



**HAL**  
open science

# Calage automatique du réseau de Montreuil: Estimation de la modulation de la consommation globale et de la rugosité des conduites pour deux campagnes de mesures

Olivier Piller

## ► To cite this version:

Olivier Piller. Calage automatique du réseau de Montreuil: Estimation de la modulation de la consommation globale et de la rugosité des conduites pour deux campagnes de mesures. [Rapport de recherche] Cemagref. 1998, pp.53. hal-03317838

**HAL Id: hal-03317838**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03317838>**

Submitted on 7 Aug 2021

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

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



LA RECHERCHE POUR L'INGENIERIE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Département Equipements  
pour l'Eau et l'Environnement

Division Ouvrages et Réseaux  
Hydrauliques



# CALAGE AUTOMATIQUE DU RESEAU DE MONTREUIL

**Estimation de la modulation de la consommation globale  
et de la rugosité des conduites pour deux campagnes de mesures**

*Olivier PILLER*

Groupement de Bordeaux

50, Avenue de Verdun  
33612 CESTAS Cedex  
Tél. 05 5789 08 00 - Fax 05 57 89 08 01

Novembre 1998

## 1. INTRODUCTION

L'objectif est ici d'étudier et de rendre compte de la facilité de mise en œuvre des algorithmes de calage automatiques mis au point lors de la thèse d'O. PILLER.

Les objectifs sont fixés par la convention du 27/02/97 entre d'une part le CEMAGREF<sup>1</sup> d'autre part le SEDIF<sup>2</sup> et la CGE<sup>3</sup>.

Les résultats du calage hydraulique portent sur le réseau de la deuxième élévation de Romainville, situé sur la banlieue Est de Paris dans le département de Seine Saint-Denis. Ce réseau est géré par La CGE, pour le compte du SEDIF.

Sur cette partie du réseau, la consommation moyenne est d'environ 40000 m<sup>3</sup>/jour. L'usine de production d'eau potable de Montreuil capte les eaux de la Marne et alimente les deux réservoirs de Romainville qui assurent l'alimentation de l'ensemble du réseau et le réservoir des Lilas où des prélèvements par pompage sont réalisés vers une élévation supérieure. Le réservoir de Tillemont est isolé pendant les campagnes de mesures.

Les rugosités et la consommation globale ont été calées sur les données de deux campagnes de mesure. La première correspond à la configuration normale du réseau ; elle s'est déroulée du vendredi 21/06/96 6h00 au mardi 25/06/96 6h00. Pour la seconde qui se tenait du vendredi 05/07/96 6h00 au mardi 09/07/96 6h00, une sectorisation (i.e. : la fermeture de vannes sur le réseau) est envisagée pour augmenter les pertes de charges sur le réseau et faciliter ainsi le calage des rugosités.

Douze capteurs de pression, et treize débit-mètres sont installés pour toutes les campagnes de mesure. Les productions au niveau des réservoirs et de l'usine sont également mesurées.

---

<sup>1</sup> Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement.

<sup>2</sup> Syndicat des Eaux d'Ile de France.

<sup>3</sup> Groupe VIVENDI, secteur Environnement, Compagnie Générale des Eaux.

## 2. DESCRIPTION DES INCONNUES

### 2.1. Les classes de rugosités

La nature du matériau, la date de pose (avant 1945 ou non) et le diamètre intérieur (supérieur ou non à 100 mm) servent de critères pour ranger les tronçons dans plusieurs classes ou ensembles de même rugosité. Toutes les conduites d'une même classe sont supposées avoir même rugosité. C'est pour cette simplification de la réalité que l'on cherchera à déterminer la rugosité "moyenne" de chaque classe de rugosité en se rapprochant au mieux de valeurs observées lors d'une campagne de mesure.

Dix classes de rugosités sont ainsi initialement formées (cf. tableau 1). Les coefficients d'Hazen-Williams et la correspondance en mm pour Colebrook sont ici donnés à titre indicatif.

Le suffixe "a" (resp. "b") pour un matériau abrégé désigne un tronçon d'un diamètre intérieur inférieur ou égal à 100 mm (resp. > 100mm). En absence de suffixes, on ne fait pas la distinction entre petits et grands diamètres.

On peut remarquer que la classe de plus forte rugosité est celle des conduites en fonte non revêtue, posées avant 1945 et de diamètre inférieur ou égal à 100 mm.

Matériau	MAT	Effectifs	Rugosité en mm	Chw	Code Wporteur	Classe
		0	5.00	62		
Fonte non revêtue posée avant 1945	F1a	970	2.00	95	1	1
Fonte non revêtue posée avant 1945	F1b	205	1.20	104		1
Fonte non revêtue posée après 1945	F2a	491	1.00	106	2	1
Fonte non revêtue posée après 1945	F2b	213	0.60	114		2
		0	0.50	116	3	
Acier revêtu	ARa	2	0.46	118		2
Fonte revêtu	FRa	631	0.45	119		2
Acier revêtu	ARb	7	0.36	123		2
Fonte revêtu	FRb	612	0.35	124		2
Bonna	BO	62	0.34	124		2
		0	0.25	130	4	
PVC ou PEHD	PV	345	0.10	136	5	2
		0	0.05	141	6	
		0	0.03	145	7	
	indet	0	0.00	147	8	
		3538				

**tableau 1** : description des classes de rugosités

Il s'est avéré cependant nécessaire de regrouper ces dix classes pour ne former plus que deux classes : une première classe de rugosité constituée des matériaux F1a, F1b et F2a correspondant à une rugosité moyenne supérieure à 1 mm et une seconde classe constituée des matériaux F2b, AR, FR, BO et PV de rugosité moyenne inférieure à 0.6 mm.

Il faut incriminer pour cela le manque de représentabilité de certaines classes de conduite : AR seulement 9 conduites et l'emplacement des mesures qui ne permet pas par exemple de caler le matériau PVC et les matériaux de petits diamètres.

Le tableau n°2, page suivante, donne l'importance et la proportion de chaque type de conduite par rapport au linéaire total du réseau.

Les diamètres varient entre 38.8 mm et 800mm. On trouve 43 types de conduites différentes. Les conduites de diamètre inférieur ou égal à 100mm représentent environ 57% du linéaire du réseau.

Matériau	Diamètre (mm)	Rugosité Colebrook-Hazen W.	longueur (m)	Pourcentage %	Nombre de tronçons
ARa	100.0	0.100 - 136.0	31	0.01	2
ARb	200.0	0.100 - 136.0	76	0.03	1
ARb	250.0	0.100 - 136.0	229	0.08	3
ARb	300.0	0.100 - 136.0	129	0.05	3
BOb	500.0	0.100 - 136.0	3,077	1.12	17
BOb	600.0	0.100 - 136.0	4,208	1.53	27
BOb	700.0	0.100 - 136.0	835	0.30	4
BOb	800.0	0.100 - 136.0	1,824	0.66	14
F2b	150.0	0.100 - 136.0	11,793	4.29	138
F2b	200.0	0.100 - 136.0	3,924	1.43	44
F2b	250.0	0.100 - 136.0	182	0.07	2
F2b	300.0	0.100 - 136.0	1,524	0.55	19
F2b	350.0	0.100 - 136.0	124	0.05	3
F2b	400.0	0.100 - 136.0	763	0.28	7
FRa	60.0	0.100 - 136.0	73	0.03	4
FRa	80.0	0.100 - 136.0	174	0.06	6
FRa	100.0	0.100 - 136.0	39,323	14.32	621
FRb	125.0	0.100 - 136.0	109	0.04	1
FRb	150.0	0.100 - 136.0	10,745	3.91	159
FRb	200.0	0.100 - 136.0	13,798	5.02	201
FRb	250.0	0.100 - 136.0	1,415	0.52	21
FRb	300.0	0.100 - 136.0	13,880	5.05	184
FRb	400.0	0.100 - 136.0	5,936	2.16	46
PVa	38.8	0.100 - 136.0	4,778	1.74	56
PVa	48.8	0.100 - 136.0	956	0.35	16
PVa	90.0	0.100 - 136.0	1,471	0.54	14
PVa	100.0	0.100 - 136.0	152	0.06	7
PVb	102.2	0.100 - 136.0	16,071	5.85	229
PVb	139.8	0.100 - 136.0	404	0.15	7
PVb	150.0	0.100 - 136.0	12	0.00	2
PVb	200.0	0.100 - 136.0	48	0.02	8
PVb	300.0	0.100 - 136.0	36	0.01	6
F1a	40.0	2.000 - 95.0	78	0.03	2
F1a	60.0	2.000 - 95.0	5,181	1.89	78
F1a	80.0	2.000 - 95.0	12,085	4.40	182
F1a	100.0	2.000 - 95.0	59,783	21.77	708
F1b	135.0	2.000 - 95.0	327	0.12	3
F1b	150.0	2.000 - 95.0	9,589	3.49	100
F1b	200.0	2.000 - 95.0	3,916	1.43	43
F1b	300.0	2.000 - 95.0	7,143	2.60	59
F2a	60.0	2.000 - 95.0	454	0.17	10
F2a	80.0	2.000 - 95.0	697	0.25	16
F2a	100.0	2.000 - 95.0	37,263	13.57	465
			<b>274,617</b>	<b>100.00</b>	<b>3,538</b>

**tableau 2 : typologie des arcs du réseau**

## 2.2. Les classes de demandes

Pour le réseau de Romainville, on peut ranger chaque type de consommation dans l'une des huit grandes classes de demandes décrites dans le tableau 3. Pour chacune d'elle, on trouve en colonne deux (volume facturé) le pourcentage de la consommation totale, les fuites n'étant pas prises en compte. Si l'on part de l'hypothèse que les fuites représentent 14% du volume distribué total (donc un débit de fuite d'environ 235 m<sup>3</sup>/h pour un volume journalier de 40000 m<sup>3</sup>), on obtient alors le décompte de la colonne trois.

<b>type</b>	<b>%Volume facturé</b>	<b>Conso%</b>
<b>Domestiques individuels</b>	15	13
<b>Domestiques collectifs</b>	62	53
<b>Bureaux, administrations, écoles</b>	3	3
<b>Hôpitaux, cliniques, Dispensaires</b>	2	2
<b>Industries</b>	4	3
<b>Commerces</b>	7	6
<b>Gros consommateurs piscines, golfs, stades</b>	7	6
<b>Fuites</b>	0	14
	100	100

**tableau 3** : description des classes de demande

En fait, la modélisation de la consommation s'est faite sur la base des trois types de consommateurs ou classes de demandes suivants :

- Les gros consommateurs représentent des consommations ponctuelles mesurées sur toute la période des mesures.
- Les fuites sont supposées modélisées correctement suivant deux modes de répartition. Les fichiers d'extension `_dom` décrivent des fuites au prorata de la consommation domestique et les fichiers d'extension `_len` des fuites au prorata de la longueur en privilégiant les conduites de diamètre inférieur à 150 mm.
- La dernière classe de demande regroupe l'ensemble des six premiers types du tableau 3 avec pour l'essentiel des domestiques collectifs. Le débit moyen pour chaque consommation de ce type est donné. Il est, par exemple, obtenu à partir d'un volume journalier moyen. Les consommations d'une même classe d'abonnés sont supposées être proportionnelles et évoluer dans le temps de la même façon. On représente ainsi un comportement moyen. On cherche alors, un même coefficient multiplicateur par pas de temps d'un quart-d'heure pour l'ensemble de toutes les consommations globales. Pour

une journée, il y aura donc 96 coefficients multiplicateurs à déterminer. Nous appellerons ces coefficients : coefficients de modulation de la demande.

### **2.3. Nombre des inconnus**

Pour une campagne de mesure de quatre jours, il y aura donc deux inconnues rugosités (un par classe de rugosité) et 384 coefficients de modulation de la demande, ces derniers évoluant dans le temps.

### **2.4. Observabilité**

On dira qu'il y a observabilité du réseau si le jeu de mesure permet de déterminer l'ensemble des inconnues rugosités et demande. Dans l'affirmative, on disposera donc d'une estimation ponctuelle de chacune des inconnues. Il sera également nécessaire de donner la précision de l'estimation.

## **3. REPRESENTATION DU RESEAU ET MODELISATION**

Il est utile de préciser la nature du calcul hydraulique puisque des rugosités et des demandes sont estimées en rapprochant des valeurs mesurées de débit ou de pression avec des valeurs calculées.

### **3.1. Sur le calcul hydraulique**

Le logiciel Zomayet<sup>4</sup> qui tourne sous windows à l'aide du module graphique Wporteur prend en compte les développements les plus récents pour la résolution des équations d'équilibrage hydraulique. Explicitons brièvement les principes de son moteur de calcul.

---

<sup>4</sup> Cemagref, logiciels Porteau, Opointe et Zomayet, division Ouvrages et Réseaux Hydrauliques, Bordeaux.

A partir d'une estimation des rugosités dans les conduites et de la loi de la demande, on détermine les débits dans tous les arcs et les charges (hauteur de pression + cote sol) pour satisfaire l'ensemble des équations d'équilibrage hydraulique :

### Conservation de la masse :

La somme des débits entrant en un noeud est égale à la somme des débits qui en sortent. Sur l'exemple du schéma 1, on écrit alors :

$$q_3 + q_4 + q_7 = d_3 \quad (1)$$

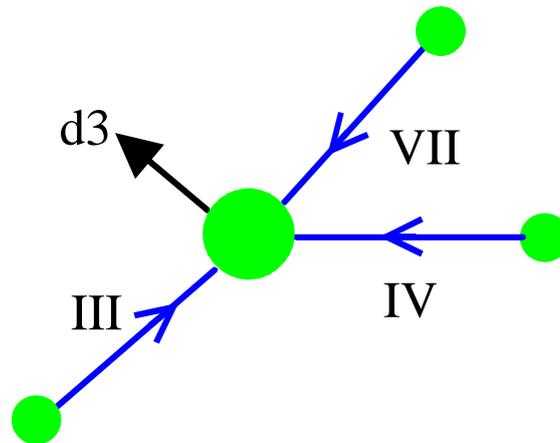


schéma 1 : bilan massique

### Conservation de l'énergie :

La différence d'énergie entre les deux extrémités d'un même arc s'explique par la perte de charge due aux frottements.

$$\xi_4 = h_3 - h_7 \quad (2)$$

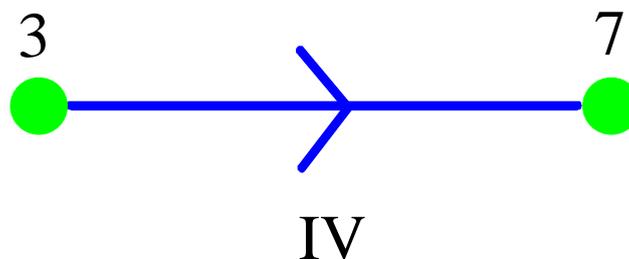


schéma 2 : bilan énergétique

### **L'équation d'état ou la loi de comportement :**

Il s'agit d'une loi empirique reliant le débit à la perte de charge. Sur le schéma 2, la résistance  $r_4$  tient compte de la rugosité.

$$\xi_4 = r_4 \cdot q_4 \cdot |q_4|^\alpha \quad (3)$$

Si l'on adopte la loi d'Hazen-Williams,  $\alpha$  vaut 0.852.

La résolution du système d'équations non linéaires (1) (2), (3), passe par une mise sous la forme d'un problème de minimisation d'énergie. On résout alors par un algorithme de descente du type Newton (pour la description et la comparaison avec les autres algorithmes voir Piller, 1995).

### **3.2. Spécificités au calcul ZOMAYET**

Des différences de modélisation existent entre le logiciel Zomayet et le logiciel SWS<sup>5</sup> avec lequel la CGE avait représenté le réseau de deuxième élévation de Romainville. Décrivons-les :

#### **3.2.1. Sur la nature des noeuds**

Le logiciel Zomayet classe les noeuds en trois types de noeuds : les noeuds réservoirs, les plans d'eau et les noeuds ordinaires. Les réservoirs sont des noeuds à charge fixée (ACF) pour lesquels la cote de l'eau est connue en début de simulation puis calculée par le logiciel. Pour les plans d'eau, la cote de l'eau est fixe pour toute la durée de la simulation. La charge des noeuds ordinaires est recalculée pour chaque période. C'est une fonction de la demande, et du plan piézométrique fixé par les réservoirs et les plans d'eau.

La gestion des réservoirs est donc différente de Stoner pour laquelle on dispose de tronçons réservoirs. Sous Wpoteau les réservoirs sont mis en antenne et la perte de charge singulière résultant d'un changement de diamètre est mise sur un tronçon de petite longueur et du bon diamètre.

---

<sup>5</sup> Stoner Workstation Service, logiciel développé par la société Stoner Associate, basée en Pennsylvannie.

### 3.2.2. Sur la loi de perte de charge non singulière

Hazen-Williams remplace Colebrook.

### 3.2.3. Sur la nature des courbes de consommation

Les consommations sont décrites par deux types de courbes :

- Pour les courbes industrielles, 24 coefficients modulent le débit de pointe décrit au niveau du noeud.
- Pour les courbes domestiques, 24 coefficients représentent la fraction horaire du volume journalier de la courbe. Les abonnés sont affectés au noeud.

### 3.2.4. Sur la forme des réservoirs

Si l'on prend comme surface de base un disque (la surface au radier) les réservoirs sont soit cylindriques soit tronconiques. Le diamètre est donc une fonction linéaire de la hauteur dans le réservoir.

### 3.2.5. Sur les arcs doubles

Les spécificités du calcul Zomayet ne permettent pas la présence d'arcs doubles. Sur la schématisation SWS on pouvait en dénombrer deux. Il s'agit des arcs : 0841/0842 et 2727/2728. Un arc de chacun des doublets a été partagé de façon à préserver les lois de perte de charges ; soit un ajout de deux noeuds intermédiaires P915 et P916.

