CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne (isolant ou conduites) : 30.0  
 Lambda (isolant ou conduites, W/m.des) : .035000  
 Lambda sol (W/m.des) : 2.000000  
 Profondeur moyenne (m) : .80  
 Temperature de surface : 0.

Temperatures d'injection :

Ti( 33 ) = 57.0

Avec isolation.

RESULTATS :

Noeud	Temperature ( Des.C )
1	56.4
2	56.5
3	56.4
4	56.3
5	56.8
6	56.3
7	56.1
8	53.2
9	52.4
10	55.3
11	53.2
12	52.8
13	54.4
14	53.5
15	52.8

16	52.3
17	52.2
18	52.6
19	53.1
20	53.7
21	51.7
22	54.0
23	54.1
24	52.9
25	52.6
26	54.0
27	53.0
28	53.5
29	51.8
30	53.2
31	52.4
32	52.9
33	57.0
34	56.8
35	56.8
36	56.0
37	56.8
38	54.4
39	54.1
40	54.0
41	53.0
42	51.8

CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne (isolant ou conduites) : 10.0  
 Lambda (isolant ou conduites, W/m.deg) : 30.000000  
 Lambda sol (W/m.deg) : 1.800000  
 Profondeur moyenne (m) : .80  
 Temperature de surface : 0.

Temperatures d'injection :

TI( 33 ) = 57.0

SANS ISOLATION

RESULTATS :

Noeud	Temperature ( Des.C )
1	53.1
2	54.0
3	52.8
4	52.3
5	55.6
6	52.5
7	51.2
8	34.3
9	30.7
10	46.1
11	33.6
12	31.4
13	41.2
14	34.9
15	32.4

16	29.4
17	28.7
18	30.9
19	33.5
20	36.8
21	25.9
22	38.4
23	39.4
24	33.1
25	29.8
26	38.4
27	32.6
28	35.4
29	22.6
30	34.0
31	29.7
32	32.4
33	57.0
34	56.2
35	55.5
36	48.5
37	55.7
38	40.9
39	39.4
40	38.4
41	32.6
42	22.5



## NOTES

Pression minimale : 13.3 mCE au noeud 36

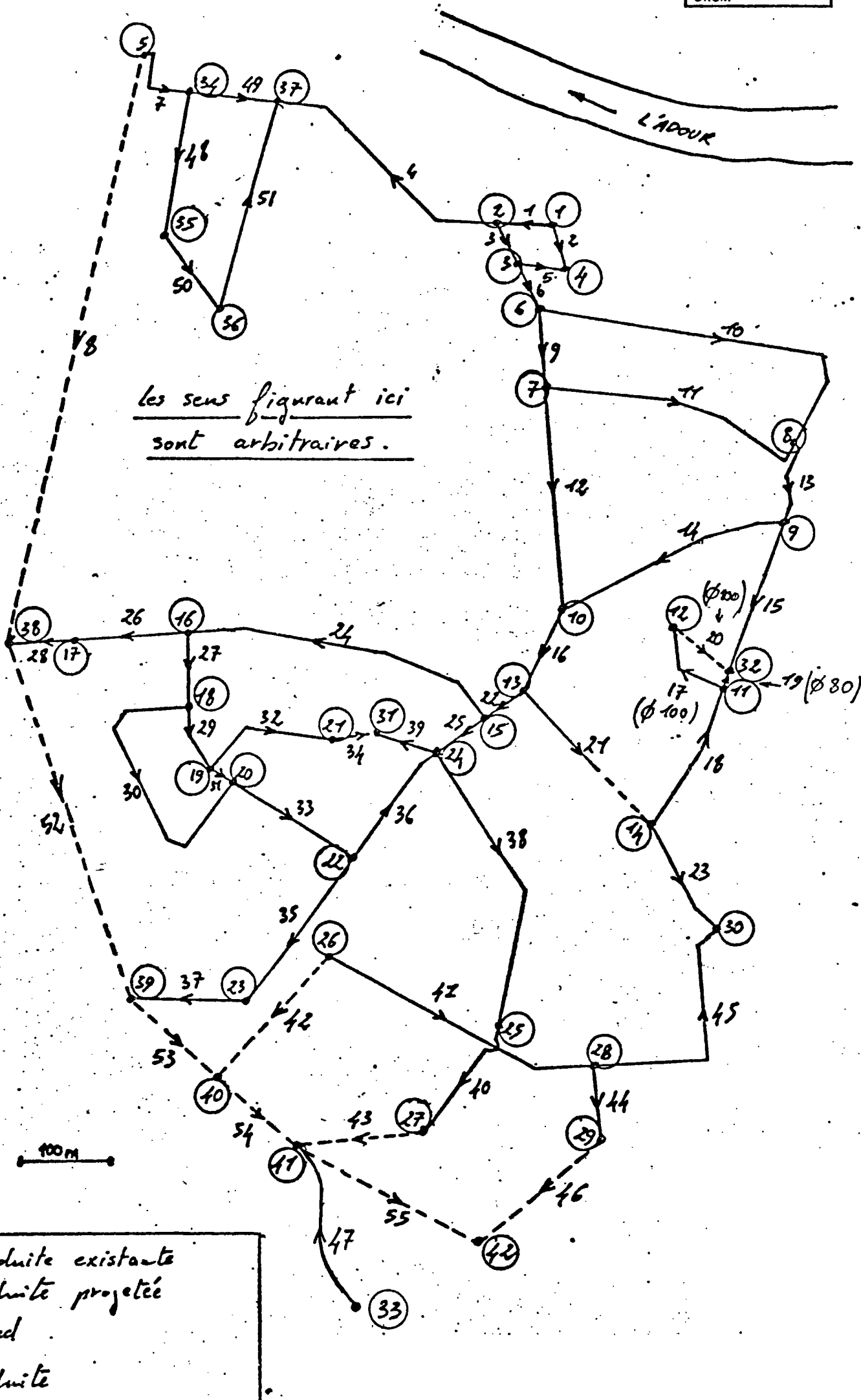
Températures minimum : 51.8 °C et 22.5 °C au noeud 42 (avec et sans isolation)