*Wporteur sera modifié ultérieurement pour assurer une parfaite compatibilité avec SWS. On peut citer, la mise en place de la formule de perte de charge de Colebrook, le profil hauteur-volume pour les réservoirs, le profil heure-débit pour les consommations avec heure quelconque et sur une plage quelconque, le profil débit-hauteur pour les pompes et l'ajout d'un nouveau noeud de type ACF pour lequel la pression est fixée par un profil heure-pression.*

## 3.3. Passage de SWS à WPORTEAU

Le passage de SWS à Wporteur nécessite plusieurs étapes :

- La lecture des fichiers \*.pdf et \*.xy pour la construction d'un fichier Zomayet sans singularité. L'importance du nombre d'arcs et de noeuds et des données en général, a nécessité l'écriture d'un programme de conversion de format de fichier. Ce dernier a été écrit en C. Les données concernant les réservoirs et les singularités sur les tronçons ne sont pas prises en compte à ce niveau.
- Les singularités et les données concernant les réservoirs et la production sont ensuite rentrées à la main sous Wporteur.

### 3.3.1. Singularités sur les arcs

Une longueur minimale est nécessaire. Une longueur de 0.1 m est fixée pour chaque tronçon singularité. Pour les tronçons pompes, le diamètre retenu est celui du tronçon vanne associé.

### 3.3.2. Vanne partiellement fermée

Une vanne partiellement fermée est modélisée sur le tronçon EE00479V-EE00479 avec un "tau" de 0.1 pour SWS.

La vanne étant fermée le "tau" deviendrait tau = 0 et ouverte il deviendrait tau = 1.00 ;

Il a été supposé qu'il s'agissait d'un robinet-vanne ordinaire à passage direct. A tau = 0.1 il correspond donc un k de 122 (cf. tableau Carlier p.255 et calcul Matlab). L'utilisation du k correspond à la perte de charge singulière ou locale de l'équation (4) :

$$\xi^{\text{locale}} = 122. \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

### 3.3.3. Réservoirs et production

Pour les réservoirs la difficulté venait de la description des profils volume-hauteur qu'il fallait traduire au format Wporteur (cf. §3.2.4).

#### 3.3.3.1. Réservoirs de Romainville

Pour des raisons essentiellement liées à la difficulté de la mise à jour des niveaux des deux réservoirs de Romainville (il faut prendre un temps de calcul inférieur à la

seconde), ces derniers sont modélisés en un seul réservoir équivalent : ROME. Dans le tableau 4 ci-après sont décrites les différentes cotes piézométriques en m.

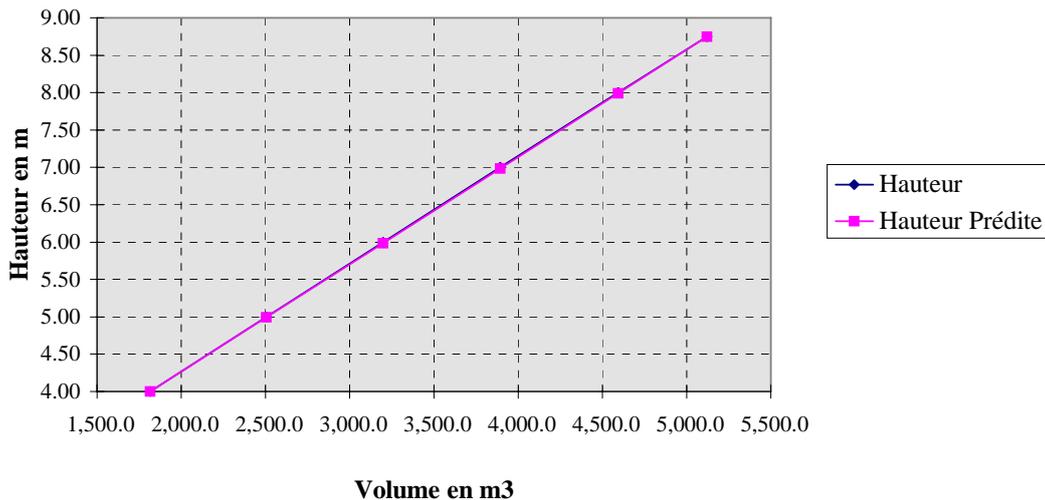
Cote sol	115.40
Radier	146.90
Début simul	154.32
Trop plein	155.65

**tableau 4** : données piézométriques pour le réservoir de Romainville

Le niveau restant toujours au-dessus de 4m, le réservoir ROME est modélisé par un cylindre de surface de base 695.9 m<sup>2</sup>. On peut constater, sur le tableau 5 et la figure n°1, que cette représentation du profil volume-hauteur "colle" parfaitement à la réalité.

m3	m	m
Volume	Hauteur	Hauteur Prédite
1,814.6	4.00	4.00
2,504.4	5.00	4.99
3,196.6	6.00	5.99
3,893.0	7.00	6.99
4,592.8	8.00	7.99
5,120.4	8.75	8.75

**tableau 5** : profil volume-hauteur pour le réservoir ROME



**figure 1** : profil volume-hauteur du réservoir de Romainville

### 3.3.3.2. Réservoir des Lilas

Pour le réservoir des Lilas, le profil volume-hauteur n'est pas bien représenté par un profil cylindrique. On essaie alors de déterminer le réservoir tronconique qui s'approche le plus du profil volume-hauteur décrit par SWS.

Pour un réservoir tronconique, le rayon évolue linéairement avec une pente  $a$ . On pose :

$$R_{\text{radier}} = b \text{ et } R_z = a * z + b$$

Le volume intérieur s'exprime donc en fonction d'une hauteur  $z$  fixe, et des paramètres  $a$  et  $b$  comme :

$$V(a, b / z) = \frac{\pi}{3} \cdot a^2 \cdot z^3 + \pi \cdot a \cdot b \cdot z^2 + \pi \cdot b^2 \cdot z \quad (5)$$

Il reste au sens des moindres carrés à résoudre :

$$\min_{a, b > 0} \left\| V(a, b / z) - V^{\text{mes}} \right\|^2$$

Ce qui permet d'obtenir (avec Matlab 4.2) les rayons et surfaces radier et trop-plein du tableau 6 en privilégiant les hauteurs  $\geq 5\text{m}$ , puisque, en pratique, on ne descend pas en dessous :

	rayon	surface
radier	7.17	161.41
trop plein	9.18	264.48

**tableau 6** : caractéristiques pour le réservoir des Lilas

Pour un volume  $V$ , on calcule la hauteur prédite par :

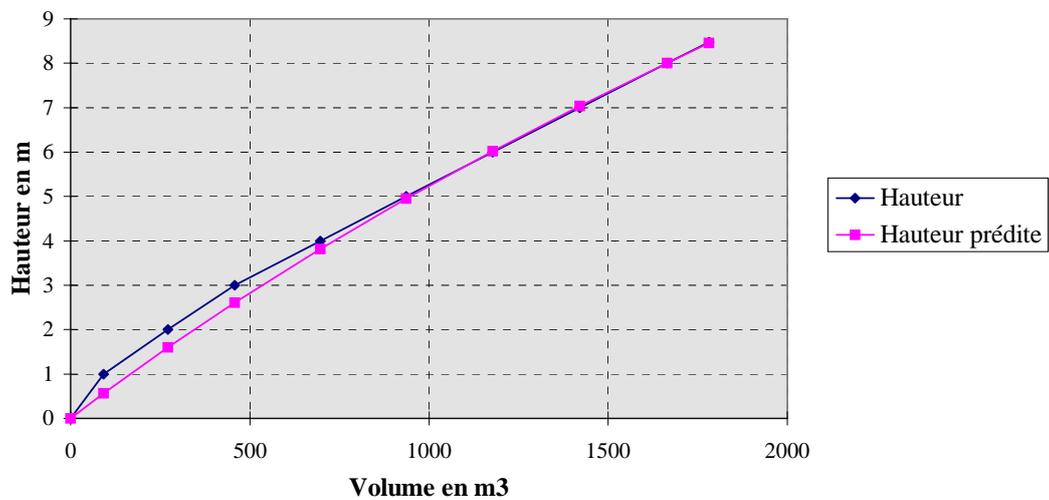
$$h^{\text{pred}}(V) = \left( \left( \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \right)^3 + \frac{3 * V^{\text{mes}}}{\pi \cdot \hat{a}^2} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \quad (6)$$

$\hat{a}$  et  $\hat{b}$  désignant les estimations de  $a$  et de  $b$ .

Sur le tableau 7 et la figure 2 sont représentés les hauteurs prédites et les résidus en fonction du volume.

Volume	Hauteur	Hauteur prédite	résidus
457.8	3.00	2.61	0.39
696.8	4.00	3.82	0.18
936.9	5.00	4.95	0.05
1,178.3	6.00	6.02	- 0.02
1,420.6	7.00	7.04	- 0.04
1,664.0	8.00	8.01	- 0.01
1,781.3	8.48	8.46	0.02

**tableau 7** : profil volume-hauteur pour le réservoir des Lilas



**figure 2** : profil volume-hauteur du réservoir des Lilas

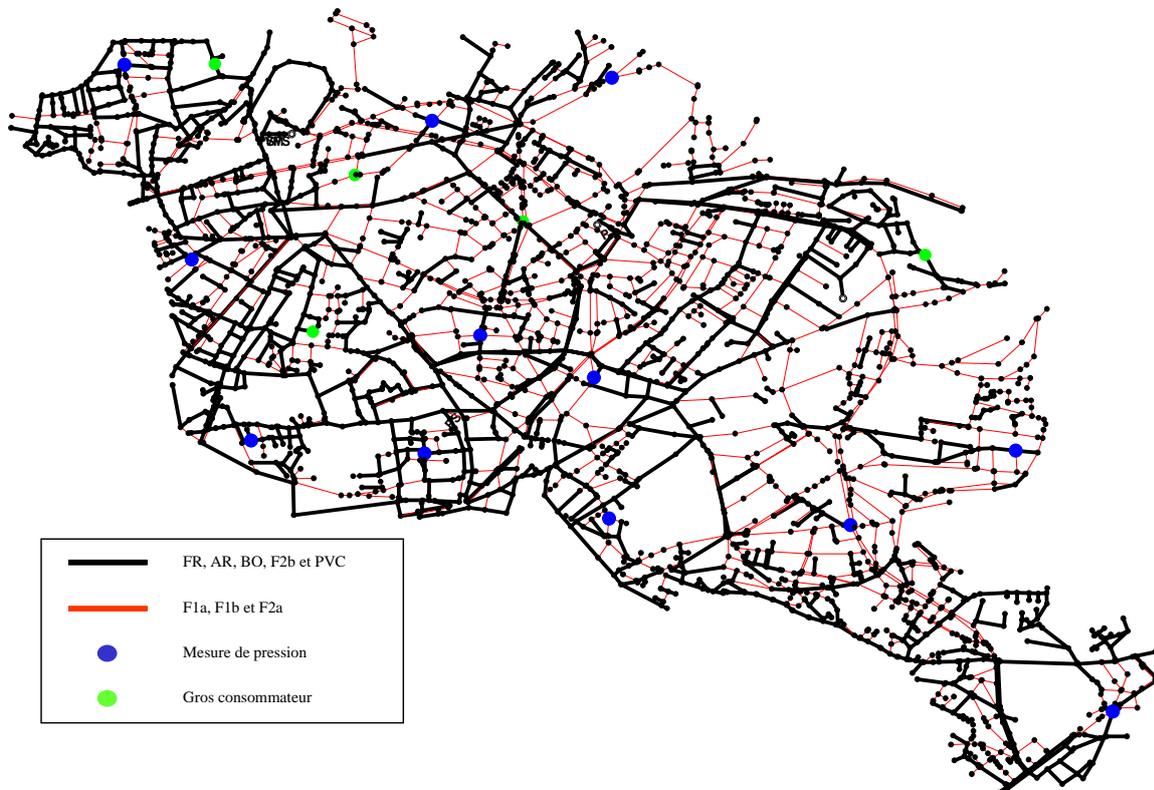
### 3.3.3.3. Production Montreuil

Pour toute l'étude la hauteur de refoulement et le débit refoulé de l'usine de production de Montreuil sont mesurés. Il n'y a donc pas de problème particulier de modélisation.

## 4. LOCALISATION DES POINTS DE MESURE

### 4.1. Mesures de pression

12 capteurs de pression sont installés sur le réseau comme indiqués sur le schéma 3 (points bleus). Les arcs sont coloriés suivant l'appartenance à l'une des deux classes de rugosité. Les points verts correspondent aux gros consommateurs.



**schéma 3** : implantation des mesures de pression

Les cotes NGF ont été vérifiées et corrigées par la CGE. Les valeurs ainsi que les noms SWS sont reportés dans le tableau n° 8 ci-après.

La précision des douze capteurs de pression est de 5% de la pleine échelle (100 mCE) soit 0.5 mCE.

La hauteur de refoulement de l'usine de Montreuil est mesurée avec une précision de 0.3 mCE. Les hauteurs des réservoirs de Romainville et des Lilas sont données.

N°	NOM	NGF en m
1	EE00977	77.00
2	EE00912	108.00
3	EE01492	83.00
4	EE00722	72.00
5	EE00455	92.19
6	EE00600	103.00
7	EE01621	80.00
8	EE00103	75.00
9	EE02422	115.00
10	EE02798	65.00
11	EE02237	120.00
12	EE02930	83.00

tableau 8 : mesures de pression

#### 4.2. Mesures du débit

On peut dénombrer seize mesures de débit si l'on compte les productions au niveau de l'usine de Montreuil, des deux réservoirs de Romainville et du réservoir des Lilas.

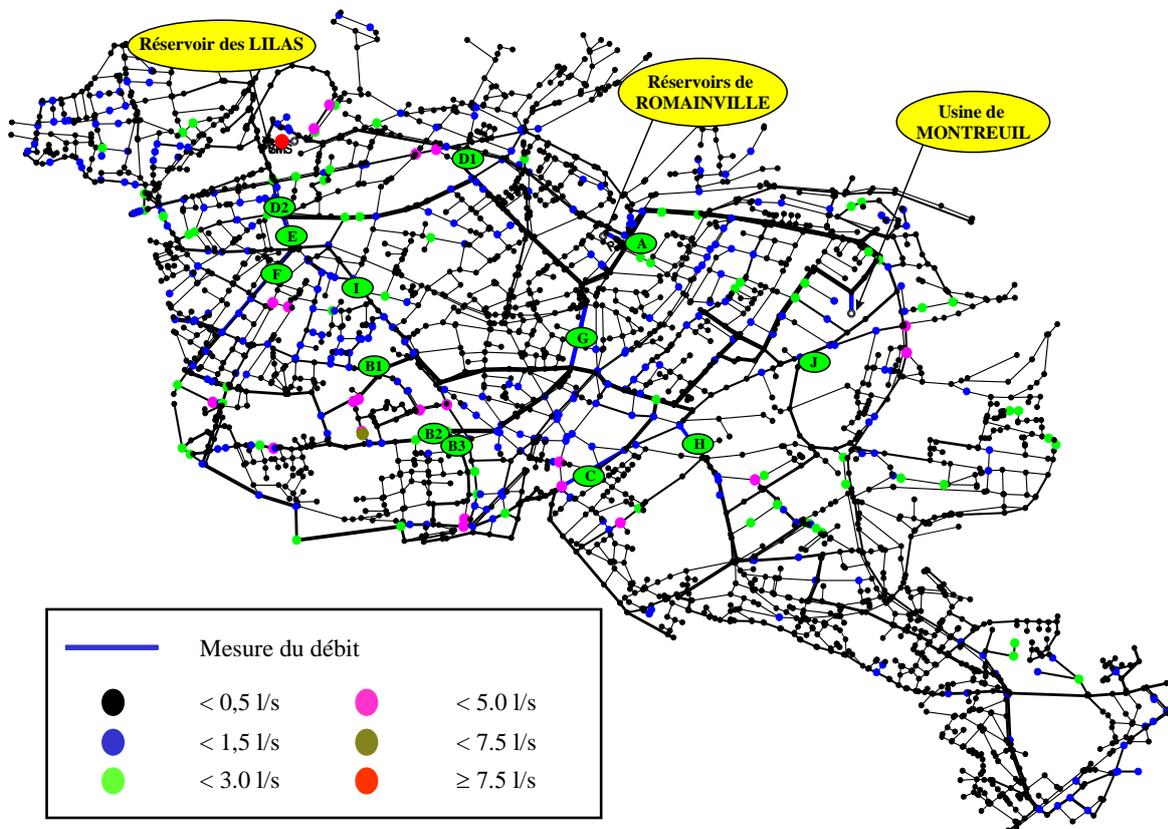


schéma 4 : implantation des mesures de débit

L'implantation est décrite schéma 4. Les noeuds sont coloriés suivant l'importance de la demande et les arcs portant les débitmètres sont en bleu. Le nom, le diamètre ainsi que le matériau sont indiqués dans le tableau n° 9.

NOM	arc	diamètre en mm	matériau abrégé
A	EE01068/EE02911	600	BOb
B1	EE00310/EE00411	300	F2b
B2	EE00447/EE00479	400	F2b
B3	EE00478/EE00479V	300	FRb
C	EE00761/EE00750	400	FRb
D1	EE02196/EE02218	300	F2b
D2	EE02503/EE02457	300	FRb
E	EE00346/EE00354	400	FRb
F	EE00345/EE00197	400	FRb
G	EE01632/EE00633	500	BOb
H	EE00773/EE00881	400	FRb
I	EE00275/EE00367	300	FRb
J	EE00951/EE00950	300	F1b
Prod. Usine	EESMONRF/EE01161	800	BOb
Prod R1+R2	EE02916/EE02915	600	BOb
Prod. Lilas	RLI4/P914	300	FRb

**tableau 9** : mesures de débit

La précision a priori des treize premières mesures de débit est fonction de la vitesse donnée par le tableau n° 10 si la vitesse dans la conduite est supérieure à 0.1 m/s. Pour une vitesse inférieure, il faut prendre en compte une erreur absolue et non relative.

Vitesse en m/s	Précision du débit
$\geq 0.5$	1%
$\geq 0.3$ et $< 0.5$	1.5 %
$\geq 0.2$ et $< 0.3$	3 %
$\geq 0.1$ et $< 0.2$	5 %

**tableau 10** : précision des mesures de débit

La précision de la production de la station de pompage est de 2%. Les productions au niveau des réservoirs de Romainville et des Lilas sont calculées à partir des différences

de hauteurs des réservoirs. L'erreur de prédiction est donc directement proportionnelle à la précision avec laquelle on connaît les hauteurs des réservoirs.

#### **4.3. Remarques et anomalies sur les fichiers de données bruts**

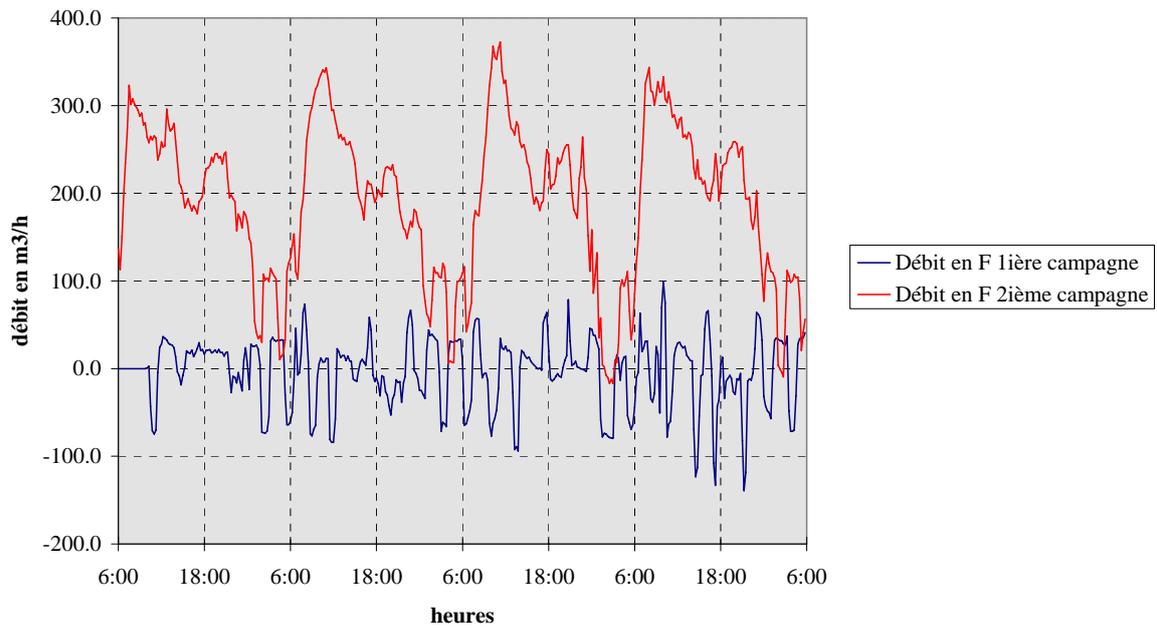
Nous disposons pour chaque mesure de débit et de charge des valeurs instantanées par pas de temps de cinq minutes. A chacune d'elle, on associe les valeurs moyennes par quart d'heure, calculées sur les 3 dernières mesures instantanées. Ce qui a permis d'une part un lissage et d'autre part de faire correspondre les productions des réservoirs, calculées à partir des différents niveaux observés, avec les débits et les pressions observées. Ainsi, la valeur moyenne proposée à 6h00 est calculée à partir des valeurs instantanées à 5h50, 5h55 et 6h00.

##### **4.3.1. Sur les mesures de débit**

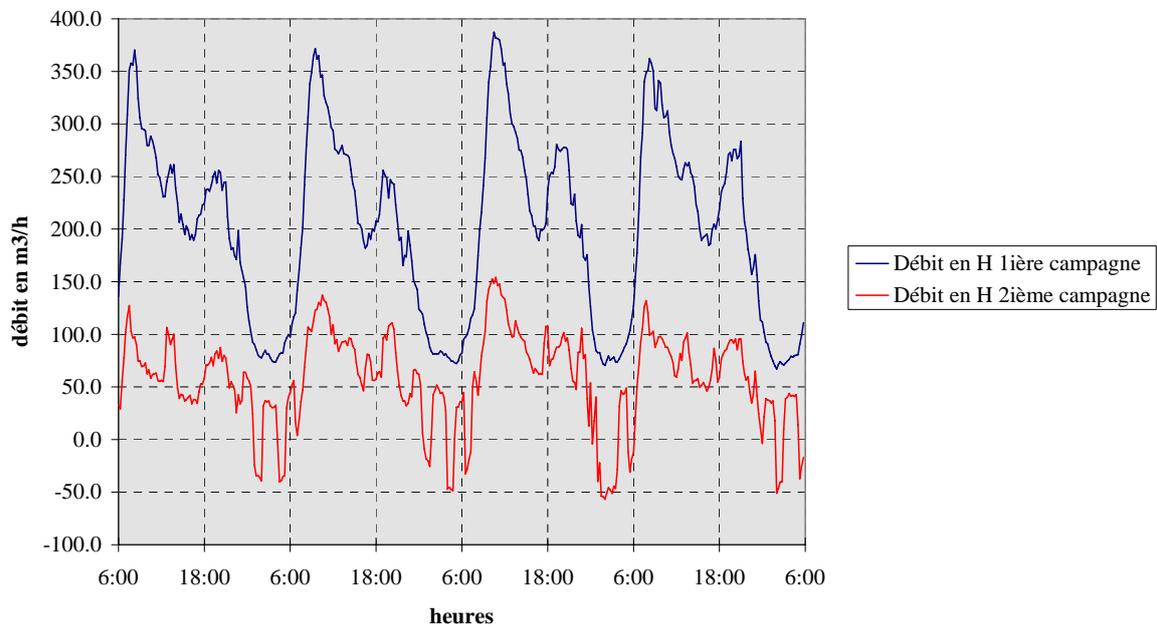
Les mesures de débits pour les treize premiers points de mesures, excepté celles des productions, sont reportées dans le fichier Q\_25.xls (resp. Q\_09.xls) du 06/04/97 pour la première campagne de mesure (resp. pour la deuxième campagne de mesure).

Plusieurs anomalies sont observées :

- Le débit pour le point de mesure E, cf. tableau n°9, est nul ou non renseigné pour les deux campagnes de mesures.
- Le débit pour le point de mesure C, cf. tableau n°9, est nul ou non renseigné pour la seconde campagne de mesure.
- La mesure au point F a un problème le 21/06 jusqu'à 10h30 comme le montre le graphe de la figure 3 courbe bleue.
- La mesure au point I (resp. J) n'est plus bonne pour la seconde campagne de mesure à partir du lundi 24/06 7h30 (resp. du vendredi 21/06 10h45).



**figure 3** : mesure du débit au point F pour les deux campagnes de mesures



**figure 4** : mesure du débit au point H pour les deux campagnes de mesures

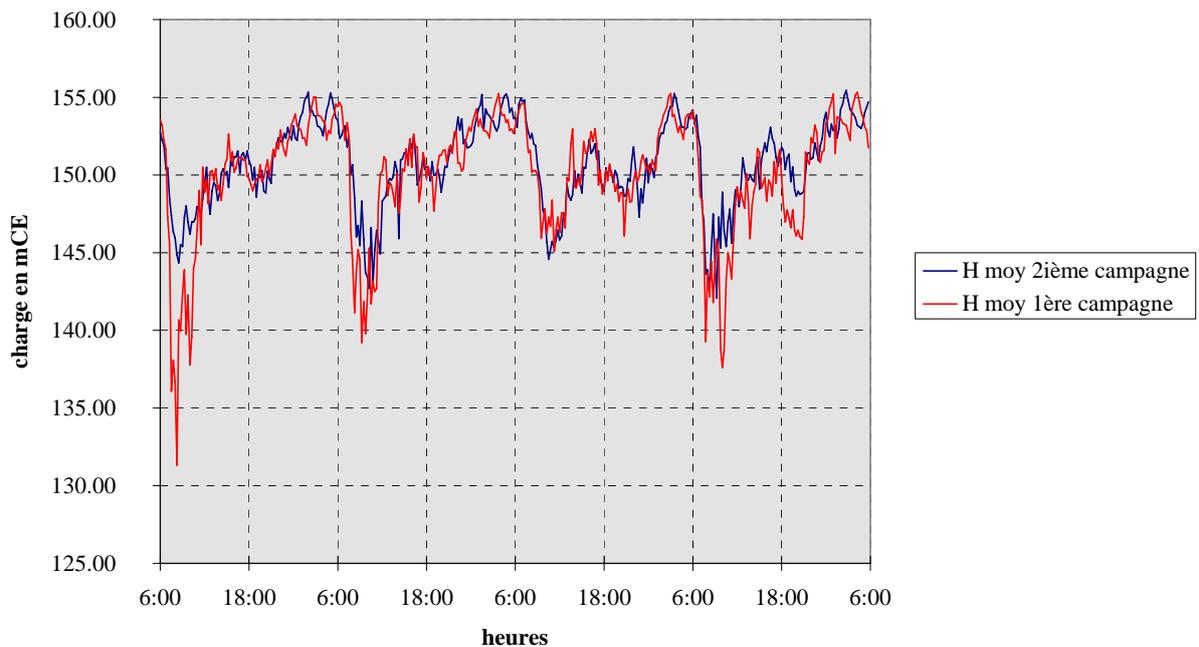
On peut constater, comme le montre par exemple les figures 3 et 4 pour les débits aux points F et H, que les régimes hydrauliques pour les deux campagnes de mesure

sont différents. Un débit peut être conséquent pour l'une des deux campagnes et proche de zéro pour l'autre.

Plus le débit transitant par un tronçon est important, plus celui-ci reproduit le comportement moyen des abonnés et devient périodique.

#### 4.3.2. Sur les mesures de pression

Le fichier P\_25.xls (resp. P\_09.xls) daté du 16/04/97, contient les mesures de la pression en bars aux 12 points de mesures du tableau 8 pour la première campagne de mesure (resp. la seconde correspondant à la sectorisation). Après conversion en mCE et ajout de la cote sol, on obtient les charges correspondantes. Nous avons reporté sur le graphe de la figure 5, les charges ainsi obtenues pour le point de mesure n° 10.



**figure 5** : mesure de la charge au point 10 pour les deux campagnes de mesures

On peut remarquer un déficit de la charge au noeud 10 pour la première campagne de mesure (courbe rouge) par rapport à la seconde campagne de mesure : les écarts vont jusqu'à 10 mCE. La différence semble disparaître le dimanche. L'hypothèse d'une consommation supplémentaire non répertoriée sera explorée dans un prochain chapitre.

## 5. LE MODULE DE CALAGE

A partir d'une estimation  $(C_0, D_0)$  des rugosités et de la demande globale, on cherche de nouvelles estimations de  $(C, D)$  qui au sens des moindres carrés rapprochent les mesures des valeurs calculées en résolvant les équations d'équilibrage hydraulique (cf. §3.1). Les résidus sont pondérés par les erreurs de mesure a priori. On cherche à résoudre :

$$(CLS) \quad \min_{C>0, D} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_i^{mes} - \hat{y}_i(C, D)}{\Delta y_i} \right)^2 \quad (7)$$

où

- m : désigne le nombre de mesures ;
- C : le vecteur des classes de rugosité ;
- D : Le vecteur des coefficients de modulation de la demande globale sur les quatre jours ;
- $y_i^{mes}$  : la i-ième mesure (débit ou charge) ;
- $\hat{y}_i(C, D)$  : le débit ou la charge correspondante calculée par Zomayet ;
- $\Delta y_i$  : la précision de la mesure ;

Une particularité des contraintes du critère à minimiser est que l'on ne restreint pas la modulation de la demande à rester positive, ce qui en fonction de l'anomalie observée, permet le plus souvent de corriger le modèle.

L'algorithme de résolution est du type Levenberg-Marquard. Une correction automatique des poids en fonction des résidus est ajoutée pour augmenter la robustesse de l'algorithme. Si les poids initiaux tiennent compte de la réalité, il détecte le plus souvent les erreurs de mesures « grossières » ou importantes. Une description peut être trouvée dans Piller, 1995.

## 6. CALAGE DES DEMANDES

### 6.1. A partir d'un bilan sur les productions et sur les consommations

A partir d'un bilan entre d'une part la production de l'usine de Montreuil, les productions au niveau des réservoirs de Romainville et des Lilas, les consommations des gros consommateurs et le prélèvement vers la troisième élévation, il est possible d'obtenir une estimation du débit résiduel correspondant à la consommation globale. Les fuites sont supposées constantes et de l'ordre de  $235 \text{ m}^3/\text{h}$ . Comme indiqué au chapitre 4.3, les calculs sont effectués avec les moyennes sur trois valeurs instantanées. Par la suite, toutes les variables de débit et de pression sont des valeurs moyennées dans ce sens.

Il faut cependant remarquer que les résultats sont obtenus aux erreurs de mesure près sur les débits et les volumes utilisés. La courbe obtenue peut-être considérée comme une tendance autour de laquelle se situe la vraie modulation de la demande globale.

Pour chacune des deux campagnes, les moyennes, maximums et minimums des 384 débits résiduels sont reportés en  $\text{m}^3/\text{h}$  dans le tableau 11 ci-dessous.

	Première campagne	Deuxième campagne
Débit minimum ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	93.2	253.2
Débit moyen ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	1350.2	1230.7
Débit maximum ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	2755.5	2402.7

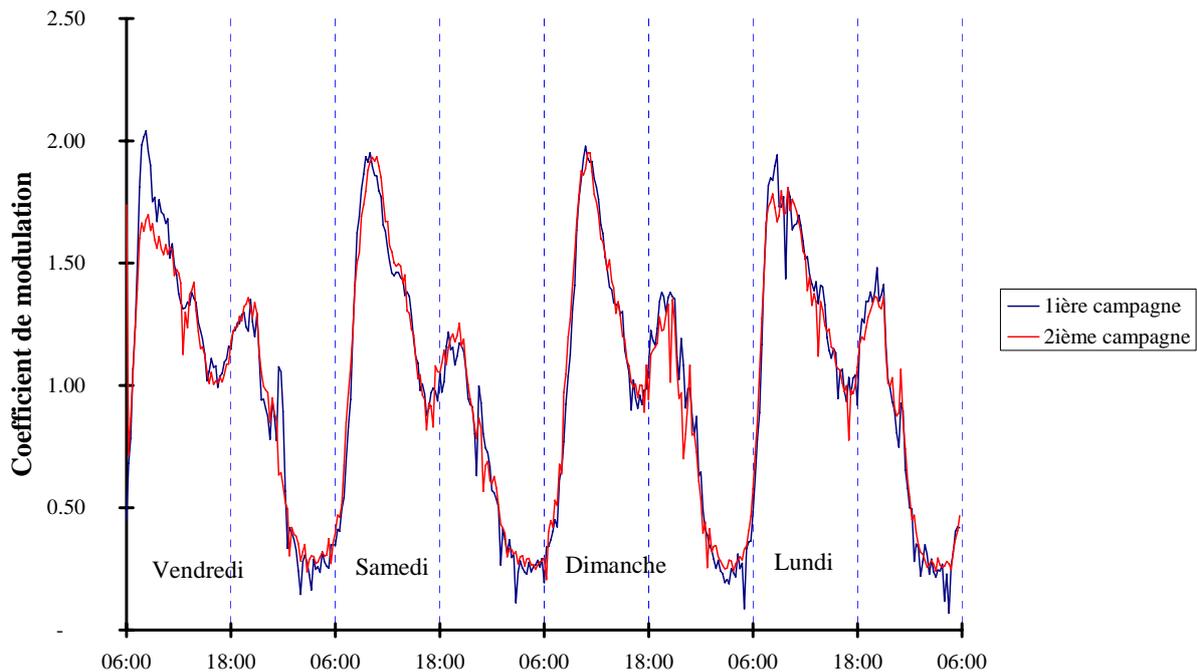
**tableau 11** : statistiques sur la demande globale en  $\text{m}^3/\text{h}$  pour les deux campagnes de mesures

Sur le graphe de la figure 6 (page suivante), les 384 débits résiduels sont divisés par leur débit moyen du tableau 11 sur les quatre jours. On obtient ainsi, pour chacune des deux campagnes de mesures, les deux courbes de modulation.

Un premier commentaire s'impose : même si les deux campagnes de mesures ont été conduites sur deux configurations hydrauliques différentes, la modulation de la demande semble identique pour le même jour de la semaine. Ce qui exprime certainement que l'on a suffisamment d'abonnés sur ce réseau pour que le comportement statistique moyen (ou tendance centrale) soit bien approché.

Les périodes de pointes sont de 7h30 à 8h30 le vendredi 21 et le lundi 24, de 9h à 10h le samedi et le dimanche de 10h30 à 11 h 30.

Pour un volume journalier donné, on peut considérer que la consommation est déterminée sur le réseau de la ville de Montreuil, la courbe de répartition de la modulation étant assez fiable.



**figure 6** : modulation de la demande globale pour les deux campagnes de mesures

## 6.2. A partir du module de calage

Les coefficients de rugosité et la demande sont calés simultanément. On vérifie ici la qualité de la modulation de la demande obtenue précédemment.

Les résultats présentés correspondent au 21/06/96 de 6h à 12h, la première journée de la première campagne. Pour résoudre le problème (CLS), il est alors nécessaire de décrire 1 fichier de mesures de 24 régimes successifs. On utilise ensuite le module de calage avec  $24+2=26$  inconnues et 648 mesures de débit ou de charge (la mesure de débit au point E n'étant pas disponible).

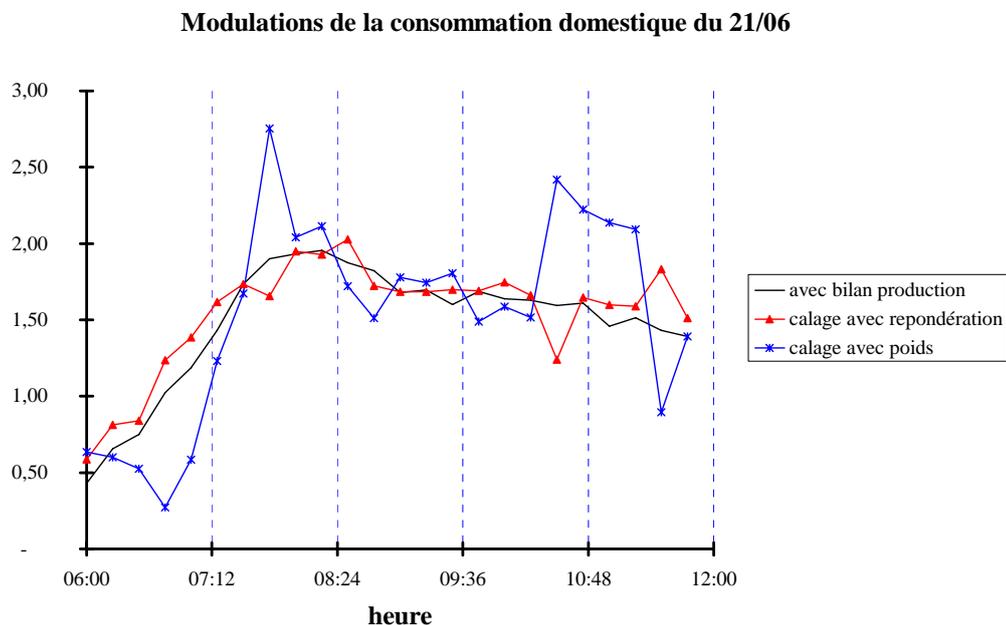
La repondération automatique des résidus n'a pas eu lieu. Les résultats sont ceux d'un simple moindre carré avec poids. Ce qui peut signifier deux choses :

- les poids ne sont pas tous pertinents ;
- ou bien au contraire, il n'y a pas d'erreurs de mesures importantes ;

En remarquant que les résidus obtenus sont élevés pour les périodes creuses (de faible transit) c'est la première hypothèse qui est retenue.