La simulation suivante a pour d'envisager une nouvelle alimentation au noeud 41.

### SIMULATION 3

Modifications :

- Elimination des surpresseurs
- Alimentation dans la partie sud (conduite 47 : 33-41)





## CALCUL DES DEBITS

Precision : .50 %

RESULTATS :

Nombre d'iterations : 6

Conduite	Debit ( m <sup>3</sup> /s )	Vitesse ( m/s )	Remarque
1	.0027	.15	
2	.0027	.22	*
3	.0045	.36	*
4	.0072	.58	
5	.0027	.22	
6	.0072	.58	*
7	.0033	.27	
8	.0062	.79	*
9	.0088	.72	*
10	.0021	.27	*
11	.0003	.05	
12	.0091	.74	*
13	.0087	.71	*
14	.0040	.51	*
15	.0047	.38	*
16	.0132	1.07	*
17	.0013	.17	
18	.0047	.38	
19	.0034	.67	
20	.0013	.17	
21	.0008	.43	
22	.0148	1.21	*
23	.0039	1.97	*
24	.0015	.29	*
25	.0133	1.09	*
26	.0003	.05	*

27	.0012	.24	*
28	.0003	.01	*
29	.0016	.33	*
30	.0004	.13	*
31	.0018	.35	*
32	.0001	.05	
33	.0021	.43	*
34	.0001	.05	
35	.0051	1.02	*
36	.0024	.47	
37	.0051	.16	*
38	.0108	2.16	*
39	.0001	.05	*
40	.0111	5.67	*
41	.0016	.31	
42	.0016	.05	*
43	.0120	.38	*
44	.0028	3.93	*
45	.0039	.77	
46	.0028	.09	*
47	.0280	.57	
48	.0093	1.19	
49	.0060	.49	*
50	.0010	.13	
51	.0012	.59	*
52	.0065	.83	*
53	.0116	2.31	*
54	.0132	4.66	*
55	.0028	2.21	

ATTENTION : \* = Changement de sens .