Par contre, si tous les poids sont mis à 1 (donc aucune information a priori sur la précision) lors de la résolution numérique la correction automatique des poids se met en marche. On constate alors un rapprochement de la modulation de la demande globale obtenue par calage de celle obtenue au paragraphe précédent.

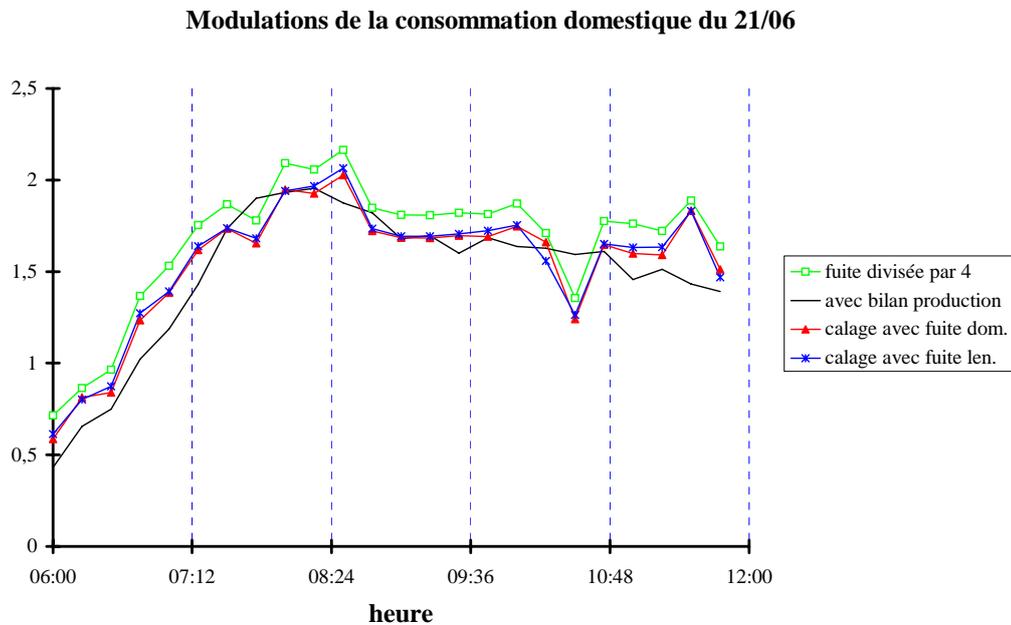
Sur la figure 7, sont reportées les modulations pour le 21/06/96 de 6h à 12h obtenus (courbe bleue) avec un moindre carré pondéré et (courbe rouge) obtenus avec repondération automatique. La prise en compte de mesures de débit et de pression sur le réseau ne modifie pas la modulation de la demande globale : ce qui montre que l'on peut faire confiance à la courbe obtenue avec les bilans sur les productions.



**figure 7** : calage de la demande globale avec poids et calage avec repondération

Pour tester l'influence de la modélisation des fuites sur cette estimation la même étude a été menée pour des fuites "domestiques" augmentées ou diminuées et pour des fuites au prorata des longueurs ou fuites "len".

Sur la figure 8 sont reportés les résultats pour la première journée de 6h à 12 h. On constate que la modélisation des fuites, qu'elle soit "dom." ou "len" n'influence pas de façon significative l'estimation de la demande globale. Diviser les fuites par quatre aura eu comme conséquence d'augmenter la demande globale du même volume moyen complémentaire.



**figure 8** : estimation des modulations pour diverses configurations de fuites

### 6.3. Conclusion sur le calage de la demande

Pour le réseau de l'Usine de Montreuil, il est préférable d'estimer la modulation de la demande à partir des bilans sur les grands transits :

- le résultat est immédiat, il n'est pas besoin pour cela de résoudre un problème des moindres carrés pour estimer 384 coefficients de modulation pour chacune de deux campagnes (4 par heure) ;
- la courbe de modulation obtenue est fiable puisque pour les deux campagnes les courbes se superposent (cf. figure 6) ;
- on n'obtient pas de précision significativement meilleure en calant le jeu de mesure pression-débit que l'on dispose.

Ce résultat prévisible n'est plus vrai avec plusieurs classes d'abonnés.

## 7. CALAGE DES RUGOSITES

Les estimations des rugosités sont obtenues pour chacune des deux campagnes de mesure sur un fichier construit avec 20 périodes de pointe : les pertes de charges sont ainsi plus conséquentes et l'influence des erreurs de mesure sur les estimations moins importantes.

La consommation domestique globale est à ce stade fixée et estimée par les bilans de production. Il sera cependant intéressant de la comparer à son estimation issu de l'algorithme de calage automatique. La configuration des fuites est la configuration "dom." pour un débit de 235 m<sup>3</sup>/h.

Les inconnues rugosités ou demandes sont introduites une par une et les résultats ne seront présentés que s'ils apportent une amélioration significative de la prédiction sur les débits ou les charges. Ce qui permet de tester plusieurs modèles emboîtés et de n'introduire une variable que si elle baisse sensiblement l'erreur résiduelle. Le fichier `resultats_2cl.xls` contient tous les résultats des essais.

Le critère MCO (des Moindres Carrés Ordinaires) donne à toutes les mesures un même poids. Il ne permet pas de prendre en compte les différences d'échelle entre mesures de natures différentes. Il conduit cependant à une estimation des paramètres inconnus qui minimise la somme des carrés des écarts entre valeurs observées et valeurs prédites que nous noterons SC<sub>Er</sub>.

Pour une estimation MCP (Moindres Carrés avec Poids) les résidus sur les charges sont divisés par la précision sur les charges de 0.5 m et les résidus sur les débits par un pourcentage de la valeur mesurée qui correspond à la précision de la mesure. Les débits des grands transits seront ainsi moins bien prédits en valeurs absolues que pour une prédiction MCO (Moindres Carrés Ordinaires) : une mesure d'un débit, petite ou grande aura la même importance. L'erreur de prédiction moyenne est donc plus forte que pour MCO, mais les estimations des coefficients de rugosité sont d'autant plus exactes que les poids ont été correctement choisis. Pour toutes ces raisons, il sera utile de disposer des deux estimations : MCO et MCP.

Des estimations ponctuelles et un intervalle de confiance seront donnés par la suite. La précision indiquée est calculée par approximation linéaire des équations. On utilise les précisions des mesures et la matrice de sensibilité. L'encadrement résultant est du premier ordre donc d'autant plus juste qu'il est petit.

On utilisera les notations abrégées suivantes :

SCEr	:	Somme des Carrés des Ecartés Pondérés résiduels entre valeurs mesurées et valeurs prédites par le modèle ;
SCE <sup>P</sup> r	:	Somme des Carrés des Ecartés Pondérés résiduels entre valeurs mesurées et valeurs prédites par le modèle ;
CMr débit	:	Carré Moyen résiduel sur les mesures de débit = SCEr divisée par le nombre de degrés de liberté ;
CM <sup>P</sup> r débit	:	Carré Pondéré Moyen résiduel sur les mesures de débit ;
CMr charge	:	Carré Moyen résiduel sur les mesures de charge ;
CM <sup>P</sup> r charge	:	Carré Pondéré Moyen résiduel sur les mesures de charge ;
EM débit	:	Erreur Moyenne sur les débits = racine carré de CMr débit ;
EM charge	:	Erreur Moyenne sur les charges.

## 7.1. Résultats première campagne de mesure

### 7.1.1. Avec toutes les mesures

#### 7.1.1.1. Résultats MCO

Sur le tableau 12 suivant, ont été reportés les résultats de 14 essais obtenus tour à tour en fixant chacun des paramètres à son estimation initiale (en gras) ou bien en l'estimant.

Conso en 10	Conso globale	F2b, AR		SCEr	CMr débit /ddl	CMr charge /ddl	EM débit l/s	EM charge mCE
		FR, BO, PVC	F1a, F1b,F2a					
nulle	<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	557,433	1766.3 (315)	4.4 (240)	42.03	2.10
nulle	<b>fixée</b>	134.2	<b>95.0</b>	556,708	1769.7 (314)	4.3 (239)	42.07	2.07
nulle	<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	86.3	557,223	1771.4 (314)	4.2 (239)	42.09	2.04
nulle	<b>fixée</b>	134.4	86.9	556,548	1775.0 (313)	4.1 (238)	42.13	2.03
nulle	variable	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	505,106	1708.6 (295)	4.9 (220)	41.34	2.21
nulle	variable	<b>136.0</b>	88.3	505,706	1716.6 (294)	4.8 (219)	41.43	2.18
nulle	variable	133.9	<b>95.0</b>	508,860	1727.3 (294)	4.7 (219)	41.56	2.17
nulle	variable	133.9	98.2	508,836	1733.0 (293)	4.8 (218)	41.63	2.19
variable	<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	551,794	1858.4 (295)	16.2 (220)	43.11	4.03
variable	<b>fixée</b>	134.5	<b>95.0</b>	551,192	1865.1 (294)	13.0 (219)	43.19	3.61
variable	<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	98.2	551,792	1865.3 (294)	15.5 (219)	43.19	3.93
variable	<b>fixée</b>	134.4	99.4	551,341	1872.3 (293)	12.7 (218)	43.27	3.56
variable	variable	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	477,290	1692.6 (275)	59.11 (200)	41.14	7.69
variable	variable	133.6	110.2	477,981	1703.6 (273)	65.10 (298)	41.28	8.07

**tableau 12** : Résultats MCO pour la première campagne avec toutes les mesures

L'estimation des rugosités sur le quatrième essai (ligne 4 du tableau 12) est présentée sur le tableau 13 suivant. La consommation en 10 est nulle et la consommation initiale est fixée à partir du bilan sur les grands transits. Entre parenthèses apparaissent les rugosités équivalentes en mm.

Classe de rugosité	Valeur initiale	Estimation
F2b, AR, FR, BO et PVC	136 (0.10 mm)	134.4 (0.14 mm)
F1a, F1b, F2a	95 (2.00 mm)	86.9 (2.74 mm)

**tableau 13** : estimation MCO des coefficients de rugosité pour la première campagne

L'estimation conduit effectivement à minimiser SC<sub>Er</sub>, mais elle ne met pas en défaut l'estimation initiale des coefficients de rugosité : la SC<sub>Er</sub> obtenue de 556548 n'est pas significativement différent de la SC<sub>Er</sub> initiale de 557433. Un test de Fisher conduit en effet au calcul de :

$$\frac{557433 - 556548}{556548} = 0,00159$$

qui pour une variable de Fisher avec 2 degrés de liberté au numérateur et 553 au dénominateur a 99,8% de chance d'être dépassée.

C'est pourquoi, on peut affirmer que l'estimation 134,4/86,9 n'est pas significativement différent de 136/95.

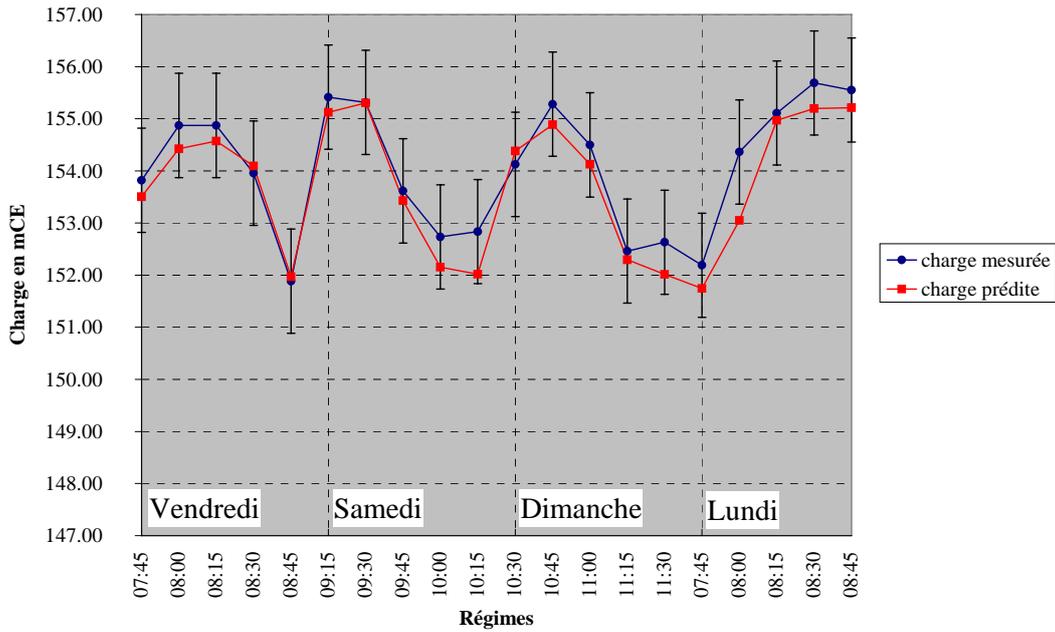
On observe une même SC<sub>Er</sub> optimale pour un large spectre de valeurs possibles : il n'y a pas unicité de la solution et l'estimation initiale est aussi bonne que les autres.

L'introduction des erreurs moyennes sur les débits et sur les charges permet de conforter cette analyse : pour l'estimation initiale, les erreurs moyennes sur les débits et les charges sont de 42 l/s et de 2.1 mCE ; pour les treize autres estimations du tableau 12, les erreurs moyennes ne sont pas meilleures.

Sur le tableau 12 tout entier et les 14 jeux d'essai, on peut constater que la prédiction des débits et des charges reste de la même qualité que l'on introduise les coefficients de rugosités, la demande globale ou une consommation au noeud 10 (cf. §4.3.2) comme variable à déterminer.

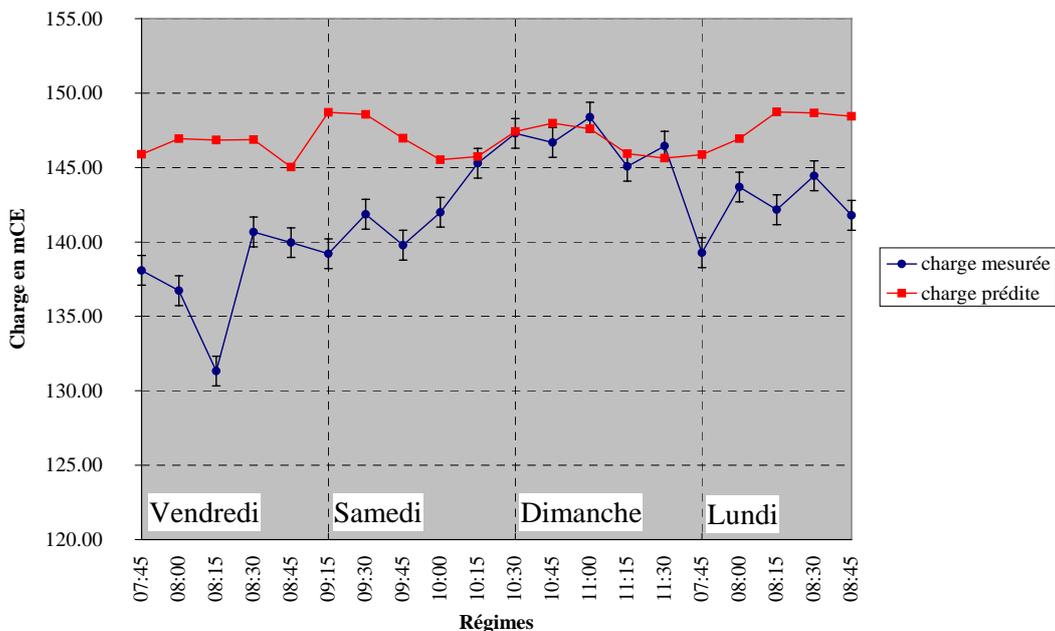
#### *Analyse sur les charges (première campagne)*

Les résidus sur les charges sont presque tous à moins d'un mètre comme le montre la figure 9 pour le point 8.



**figure 9** : Prédiction initiale de la charge au noeud 8

Le point 10 (figure 10) est un "outlier" : il fait exception et la différence de prédiction peut dépasser 10 mCE. Le dimanche, charges mesurées et charges prédites se rejoignent. C'est pourquoi, l'hypothèse d'une consommation locale non répertoriée a été testée. Cependant, améliorer la situation en 10, en rajoutant en ce noeud une consommation inconnue, détériore la prédiction des autres charges.



**figure 10** : Prédiction initiale de la charge au noeud 10

### Analyse sur les débits (première campagne)

Nous avons reporté sur la figure n° 11 la prédiction du débit provenant de la station de pompage au point A qui alimente les deux réservoirs de Romainville pour chacun des vingt régimes. La barre d'erreur verticale représente ici une précision relative de 10%. Cet intervalle est toujours respecté.

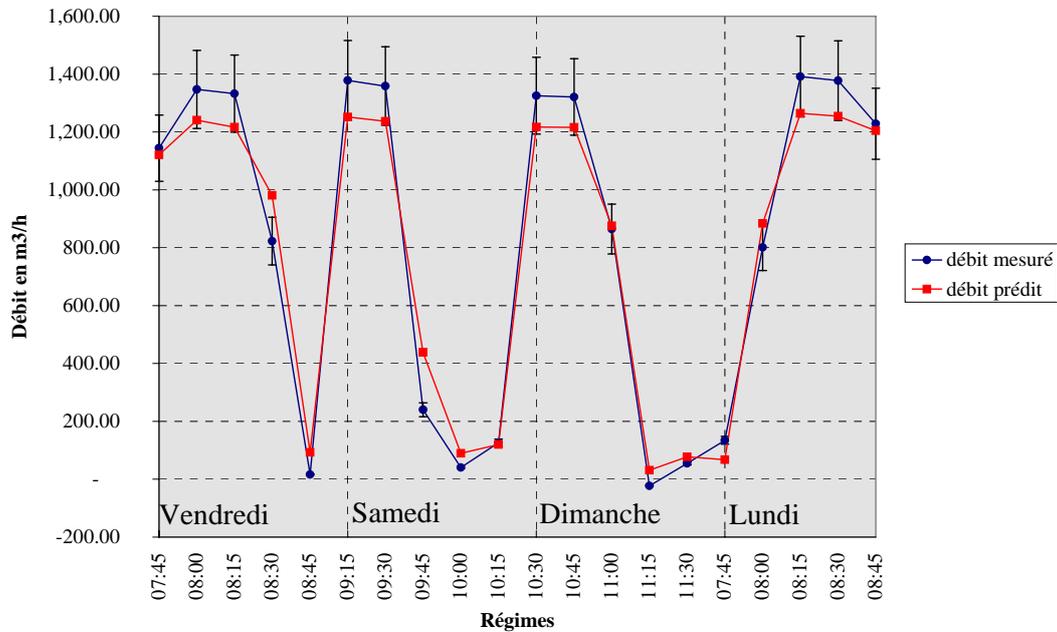


figure 11 : prédiction initiale du débit pour le point A

De la même façon, on observe de bons résultats sur l'ensemble des 16 mesures de débit comme peut l'attester la figure n° 12 pour la prédiction pour le point H.

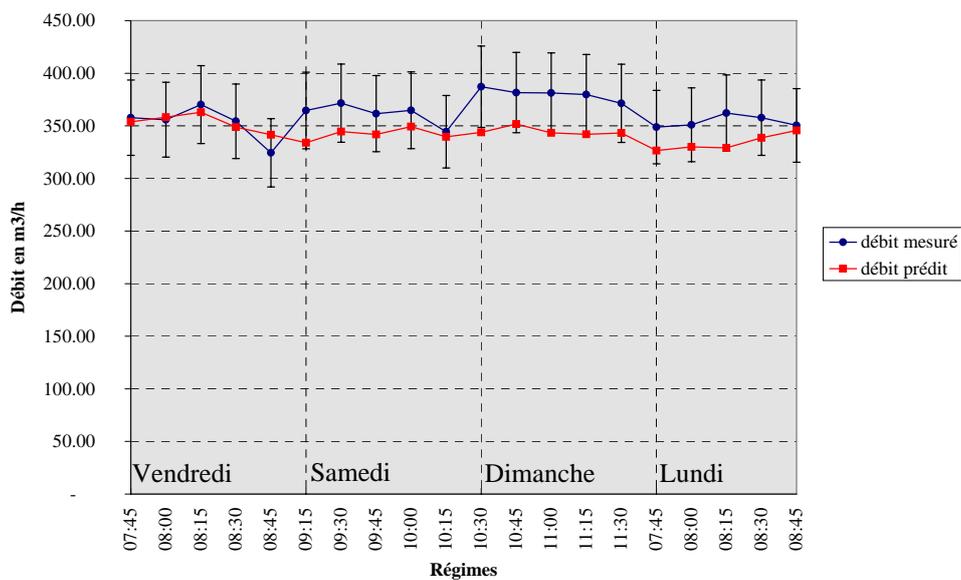


figure 12 : prédiction initiale du débit pour le point H

Seule la prédiction pour le débit au point G pose problème (cf. figure 13). Il faut cependant remarquer qu'en ce point le débit passe de -400 l/s à +500 l/s et que la tendance de la courbe est respectée.

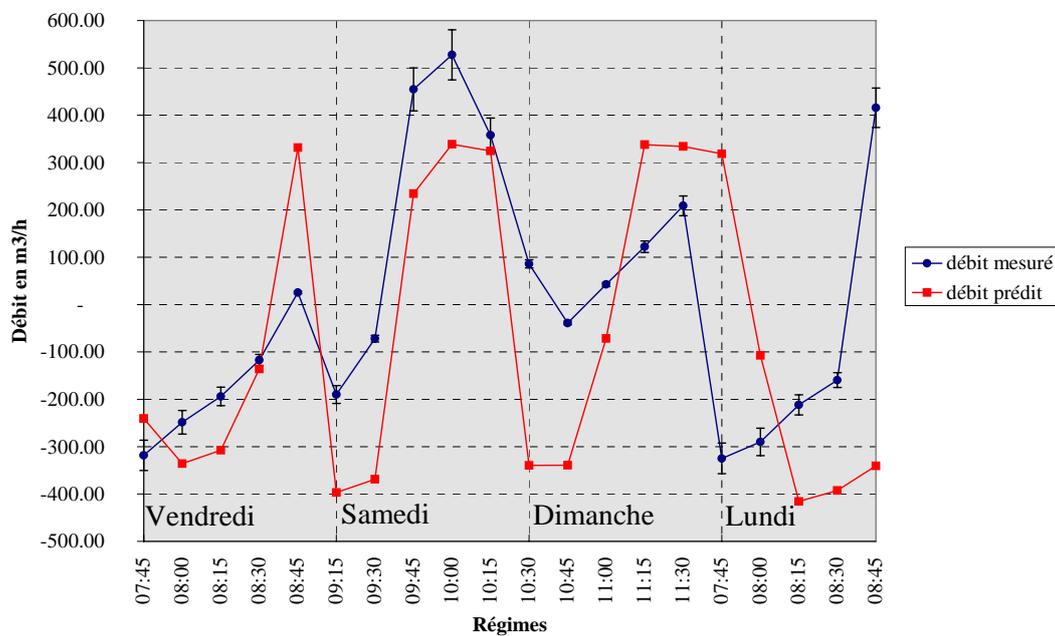


figure 13 : prédiction initiale du débit pour le point G

### 7.1.1.2. Résultats MCP

Sur le même principe, mais pour des estimations MCP on relève sur le tableau 14 les résultats obtenus.

Les erreurs moyennes EM ne correspondent pas à la racine carrée des  $CM^P_r$ . Une estimation MCP optimise les erreurs relatives. C'est pourquoi, si la  $SCE^P_r$  baisse, il n'en n'est pas forcément de même des erreurs moyennes.

<i>Conso en</i> <i>10</i>	<i>Conso</i> <i>globale</i>	<i>F2b, AR</i> <i>FR, BO,</i> <i>PVC</i>	<i>F1a,</i> <i>F1b,F2a</i>	$SCE^P_r$	$CM^P_r$ débit /ddl	$CM^P_r$ charge /ddl	$EM$ débit l/s	$EM$ charge mCE
nulle	fixée	136.0	95.0	3,192,479	10121.4 (315)	17.6 (240)	42.03	2.10
nulle	fixée	120.0	95.0	3,171,436	10089.1 (314)	14.5 (239)	44.95	1.90
nulle	fixée	136.0	119.1	3,187,614	10135.2 (314)	21.7 (239)	42.25	2.33
nulle	fixée	119.5	112.0	3,161,606	10089.2 (313)	15.5 (238)	45.19	1.97
nulle	variable	136.0	95.0	197,617	648.3 (295)	28.9 (220)	63.61	2.69
nulle	variable	136.0	98.0	197,101	649.1 (294)	28.6 (219)	63.81	2.68
nulle	variable	119.1	95.0	187,907	617.5 (294)	29.1 (219)	61.51	2.70
nulle	variable	118.7	89.4	188,791	621.4 (293)	30.7 (218)	61.72	2.77
variable	fixée	136.0	95.0	1,448,861	3000.6 (295)	2562.2 (220)	54.78	25.31
variable	fixée	153.0	95.0	2,100,765	2073.6 (294)	6808.8 (219)	52.82	41.26
variable	fixée	136.0	1,203.7	946,495	1936.3 (294)	1722.5 (219)	62.30	20.75
variable	fixée	134.5	506.9	893,140	1538.3 (293)	2029.5 (218)	55.88	22.52
variable	variable	136.0	95.0	194,462	686.9 (275)	27.8 (200)	66.37	2.64
variable	variable	119.6	90.6	185,836	661.4 (273)	26.6 (298)	64.45	2.58

**tableau 14 :** Résultats MCP pour la première campagne avec toutes les mesures

Les remarques du chapitre précédent concernant la précision sur la rugosité sont identiques.

La seule introduction de variable qui fait baisser significativement  $SCE^P_r$  est celle de la demande globale. Il faut cependant remarquer que les erreurs moyennes passent pour les débits de 42 l/s à 63.6 l/s et pour les charges de 2.1 mCE à 2.6 mCE.

Dans ces cas-là, une mesure débit bénéficie globalement d'une meilleure prédiction : celle de la production des deux réservoirs de Romainville (R1+R2) (figure 14). La courbe prédite avec l'estimation MCP de la demande globale épouse mieux la forme de la courbe des valeurs mesurées.

Sur la figure 15, on compare pour les 20 périodes de pointe, la consommation calculée selon la méthode des bilans (§6.1) à la consommation estimée par le calage pour suivre au mieux les débits des réservoirs de Romainville.

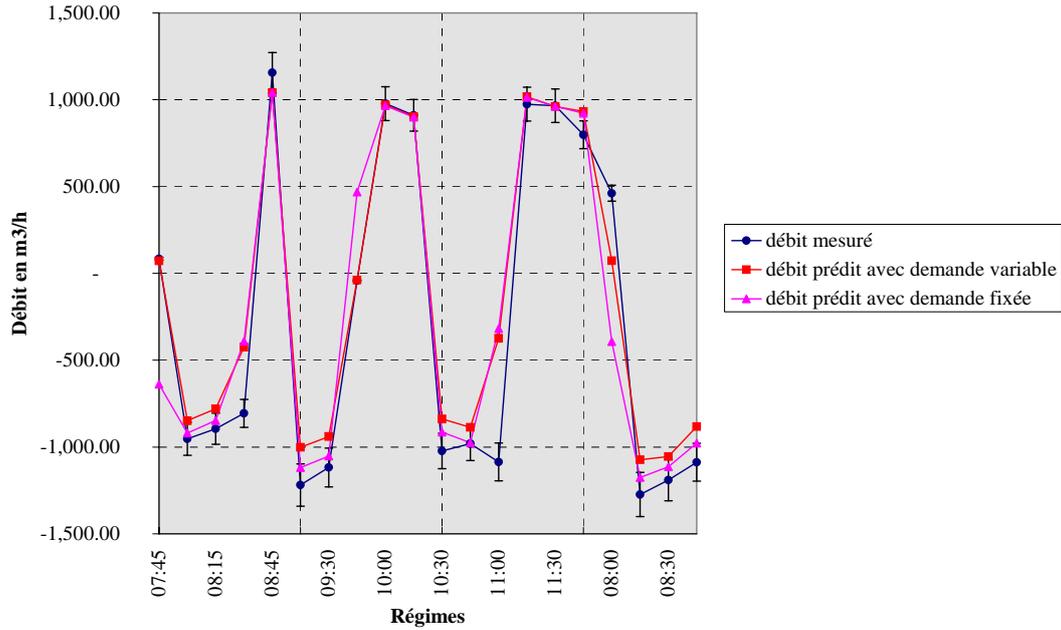


figure 14 : prédiction MCP du débit pour la production des réservoirs de Romainville

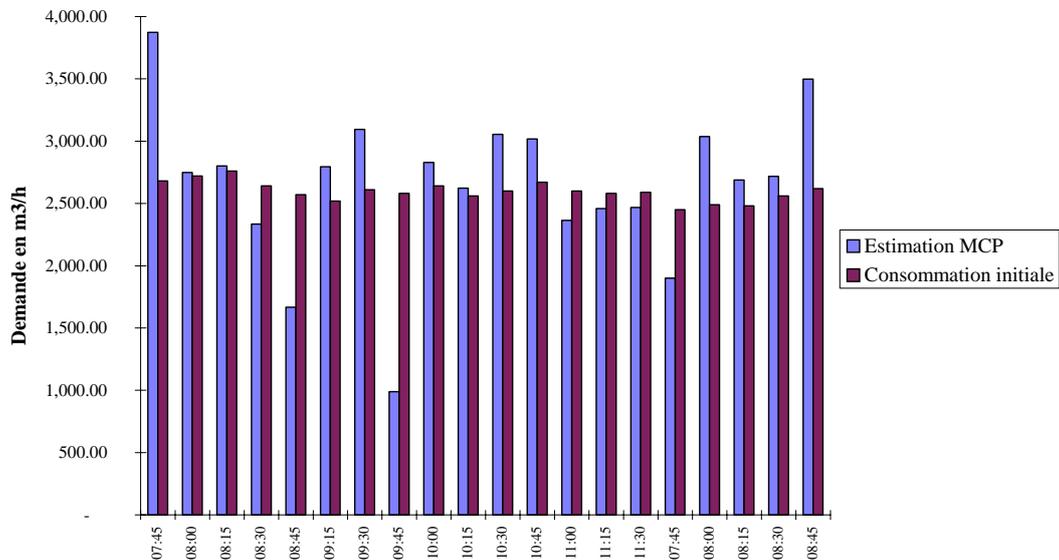


figure 15 : estimation MCP de la demande globale

Comme pour les calculs MCO, on constate que l'introduction d'une consommation au point 10 n'améliore que la prédiction de la charge au noeud 10 (cf. figure 16). Malheureusement, la prédiction des autres charges s'en trouve détériorée : l'erreur moyenne sur les charges passe à plus de 25 mCE.

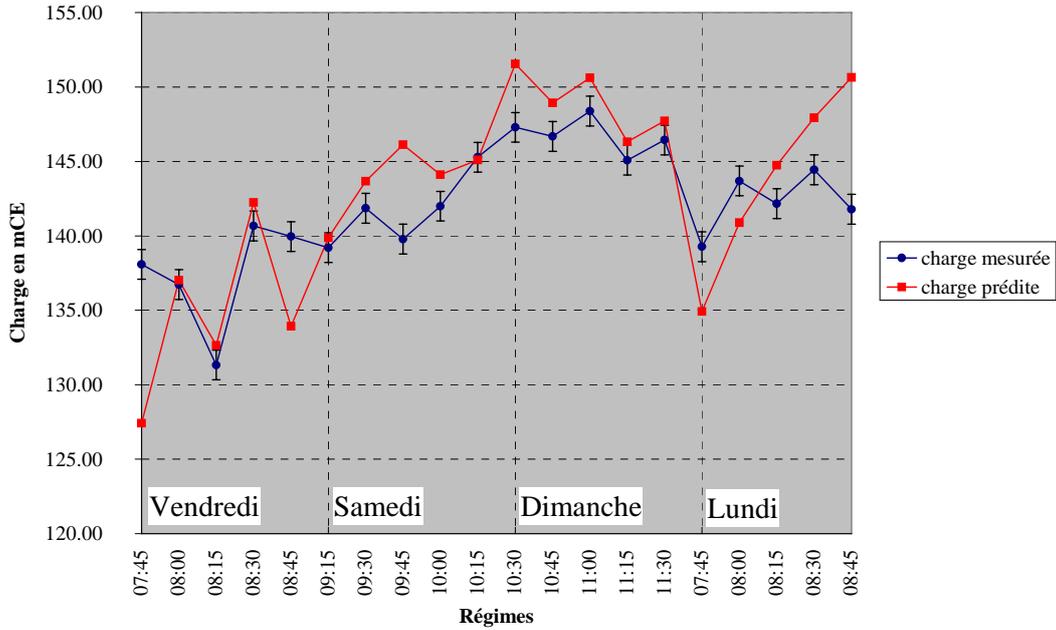


figure 16 : estimation MCP de la charge au noeud 10

La consommation en 10 (cf. figure 17) est difficilement interprétable comme débit seul non répertorié. Il faut sans doute conjuguer à ce phénomène une perte de charge singulière non répertoriée par le modèle.

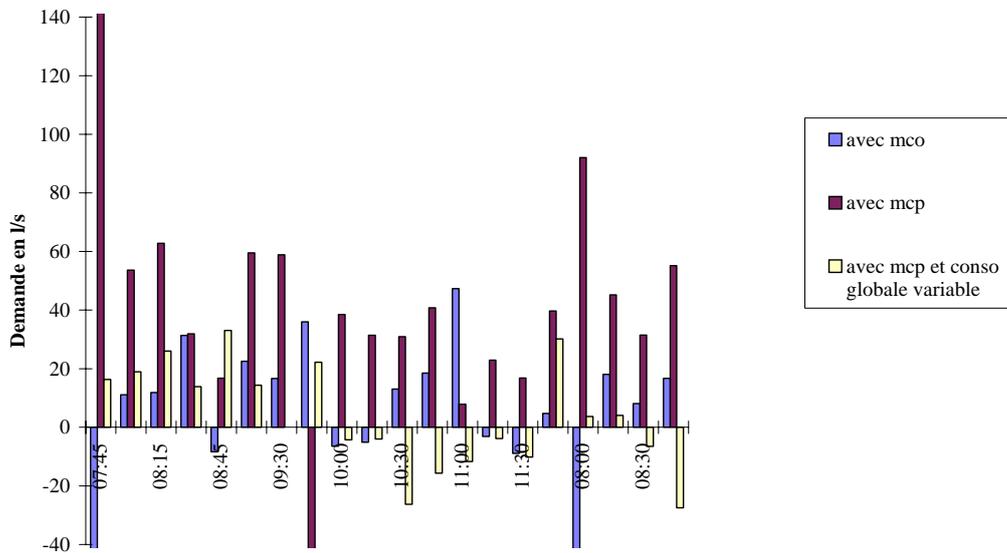


figure 17 : estimations de la consommation au noeud 10

### 7.1.1.3. Conclusion

Si l'on utilise pour le calage, toutes les mesures à notre disposition plusieurs remarques s'imposent :

- Il n'est pas possible de mettre en défaut l'estimation initiale des coefficients de rugosité. Le résultat peut être légèrement différent mais il n'apporte pas plus d'adéquation au jeu de mesures.
- En s'imposant un débit au noeud 10, on améliore l'estimation de la charge en ce noeud, mais on perd en précision par ailleurs.