## CALCUL DES PRESSIONS

Noeud de reference : 33  
 Pression de reference : 44.00 m

## RESULTATS :

Noeud	Cote (m)	Cote piezo (m)	P.Effective (m)
1	8.50	-174.65	-183.15
2	8.50	-174.67	-183.17
3	8.50	-174.58	-183.08
4	9.00	-174.62	-183.62
5	6.50	-176.30	-182.80
6	9.50	-174.30	-183.80
7	11.00	-173.66	-184.66
8	10.00	-173.68	-183.68
9	12.50	-173.55	-186.05
10	15.00	-172.28	-187.28
11	14.50	-173.05	-187.55
12	14.50	-173.11	-187.61
13	19.50	-170.73	-190.23
14	18.50	-172.70	-191.20
15	19.50	-168.82	-188.32
16	18.50	-168.03	-186.53
17	18.50	-168.16	-186.66
18	21.50	-167.90	-189.40

19	23.00	-167.69	-190.69
20	23.00	-167.61	-190.61
21	20.50	-167.70	-188.20
22	24.00	-167.01	-191.01
23	22.00	-161.88	-183.88
24	20.00	-167.71	-187.71
25	23.00	-124.92	-147.92
26	24.00	-142.50	-166.50
27	24.00	49.34	25.34
28	23.00	-143.88	-166.88
29	23.00	-12.91	-35.91
30	18.50	-145.65	-164.15
31	20.00	-167.70	-187.70
32	14.50	-173.17	-187.67
33	6.00	50.00	44.00
34	6.50	-176.40	-182.90
35	12.90	-180.26	-193.16
36	32.00	-180.31	-212.31
37	6.50	-176.07	-182.57
38	18.50	-168.16	-186.66
39	22.00	-161.88	-183.88
40	24.00	-142.50	-166.50
41	24.00	49.35	25.35
42	23.00	-12.91	-35.91

## NOTES

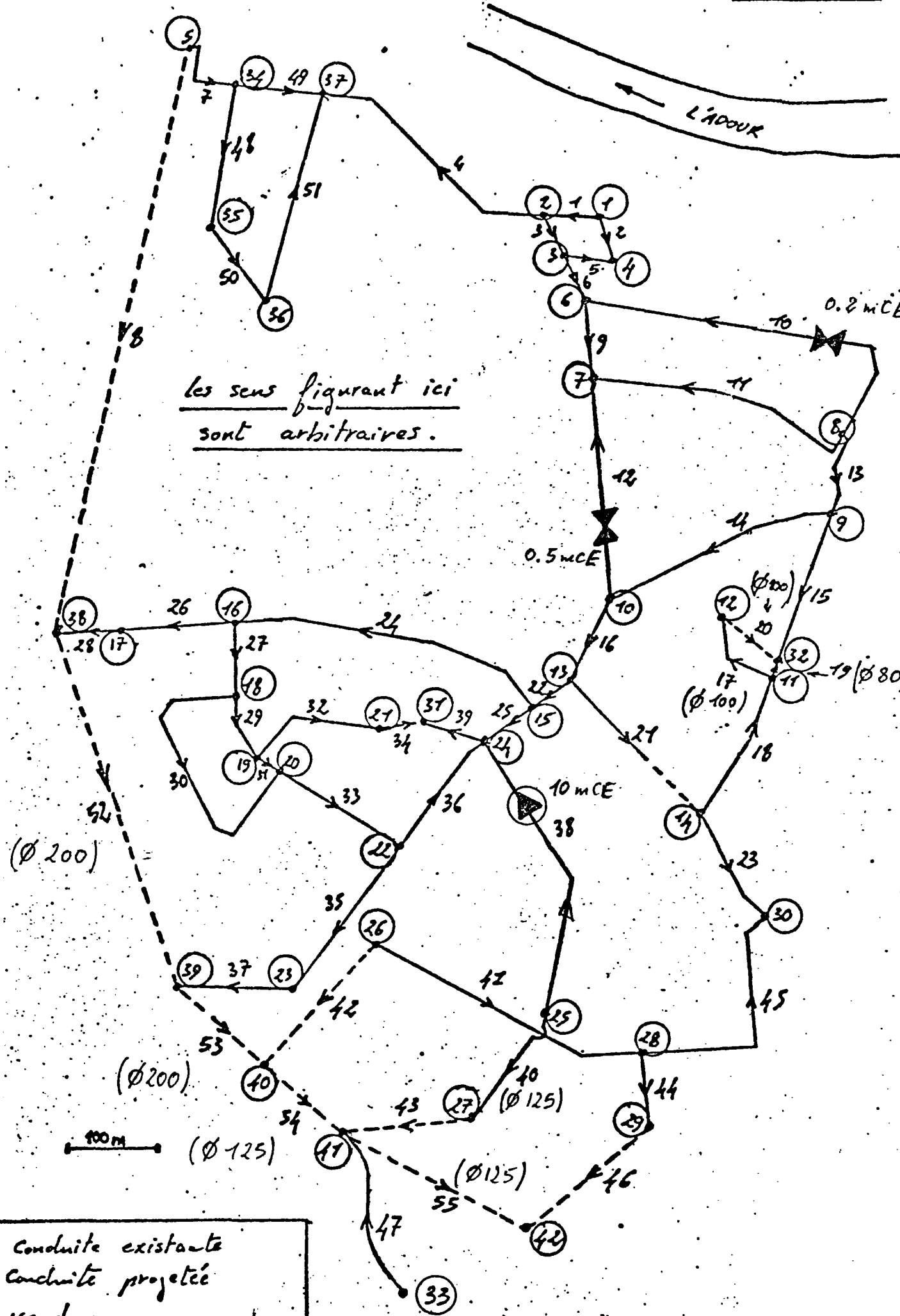
Les tres faibles pressions (négatives donc sans valeurs pratiques pour la pression de référence données) sont dues ici à des diamètres trop faibles pour les conduites proches de la nouvelle alimentation (noeud 41).



## SIMULATION 4

### Modifications :

- Rétablissement du sens pour les conduites 10,11,12 et 38
- Vannes sur 10 (0.2 mCE) et sur 12 (0.5 mCE)
- Surpresseur sur 38 (10mCE)
- Augmentation du diamètre des conduites 52(200mm),53(200mm)  
54(125mm),55(125mm) et 40(125mm)



	Conduite existante
	Conduite projetée
	Nœud
	Conduite

Listing de  
DONNEES-D

TITRE DE L'ETUDE : DAX RESTREINT  
 NUMERO DE LA SIMULATION : 4  
 NOMBRE MAXIMUM DE CONDUITES : 70  
 NOMBRE DE CONDUITES : 55  
 NOMBRE DE NOEUDS : 42  
 NOMBRE DE MAILLES : 14  
 ERREUR : .50  
 ALPHA : 1.970  
 NOEUD DE REFERENCE : 33  
 PRESSION DE REFERENCE : 44.00

MAILLES (numero - nbre. conduites- num. conduite):

1	4	49	-51	-50	-48										
2	13	7	49	-4	3	6	9	-12	16	22	24	26	28	-8	
3	4	-1	2	-5	-3										
4	3	-10	11	-9											
5	4	-11	13	14	12										
6	6	-14	15	-19	-18	-21	-16								
7	3	20	-19	17											
8	3	29	31	-30											
9	9	-28	-26	27	29	31	33	35	37	-52					
10	7	-24	25	39	-34	-32	-29	-27							
11	6	32	34	-39	-36	-33	-31								
12	11	21	23	-45	-41	42	-53	-37	-35	36	-25	-22			
13	8	-38	40	43	-54	-53	-37	-35	36						
14	6	41	44	46	-55	-54	-42								

CONDUITES(numero - N.origine - N.final - D. - K - L. - Supp. (mCE) :