Pour terminer notre analyse sur la première campagne, il nous a paru nécessaire de lancer les mêmes calculs sans la mesure de pression en 10 et sans la mesure de débit au point G lesquelles posaient problème pour la modélisation.

## 7.1.2. Sans mesure de pression en 10 et mesure de débit en G

### 7.1.2.1. Résultats MCO

Sur le tableau 15 sont consignés les résultats du calage MCO du réseau de l'usine de Montreuil. La baisse maximum observée de la SCER est de 11%. Elle n'est pas significative. Le meilleur modèle est le modèle le plus emboité, I.e : pour lequel tous les paramètres sont à leur estimation initiale.

<i>Conso globale</i>	<i>F2b, AR FR, BO, PVC</i>	<i>F1a, F1b,F2a</i>	<i>SCER</i>	<i>CMr débit /ddl</i>	<i>CMr charge /ddl</i>	<i>EM débit l/s</i>	<i>EM charge mCE</i>
<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	414,620	1405.1 (295)	0.58 (220)	37.48	0.76
<b>fixée</b>	137.3	<b>95.0</b>	414,211	1408.5 (294)	0.56 (219)	37.53	0.75
<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	95.0	414,620	1409.8 (294)	0.58 (219)	37.55	0.76
<b>fixée</b>	137.3	94.0	414,228	1413.3 (293)	0.57 (218)	37.59	0.75
variable	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	370,304	1346.1 (275)	0.65 (200)	36.69	0.80
variable	<b>136.0</b>	94.9	370,314	1351.0 (274)	0.65 (199)	36.76	0.81
variable	137.7	<b>95.0</b>	366,745	1338.0 (274)	0.63 (199)	36.58	0.79
variable	138.9	99.9	366,781	1343.0 (273)	0.67 (198)	36.65	0.82

**tableau 15** : Résultats MCO pour la première campagne sans 10 et G

Les charges sont reproduites de façon satisfaisante : l'erreur résiduelle moyenne est ici de 0.76 mCE. La prédiction initiale de la charge au noeud 8 est celle de la figure 9 du §7.1.1.1.

Les débits sont également bien représentés par le modèle : l'erreur résiduelle moyenne est de 37.5 l/s. Cependant, les valeurs prédites ne sont pas sur tous les points de mesure en dessous des 10% de la valeur mesurée : les débits sur le point B1 (figure 18) et sur le point D1 (figure 19) ne répondent pas à ce critère d'adéquation.

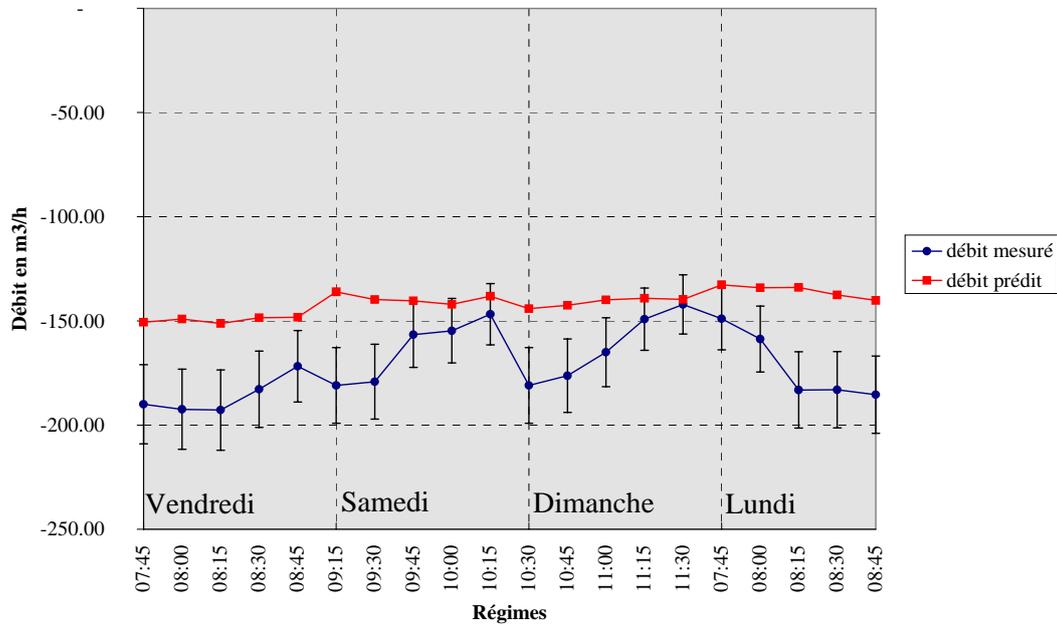


figure 18 : prédiction initiale du débit pour le point B1

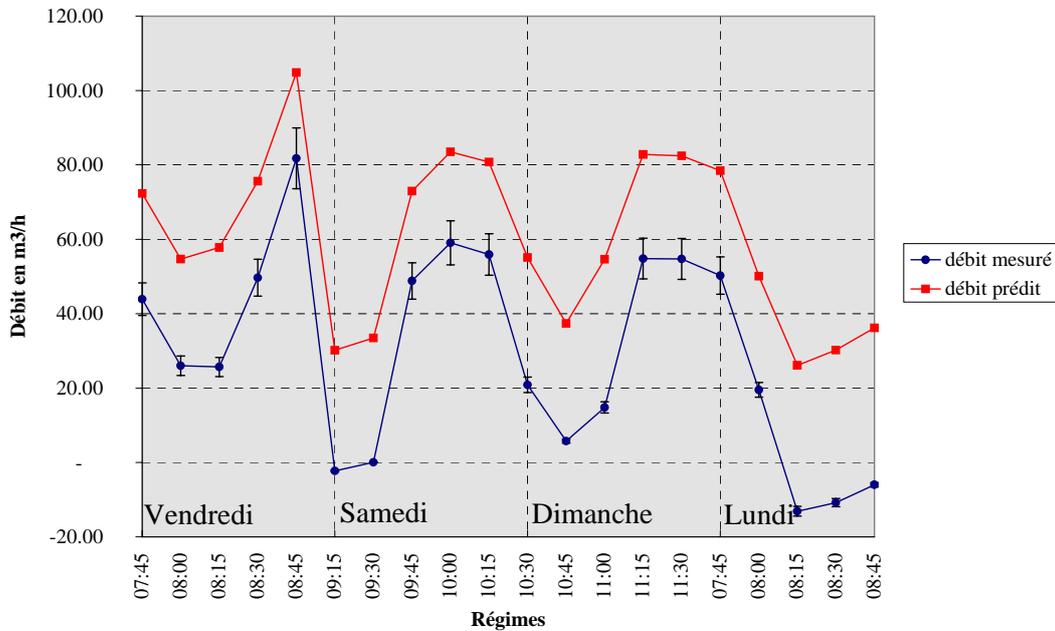
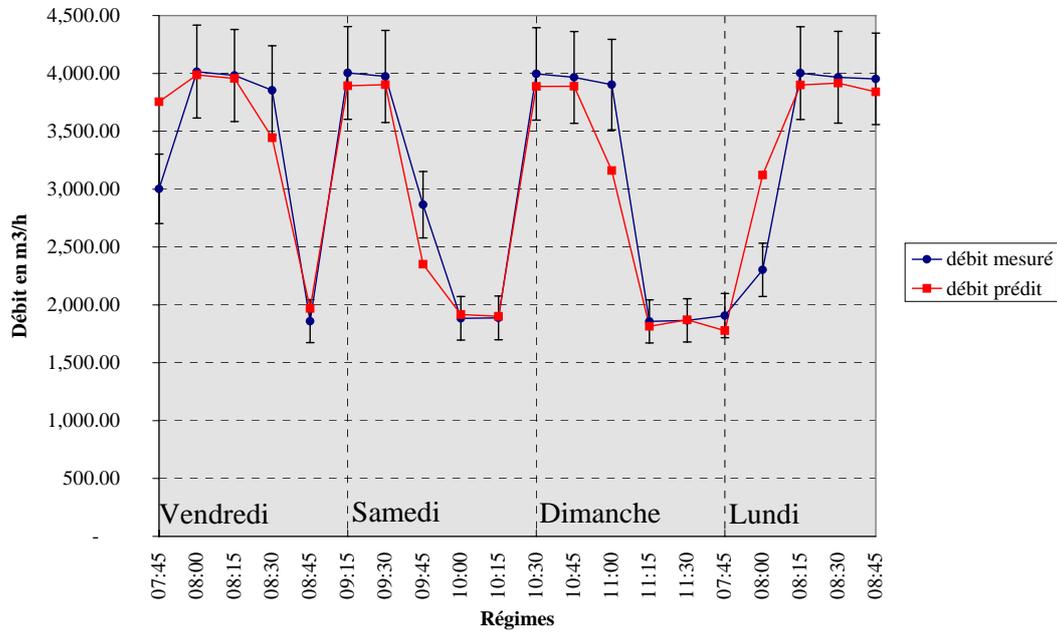


figure 19 : prédiction initiale du débit pour le point D1

Les productions et grands transits sont très bien reproduits comme le montre la figure 20 sur la prédiction de la production de l'usine de Montreuil.



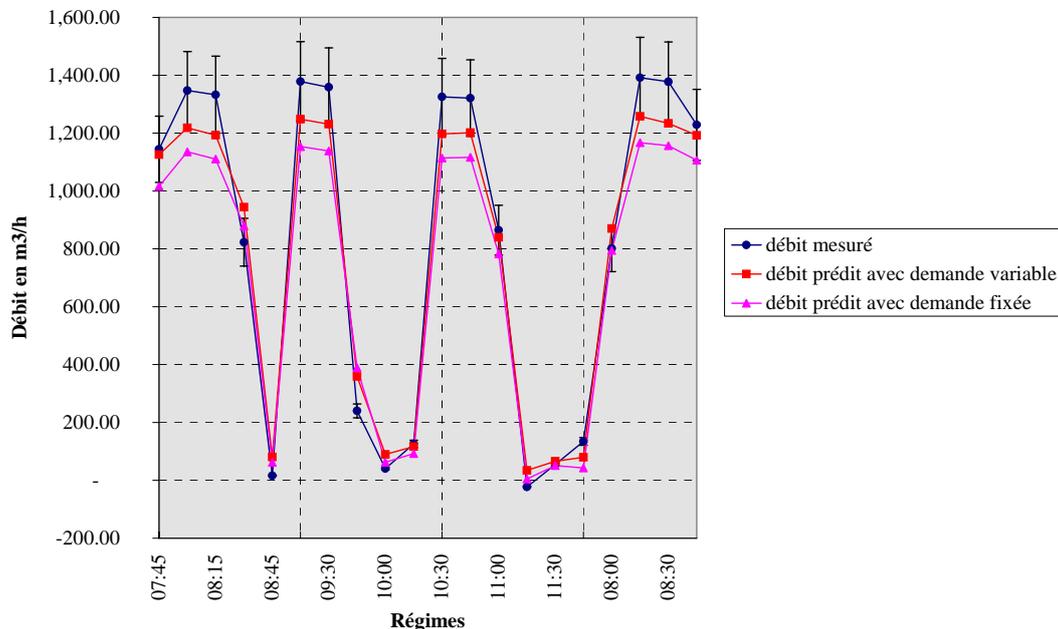
**figure 20** : prédiction initiale du débit pour la production de l'usine de Montreuil

### 7.1.2.2. Résultats MCP

Sur le tableau 16, correspondant aux différents résultats MCP sur le jeu de mesure sans la charge au noeud 10 et le débit au point G, on peut constater une baisse significative de  $SCE^P_r$  à l'introduction de la demande globale variable. Comme pour les résultats MCP avec toutes les mesures, on observe de bons résidus sur le point A (figure 21) et la production de R1+R2 (figure 14) et à de mauvais résidus pour le reste des débits observés et pour toutes les charges.

Conso globale	F2b, AR		$SCE^P_r$	$CM^P_r$ débit /ddl	$CM^P_r$ charge /ddl	EM débit l/s	EM charge mCE
	FR, BO, PVC	F1a, F1b,F2a					
<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	3,089,093	10469.8 (295)	2.30 (220)	37.48	0.76
<b>fixée</b>	120.7	<b>95.0</b>	3,082,221	10480.5 (294)	4.40 (219)	41.51	1.05
<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	125.9	3,082,103	10480.4 (294)	4.01 (219)	37.71	1.00
<b>fixée</b>	120.3	113.1	3,071,516	10480.3 (293)	3.65 (218)	41.76	0.96
variable	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	87,285	308.1 (275)	12.92 (200)	56.83	1.80
variable	<b>136.0</b>	96.7	86,879	307.9 (274)	12.65(199)	56.95	1.78
variable	130.7	<b>95.0</b>	85,888	303.9 (274)	13.21 (199)	55.70	1.82
variable	130.2	92.4	86,506	306.8 (273)	13.94 (198)	55.73	1.87

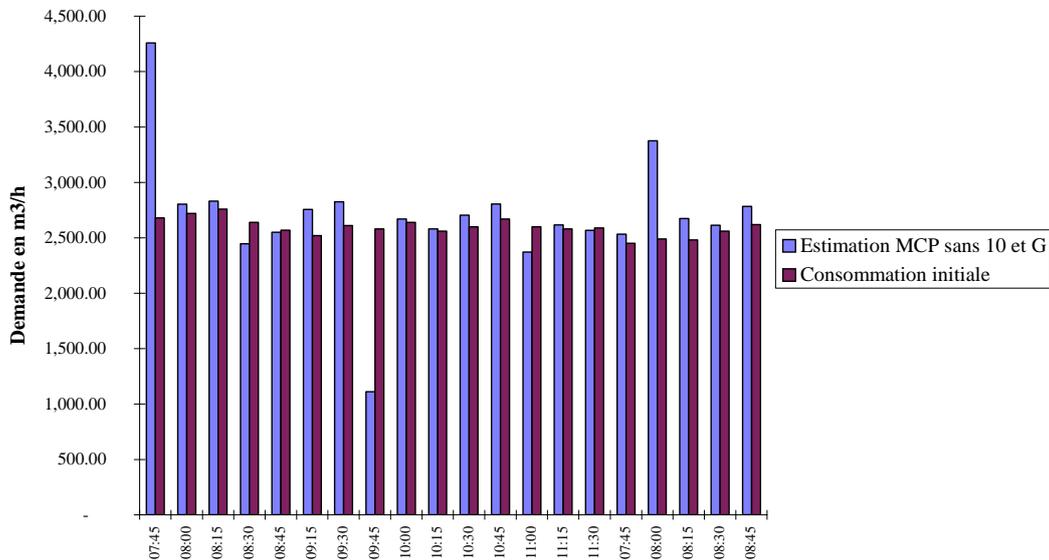
**tableau 16 : Résultats MCP pour la première campagne sans 10 et G**



**figure 21 : prédiction MCP du débit pour le point A**

Les erreurs moyennes sur les charges et les débits (EM) sont moins bonnes : elles passent de 37.48l/s à 56.81/s et de 0.76 mCE à 1.8 mCE.

Sur la figure 22 on compare l'estimation MCP de la demande globale avec l'estimation initiale. Le vendredi à 7h45, le samedi à 9h45 et le lundi à 8h on observe une forte augmentation ou une forte baisse de la consommation globale estimée (courbe bleue).



**figure 22** : estimation MCP de la demande globale sans 10 et G

Ces fortes variations vont se répercuter sur l'ensemble des prédictions sur les débits et les charges. Par exemple, sur les prédictions du débit au point H (figure 23) et de la charge au noeud 1 (figure 24). on observe trois anomalies pour les trois estimations anormales de la demande globale.

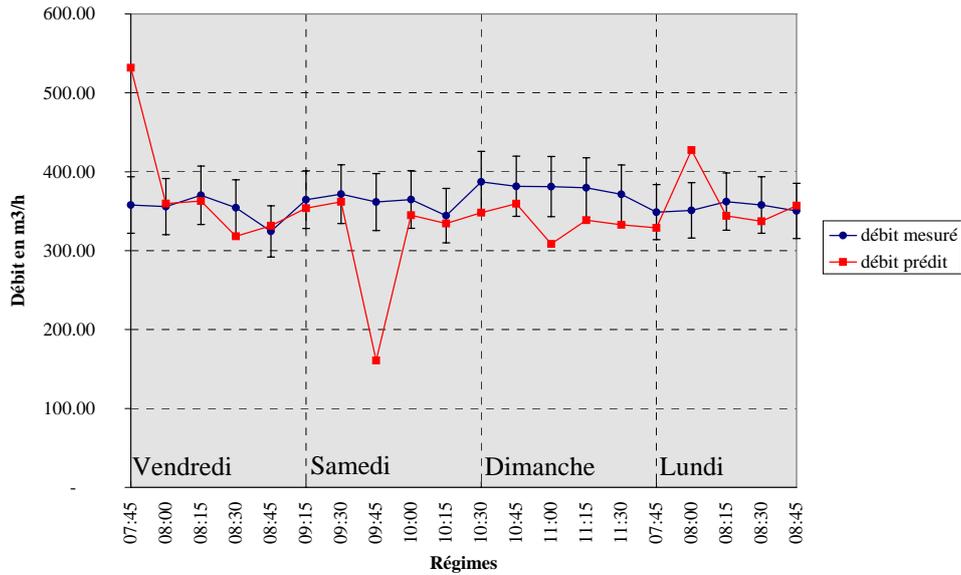


figure 23 : prédiction MCP du débit pour le point H

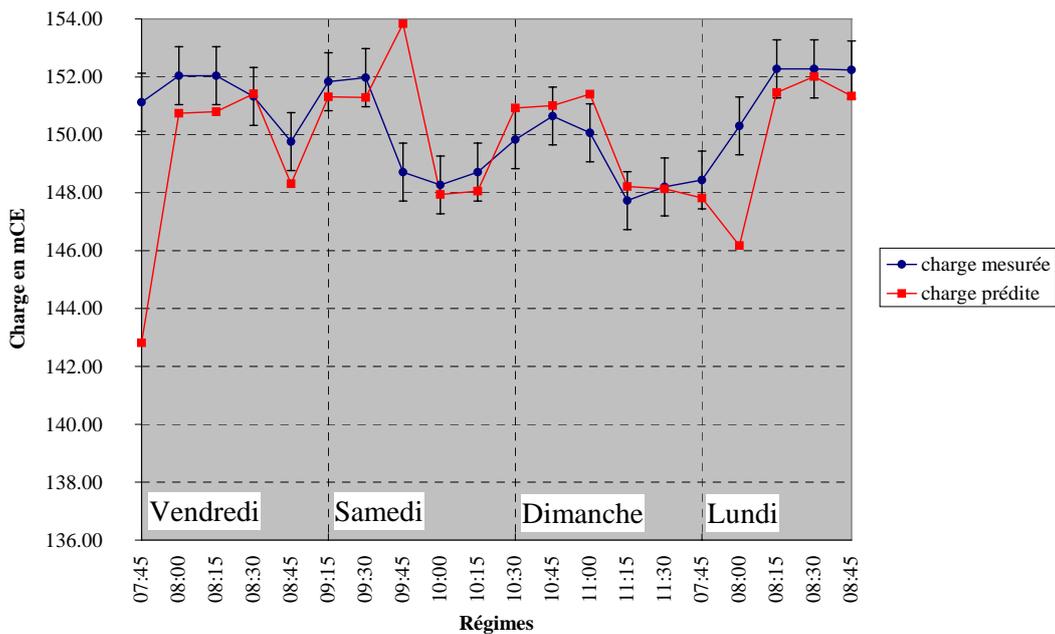


figure 24 : prédiction MCP la charge au noeud 1

### 7.1.3. Conclusion sur les résultats de la première campagne de mesures

La schématisation du réseau, le choix des classes de mesures et d'abonnés, l'emplacement des mesures et la précision des valeurs mesurées ne permettent pas d'estimer des valeurs de rugosités et de demandes qui conduiraient à une meilleure précision que les valeurs initiales.