1	1	2	150.	.500	60.00	0.00
2	1	4	125.	.500	54.00	0.00
3	2	3	125.	.500	50.00	0.00
4	2	37	125.	.500	300.00	0.00
5	3	4	125.	.500	56.00	0.00
6	3	6	125.	.500	60.00	0.00
7	5	34	125.	.500	100.00	0.00
8	5	38	100.	.500	700.00	0.00
9	6	7	125.	.500	90.00	0.00
10	8	6	100.	.500	444.00	-.20
11	8	7	80.	.500	300.00	0.00
12	10	7	125.	.500	260.00	-.50
13	8	9	125.	.500	100.00	0.00
14	9	10	100.	.500	260.00	0.00
15	9	32	125.	.500	190.00	0.00
16	10	13	125.	.500	100.00	0.00
17	11	12	100.	.500	100.00	0.00
18	14	11	125.	.500	175.00	0.00
19	11	32	80.	.500	10.00	0.00
20	12	32	100.	.500	100.00	0.00
21	13	14	50.	.500	220.00	0.00
22	13	15	125.	.500	60.00	0.00
23	14	30	50.	.500	150.00	0.00
24	15	16	80.	.500	360.00	0.00
25	15	24	125.	.500	70.00	0.00
26	16	17	80.	.500	140.00	0.00
27	16	18	80.	.500	84.00	0.00
28	17	38	200.	.500	1.00	0.00
29	18	19	80.	.500	80.00	0.00
30	18	20	60.	.500	410.00	0.00
31	19	20	80.	.500	24.00	0.00
32	19	21	60.	.500	160.00	0.00
33	20	22	80.	.500	160.00	0.00
34	21	31	60.	.500	100.00	0.00
35	22	23	80.	.500	200.00	0.00
36	22	24	80.	.500	150.00	0.00
37	23	39	200.	.500	1.00	0.00
38	25	24	80.	.500	380.00	10.00
39	24	31	60.	.500	80.00	0.00
40	25	27	125.	.500	120.00	0.00
41	26	28	80.	.500	320.00	0.00
42	26	40	200.	.500	1.00	0.00
43	27	41	200.	.500	1.00	0.00
44	28	29	30.	.500	90.00	0.00
45	28	30	80.	.500	120.00	0.00
46	29	42	200.	.500	1.00	0.00
47	33	41	250.	.500	370.00	0.00
48	34	35	100.	.500	150.00	0.00
49	34	37	125.	.500	100.00	0.00
50	35	36	100.	.500	150.00	0.00
51	36	37	50.	.500	250.00	0.00
52	38	39	200.	.500	500.00	0.00
53	39	40	200.	.500	150.00	0.00
54	40	41	120.	.500	250.00	0.00
55	41	42	120.	.500	200.00	0.00

VECTEUR DES TERMES INDEPENDANTS (Supp. - Debits) :

0.00000	
.50000	
0.00000	
.20000	
-.50000	
0.00000	
0.00000	8.50
0.00000	8.50
0.00000	8.50
0.00000	9.00
0.00000	6.50
0.00000	9.50
-10.00000	11.00
0.00000	10.00
0.00000	12.50
0.00000	15.00
0.00000	14.50
0.00000	14.50
-.00290	19.50
-.00380	18.50
0.00000	19.50
-.00690	18.50
0.00000	18.50
0.00000	21.50
0.00000	23.00
0.00000	23.00
-.00080	20.50
0.00000	24.00
0.00000	22.00
0.00000	20.00
0.00000	23.00
-.00080	24.00
0.00000	24.00
0.00000	23.00
0.00000	23.00
-.00060	18.50
0.00000	20.00
0.00000	14.50
-.00030	6.00
0.00000	6.50
-.00090	12.90
-.00050	32.00
0.00000	6.50
0.00000	18.50
0.00000	22.00
0.00000	24.00
.02800	24.00
0.00000	23.00
-.00830	
-.00220	
0.00000	
0.00000	
0.00000	
-.00000	

## CALCUL DES DEBITS

Precision : .50 %

RESULTATS :

Nombre d'iterations : 7

Conduite	Debit ( m <sup>3</sup> /s )	Vitesse (m/s)	Remarque
1	.0022	.12	
2	.0022	.18	*
3	.0036	.29	*
4	.0058	.47	
5	.0022	.18	
6	.0058	.47	*
7	.0047	.39	
8	.0076	.97	*
9	.0081	.66	*
10	.0014	.18	Vanne : -.2 mCE
11	.0004	.09	*
12	.0086	.70	Vanne : -.5 mCE
13	.0079	.64	*
14	.0047	.60	*
15	.0032	.26	*
16	.0133	1.08	*
17	.0009	.12	
18	.0032	.26	
19	.0023	.45	
20	.0009	.12	
21	.0010	.52	
22	.0151	1.23	*
23	.0022	1.10	*
24	.0028	.56	*
25	.0123	1.00	*
26	.0044	.87	*

27	.0016	.31	
28	.0044	.14	*
29	.0006	.13	
30	.0001	.04	
31	.0004	.07	*
32	.0010	.35	
33	.0002	.05	*
34	.0010	.35	
35	.0041	.82	*
36	.0033	.66	
37	.0041	.13	*
38	.0080	1.59	Surpresseur: 10.0 mCE
39	.0010	.35	*
40	.0083	.68	*
41	.0019	.38	
42	.0019	.06	*
43	.0092	.29	*
44	.0008	1.07	*
45	.0022	.43	
46	.0008	.02	*
47	.0280	.57	
48	.0094	1.19	
49	.0046	.38	*
50	.0011	.13	
51	.0011	.58	*
52	.0120	.38	*
53	.0161	.51	*
54	.0180	1.60	*
55	.0008	.07	

ATTENTION : \* = Changement de sens .