Les prédictions MCP sur le jeu du poids associé à chaque mesure permettent avec la demande globale d'améliorer la situation au niveau des réservoirs de Romainville en A et en R1+R2 au dépend des autres points de mesures. L'estimation de la demande induite ne remet pas en question l'estimation initiale puisqu'elle ne satisfait pas à la majorité des points de mesure.

Si on enlève au jeu de mesures, celles de la charge au noeud 10 et du débit au point G, les estimations initiales des rugosités et de la demande globale conduisent à de bonnes prédictions pour les charges (l'erreur moyenne est à 0.76 mCE) et pour les débits (l'erreur moyenne est à 37.5 l/s).

Pour terminer l'estimation des coefficients de rugosité présentons le résultat des estimations de la seconde campagne de mesure. La sectorisation du réseau oblige l'eau à parcourir un long chemin pour aller des réservoirs de Romainville aux noeuds 1,2,3 et 4 par des fermetures de vannes. Elle permet de confronter le même jeu de mesures à une nouvelle configuration du réseau pour laquelle les pertes de charges sont plus importantes.

## 7.2. Résultats deuxième campagne de mesure

### 7.2.1. Avec toutes les mesures

#### 7.2.1.1. Résultats MCO

Sur le tableau 17, ci-dessous on peut constater que l'introduction de variables supplémentaires ne fait pas baisser significativement le critère des moindres carrés. Tout au plus la SCER baisse de 22%, l'erreur moyenne sur les charges augmentant et l'erreur moyenne sur les débits diminuant de 1 l/s.

<i>Conso globale</i>	<i>F2b, AR</i>		<i>SCER</i>	<i>CMr débit /ddl</i>	<i>CMr charge /ddl</i>	<i>EM débit l/s</i>	<i>EM charge mCE</i>
	<i>FR, BO, PVC</i>	<i>F1a, F1b,F2a</i>					
<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	53,018	188.5 (280)	0.99 (240)	13.73	1.00
<b>fixée</b>	132.4	<b>95.0</b>	49,142	175.2 (279)	1.09 (239)	13.24	1.04
<b>fixée</b>	<b>136.0</b>	75.1	41,153	145.4 (279)	2.43 (239)	12.06	1.56
<b>fixée</b>	134.9	77.4	41,184	146.2 (278)	2.29 (238)	12.09	1.51
variable	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	52,772	202.0 (260)	1.11 (220)	14.21	1.06
variable	<b>136.0</b>	74.2	41,594	158.2 (259)	2.80 (219)	12.58	1.67
variable	132.3	<b>95.0</b>	49,197	188.9 (259)	1.26 (219)	13.74	1.12
variable	134.8	76.3	41,616	159.0 (258)	2.68 (218)	12.61	1.64

**tableau 17 : Résultats MCO pour la seconde campagne**

L'estimation des rugosités sur le quatrième essai (ligne 4 du tableau 17) est présentée sur le tableau 18 suivant. La consommation initiale est fixée à partir du bilan sur les grands transits. Entre parenthèses apparaissent les rugosités équivalentes en mm.

Classe de rugosité	Valeur initiale	Estimation
F2b, AR, FR, BO et PVC	136 (0.10 mm)	134.9 (0.13 mm)
F1a, F1b, F2a	95 (2.00 mm)	77.4 (3.6 mm)

**tableau 18** : estimation MCO des coefficients de rugosité pour la seconde campagne

La SCER obtenue de 41184 n'est pas significativement différent de la SCER initiale de 53018. Un test de Fisher conduit en effet au calcul de :

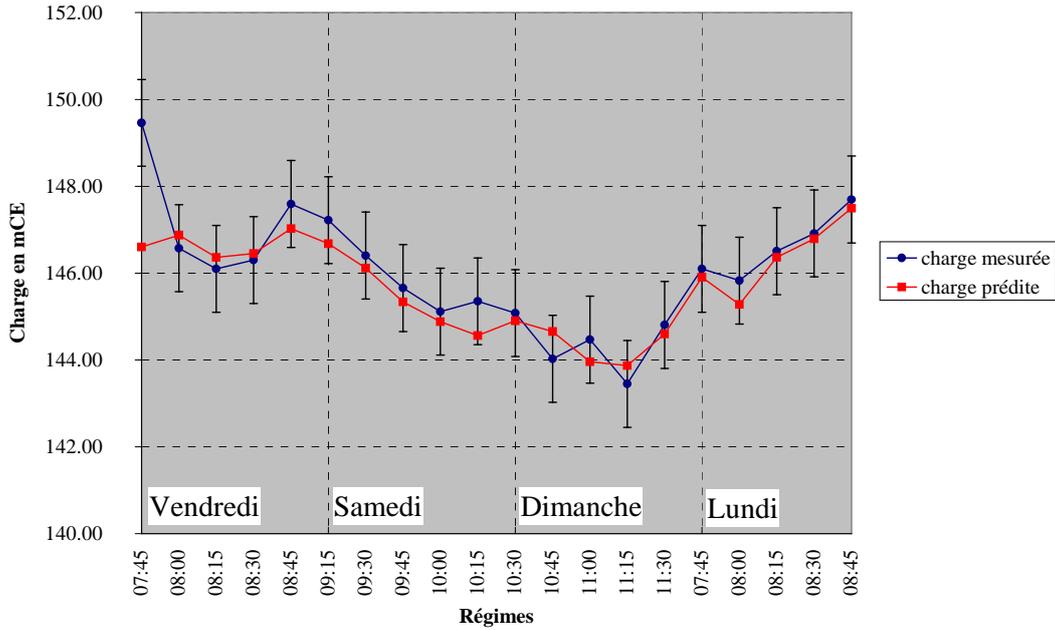
$$\frac{53018 - 41184}{41184} = 0,228$$

qui pour une variable de Fisher avec 2 degrés de liberté au numérateur et 513 au dénominateur a 63% de chance d'être dépassée.

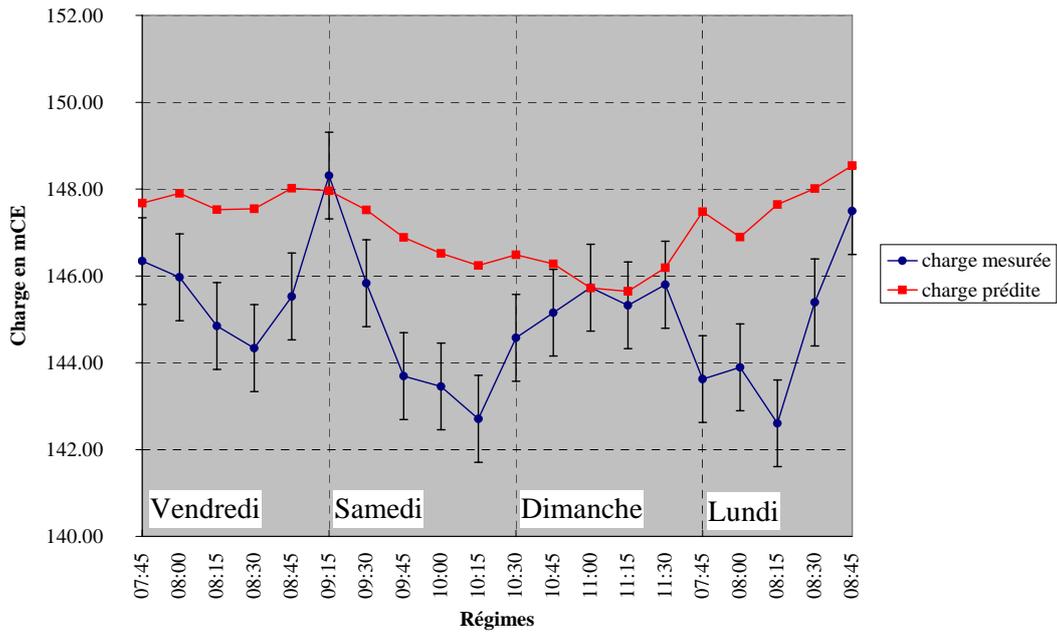
C'est pourquoi, on peut affirmer que l'estimation 134,94/77,4 n'est pas significativement différent de 136/95.

Avec les rugosités et la demande globale initiales, l'erreur moyenne sur les charges est de 1 mètre. On constate une amélioration par rapport à la première configuration de l'erreur résiduelle sur le débit qui descend à 13 l/s.

Les points pour lesquels la charge est la plus basse sont les points 10 et 3. La prédiction pour le noeud 3 (figure 25) est satisfaisante. Il n'en est pas de même pour le noeud 10 (figure 26) la charge prédite étant surestimée par moment de plus de 4 mCE.



**figure 25** : prédiction initiale de la charge au noeud 3 pour la seconde campagne de mesure



**figure 26** : prédiction initiale de la charge au noeud 10 pour la seconde campagne de mesure

Le vendredi à 8h15, la charge chute de 3m à 5m pour de nombreux points de pression. Voir par exemple, la charge du noeud 2 sur la figure 27. La demande globale initiale ne tient pas compte de cette consommation ponctuelle.

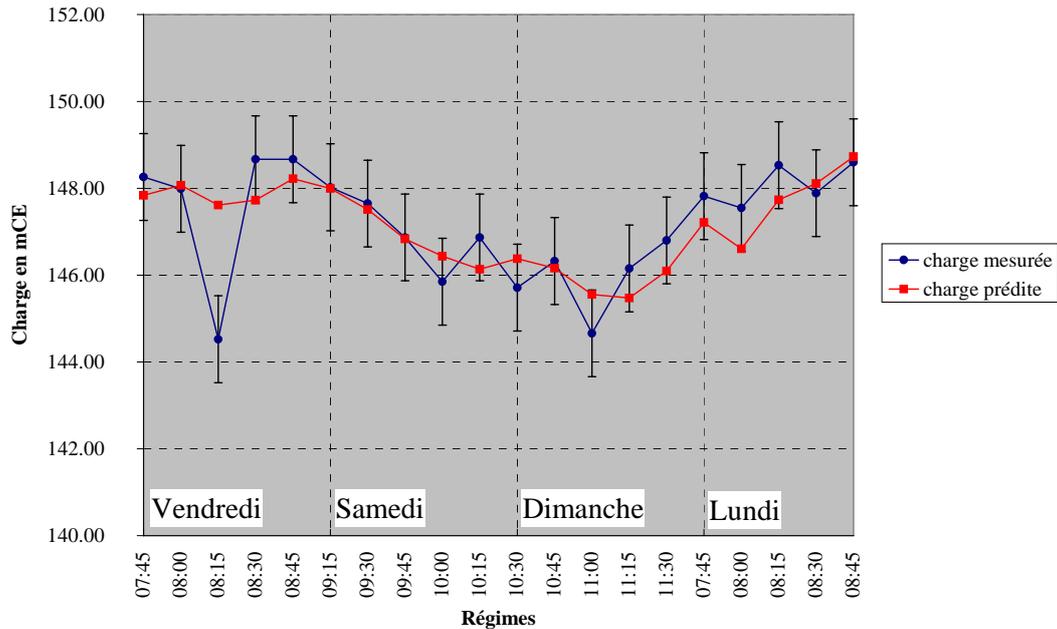


figure 27 : prédiction initiale de la charge au noeud 2 pour la seconde campagne de mesure

### 7.2.1.2. Résultats MCP

Comme pour la première campagne, il faut l'introduction de poids et l'introduction de la demande globale variable pour constater une amélioration du critère des moindres carrés.

Conso globale	F2b, AR		SCE <sup>Pr</sup>	CM <sup>Pr</sup> débit /ddl	CM <sup>Pr</sup> charge /ddl	EM débit l/s	EM charge mCE
	FR, BO, PVC	F1a, F1b,F2a					
fixée	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	424,824	1513.8 (280)	3.98 (240)	13.73	1.00
fixée	128.4	<b>95.0</b>	257,448	918.1 (279)	5.41 (239)	14.11	1.16
fixée	<b>136.0</b>	68.2	243,380	859.1 (279)	15.40 (239)	12.25	1.96
fixée	132.5	78.2	240,898	857.7 (278)	10.29 (238)	12.43	1.60
variable	<b>136.0</b>	<b>95.0</b>	65,780	246.2 (260)	8.08 (220)	17.05	1.42
variable	<b>136.0</b>	70.5	48,954	176.3 (259)	15.04 (219)	15.77	1.94
variable	139.8	<b>95.0</b>	64,858	243.3 (259)	8.47 (219)	19.22	1.45
variable	130.2	66.3	47,500	170.4 (258)	16.20 (218)	18.91	2.01

tableau 19 : Résultats MCP pour la seconde campagne

Les écarts observés entre estimation MCP de la demande et estimation initiale reportées sur le diagramme de la figure 28 correspondent à la variation de la demande globale nécessaire au rapprochement de la production des réservoirs de Romainville (figure 29).

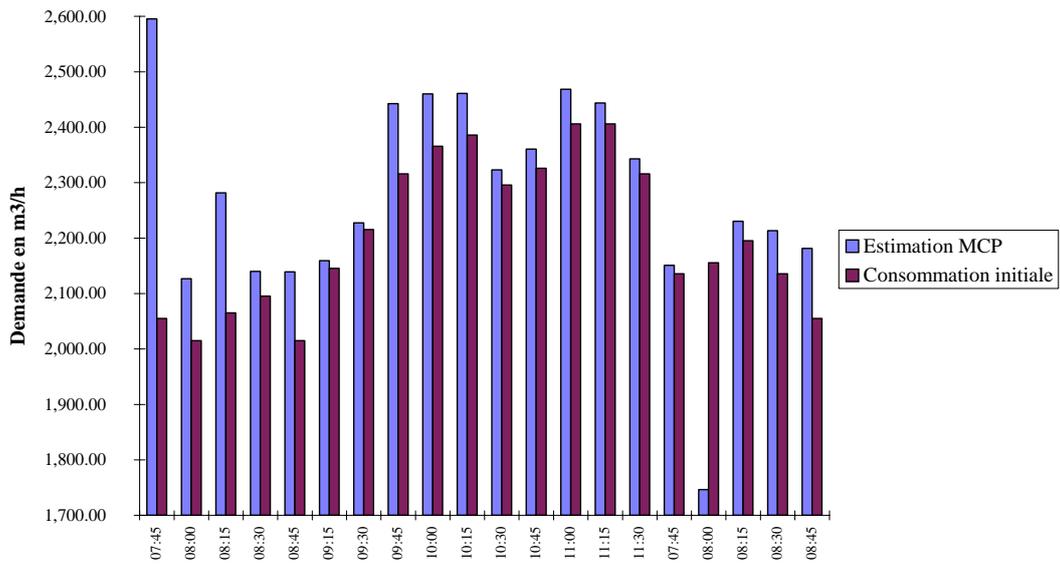


figure 28 : prédiction MCP de la demande globale pour la seconde campagne de mesure

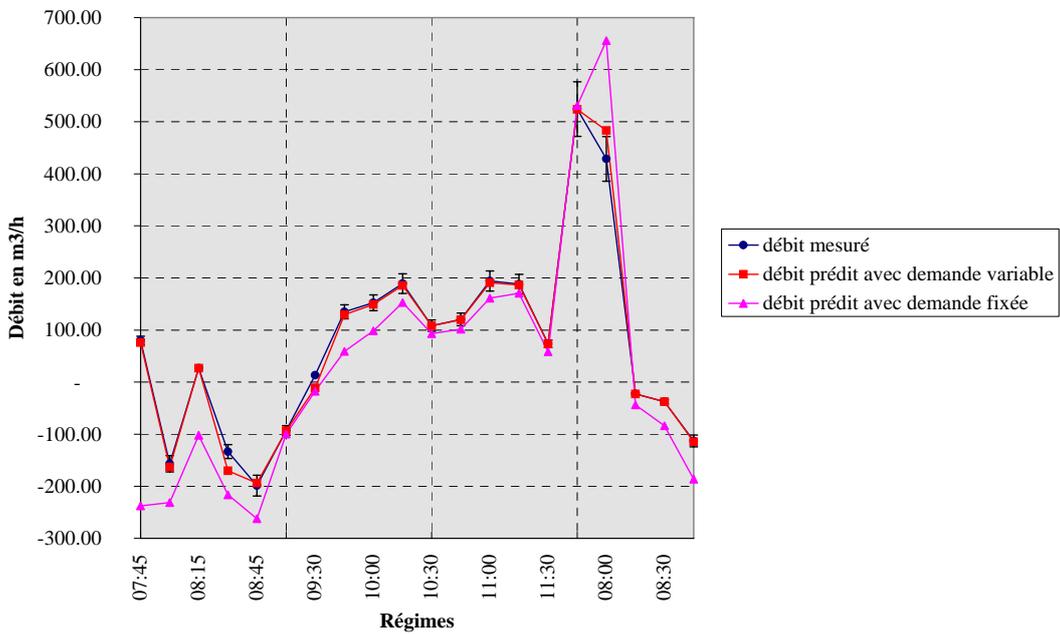
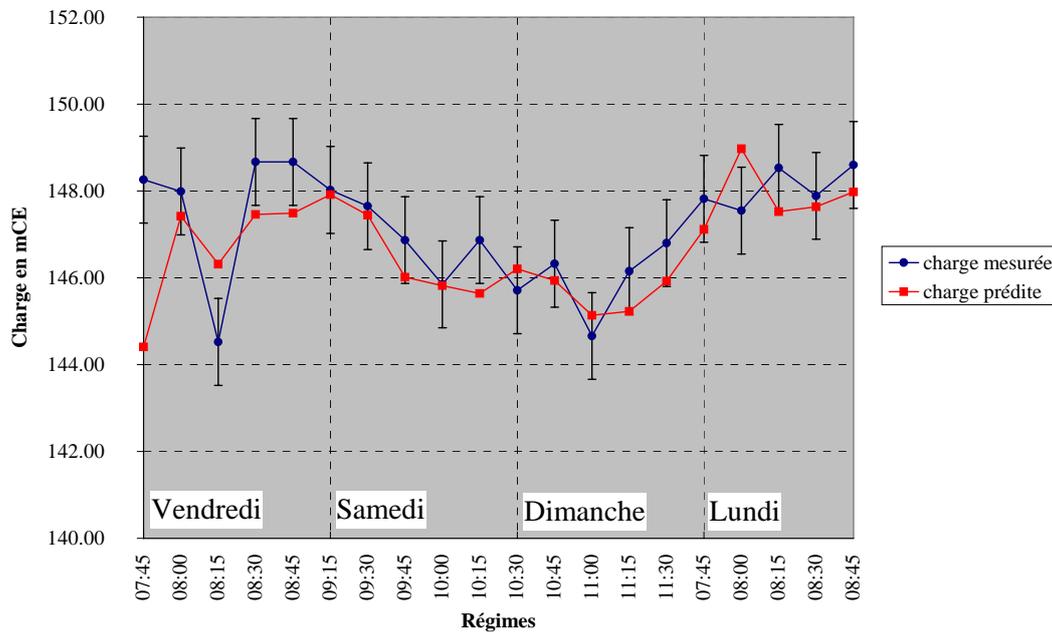


figure 29 : prédiction MCP du débit pour la production des réservoirs de Romainville pour la seconde campagne de mesure

Ainsi, on constate une forte augmentation de la demande globale le vendredi à 7h45 et 8h15 et à une forte baisse le lundi à 8h00. Ces fluctuations vont influencer la prédiction des

charges où l'on retrouve les trois pics. Sur le graphe de la figure 30 pour prédiction MCP de la charge au noeud 2 le phénomène est bien marqué.