## CALCUL DES PRESSIONS

Noeud de reference : 33  
 Pression de reference : 44.00 m

## RESULTATS :

Noeud	Cote (m)	Cote piezo (m)	P.Effective (m)
1	8.50	28.33	19.83
2	8.50	28.32	19.82
3	8.50	28.38	19.88
4	9.00	28.36	19.36
5	6.50	27.42	20.92
6	9.50	28.57	19.07
7	11.00	29.11	18.11
8	10.00	28.85	18.85
9	12.50	29.57	17.07
10	15.00	31.28	16.28
11	14.50	29.81	15.31
12	14.50	29.78	15.28
13	19.50	32.86	13.36
14	18.50	29.97	11.47
15	19.50	34.14	14.64
16	18.50	36.94	18.44
17	18.50	39.55	21.05
18	21.50	36.73	15.23

19	23.00	36.70	13.70
20	23.00	36.70	13.70
21	20.50	35.95	15.45
22	24.00	36.70	12.70
23	22.00	40.09	18.09
24	20.00	35.09	15.09
25	23.00	48.60	25.60
26	24.00	40.38	16.38
27	24.00	49.35	25.35
28	23.00	39.16	16.16
29	23.00	49.33	26.33
30	18.50	38.59	20.09
31	20.00	35.47	15.47
32	14.50	29.75	15.25
33	6.00	50.00	44.00
34	6.50	27.21	20.71
35	12.90	23.35	10.45
36	32.00	23.29	-8.71
37	6.50	27.41	20.91
38	18.50	39.55	21.05
39	22.00	40.09	18.09
40	24.00	40.38	16.38
41	24.00	49.35	25.35
42	23.00	49.33	26.33

## CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne (isolant ou conduites) : 30.0  
 Lambda (isolant ou conduites, W/m.deg) : .035000  
 Lambda sol (W/m.deg) : 2.000000  
 Profondeur moyenne (m) : .80  
 Temperature de surface : 0.

Temperatures d'injection :

TI( 33 ) = 57.0

AVEC ISOLATION

RESULTATS :

Noeud	Temperature ( Des.C )
1	54.8
2	54.9
3	55.1
4	55.0
5	55.7
6	55.2
7	55.7
8	54.7
9	54.9
10	55.9
11	54.8
12	54.2
13	55.9
14	55.1
15	55.9

16	56.1
17	56.3
18	55.8
19	53.3
20	50.2
21	52.7
22	56.4
23	56.7
24	56.1
25	56.7
26	56.7
27	56.8
28	55.6
29	55.1
30	55.4
31	52.4
32	54.4
33	57.0
34	55.0
35	54.9
36	54.0
37	54.5
38	56.3
39	56.7
40	56.8
41	56.8
42	55.1

## CALCUL DES TEMPERATURES

Epaisseur moyenne (isolant ou conduites) : 10.0  
 Lambda (isolant ou conduites, W/m.deg) : 30.000000  
 Lambda sol (W/m.deg) : 2.000000  
 Profondeur moyenne (m) : .80  
 Temperature de surface : 0.

Temperatures d'Injection :

TI( 33 ) = 57.0

SANS isolation

RESULTATS :

Noeud	Temperature ( Des.C )
1	41.7
2	42.2
3	43.8
4	42.7
5	48.1
6	44.2
7	47.2
8	40.3
9	41.6
10	48.6
11	39.1
12	35.4
13	48.9
14	41.2
15	49.1

16	50.8
17	52.3
18	48.5
19	34.9
20	20.7
21	30.7
22	52.5
23	54.8
24	50.2
25	55.3
26	55.3
27	56.1
28	45.6
29	43.5
30	43.5
31	28.3
32	37.0
33	57.0
34	43.3
35	42.6
36	35.6
37	40.1
38	52.3
39	54.8
40	55.4
41	56.1
42	43.6



## NOTES

La pression encore trop faible au noeud 36 nécessiterait la mise en place d'un surpresseur sur cette dérivation.

Températures minimales : 50.2 °C et 20.7 °C au noeud 20 (avec et sans isolation)

On note donc dans ce cas une remarquable homogénéité des températures.