**figure 30** : prédiction MCP de la charge au noeud 2 pour la seconde campagne de mesure avec estimation de la demande globale

Les estimations MCP des rugosités, plutôt pessimistes comme le montre le tableau 19 tirent les prédictions des charges vers le bas. Sur la figure 31, la charge prédite au noeud 2 est 2 mCE en dessous de la charge mesurée.

Les prédictions des petites mesures de débits, comme par exemple celui du débit en G figure 32 et celui du débit en D1 figure 33 ne donnent pas satisfaction.

Le débit moyen mesuré de 3.5 l/s au point G ne peut s'expliquer par la consommation de quelques abonnés. Il correspond sans doute à un débit de fuite non répertorié.

Le débit prédit au point D1 est surestimé. La tendance de la courbe mesurée est bien respectée. Il faut cependant remarquer que le débit transitant par D1 dessert en partie le réservoir des Lilas par une conduite en fonte non revêtue posée avant 1945 de diamètre 300 mm (F1b) et que classer cette conduite dans l'une des deux classes de conduites globales au réseau ne représente sans doute pas la réalité : pour qu'il passe moins de débit il faut que la rugosité locale soit plus forte.

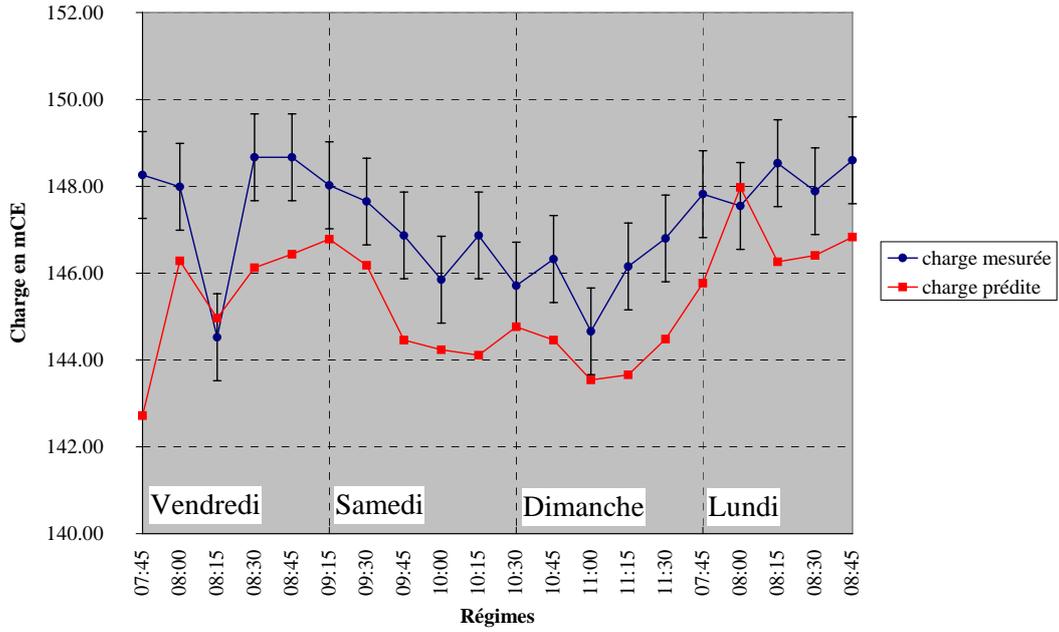


figure 31 : prédiction MCP de la charge au noeud 2 pour la seconde campagne de mesure avec estimation de la demande globale et des rugosités

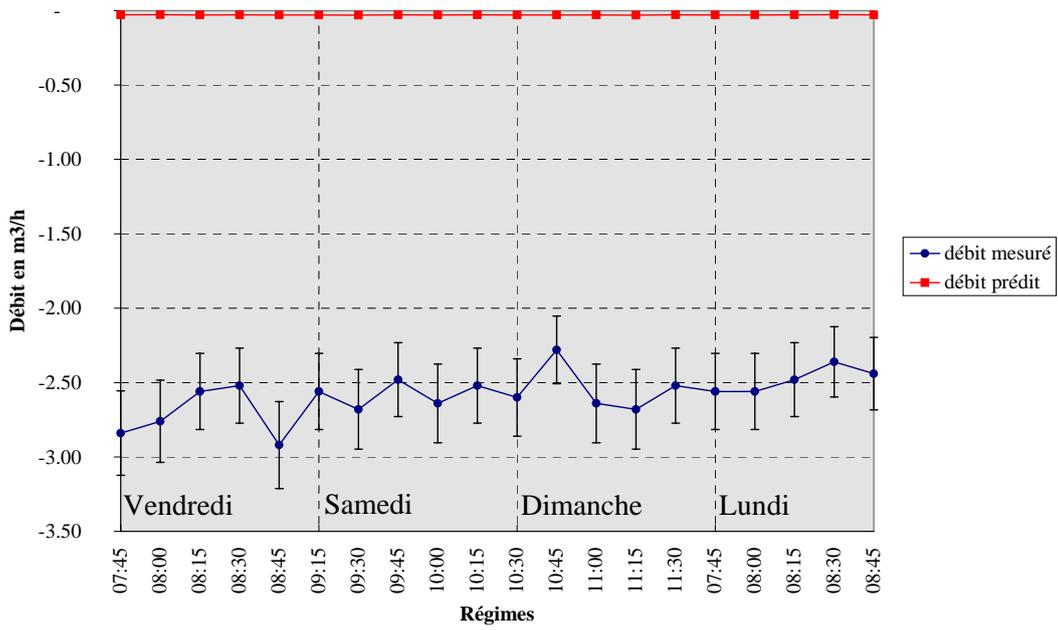


figure 32 : prédiction MCP du débit au point G pour la seconde campagne de mesure

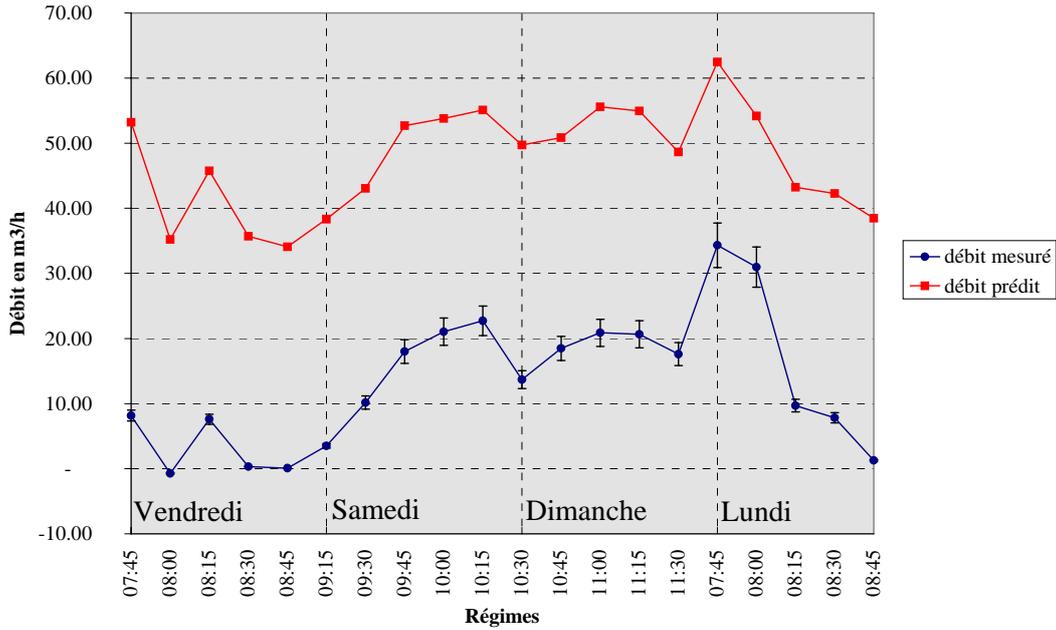


figure 33 : prédiction MCP du débit au point D1 pour la seconde campagne de mesure

La prédiction MCP du débit au point B2 (figure 34) à partir des estimations de la demande et des deux classes de rugosité est bien meilleure avec l'introduction des rugosités inconnues que la prédiction initiale qui restait à -30 l/s. On peut s'interroger si un tel point de mesure de moindre importance pour l'hydraulique du réseau n'introduirait pas ici un biais pour l'estimation.

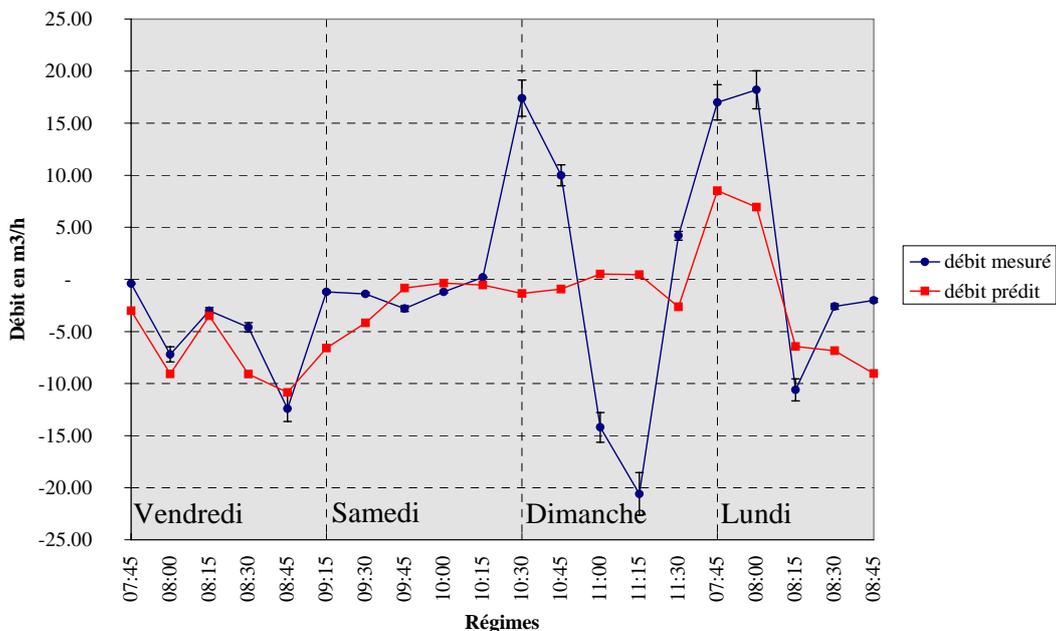


figure 34: prédiction MCP du débit au point B2 pour la seconde campagne de mesure

### **7.2.1.3. Conclusion**

Sur la seconde campagne de mesure, on peut constater globalement une meilleure prédiction des débits à 13 l/s en moyenne de la valeur mesurée. La sectorisation du réseau a certainement conduit à un comportement hydraulique plus simple, plus facilement modélisable.

La différence de perte de charge maximum observée sur le réseau est de 10 mCE. Elle correspond à la différence entre la charge du point de refoulement de la station de pompage de l'usine de Montreuil qui est environ de 154 m, et celle du point 3 (figure 25) qui peut descendre ponctuellement à 144 mCE. Les charges mesurées aux noeuds sont en moyenne à 5 mCE en dessous du niveau du réservoir de Romainville ce qui n'était pas le cas de la première configuration. Les pertes de charge ont donc bien été accentuées de par la sectorisation du réseau mais sans affiner l'estimation initiale des rugosités.

L'estimation initiale des rugosités décrite par le tableau 13 permet de reproduire les charges à 1 mCE en moyenne. La charge au noeud 10 fait une nouvelle fois exception même si les écarts ne sont plus que de 4 mCE (cf. figure 26). La confrontation du jeu de mesures au modèle ne permet pas de meilleure estimation que l'estimation initiale.

Nous allons dans le paragraphe suivant étudier l'influence des mesures de débit en les ôtant progressivement.

### **7.2.2. Etude de l'influence des mesures de débit sur l'estimation des rugosités**

Quatre configurations de mesures sont reportées dans le tableau 20 :

- la première est constituée du jeu de mesures débit et charge complet.
- trois mesures de petits débits ne semblaient pas après analyse (cf §7.2.1.2) des plus importantes : celles des débits aux points G, D1 et B2 (figures 32, 33 et 34). Elles sont ôtées du jeu de mesures. Les mesures restantes composent le deuxième jeu de mesures.
- La troisième configuration correspond aux mesures des productions aux réservoirs de Romainville et des Lilas et à l'usine de Montreuil et aux mesures de pression. Celle-ci étant toujours disponible lors d'une campagne de mesures.
- La dernière configuration de mesures est celle ne comportant que des charges.

La demande globale est fixée et égale à l'estimation à partir du bilan sur les productions. Nous avons en effet remarqué dans les précédents paragraphes que l'introduction d'une demande globale variable n'améliorait pas la qualité des prédictions MCO et MCP excepté pour celle du débit sortant du réservoir de Romainville (production de R1+R2).

On s'intéresse ici aux précisions sur les estimations et non aux estimations des rugosités elles-même qui ne sont pas plus pertinentes que les estimations initiales. Le nombre donné, par exemple 0.85 pour une estimation MCO du coefficient de rugosité de la première classe avec toutes les mesures de débits, est obtenu par linéarisation des équations. Cet encadrement par approximation du premier ordre, obtenu par inversion de la matrice de sensibilité (cf Piller, 1995) est des plus exact pour de petites valeurs : les équations en jeu pour le fonctionnement d'un réseau d'eau potable sont par nature non linéaires (conservation de l'énergie). La précision donnée est à considérer comme une mesure de la qualité de l'estimation : une estimation à  $\odot$  2.40 est plus précise qu'une estimation à 5.77. Elle tient compte d'une dispersion autour d'une valeur moyenne.

	MCO		MCP	
	F2b, AR FR, BO, PVC	F1a, F1b, F2a	F2b, AR FR, BO, PVC	F1a, F1b, F2a
<b>avec toutes les mesures de débits</b>	134.9 $\pm$ 0.85 0.13 mm	77.4 $\pm$ 2.58 3.6 mm	132.5 $\pm$ 2.40 0.19 mm	78.2 $\pm$ 4.43 3.53 mm
<b>sans 3 mesures de petits débits</b>	134.5 $\pm$ 0.81 0.14 mm	78.9 $\pm$ 2.50 3.55 mm	128.6 $\pm$ 2.35 0.27 mm	92.9 $\pm$ 5.10 2.19 mm
<b>en gardant les mesures des productions</b>	112.9 $\pm$ 2.51 0.65 mm	197.8 $\pm$ 22.3 0.00 mm	103.2 $\pm$ 5.77 1.25 mm	321.7 $\pm$ 38.00 0.00 mm
<b>sans mesures de débits</b>	124.5 $\pm$ 59.96 0.35 mm	116.0 $\pm$ 86.16 0.50 mm	124.5 $\pm$ 59.96 0.35 mm	116.0 $\pm$ 86.16 0.50 mm

**tableau 20** : Estimations des rugosités pour la seconde campagne

Sur le tableau 20, il faut tout d'abord observer une plus mauvaise estimation par intervalle du critère MCP, l'erreur sur l'estimation étant le plus souvent du double. Pour la dernière configuration les estimations MCO et MCP sont les mêmes car les poids sont identiques et égaux à 0.5 mCE. La nature du jeu de mesures et la qualité des poids associés aux mesures peut introduire un biais plus ou moins important sur l'estimation,

i.e : avec plusieurs jeux de valeurs, mesurées dans la plage donnée par la précision, en moyenne, on n'estime pas la vraie valeur. Pour le calage du réseau de l'usine de Montreuil, mettre tous les poids à un (pour le critère MCO) introduit un biais moins important que de se servir des précisions a priori des mesures.

Entre la première et la deuxième configuration on ne constate pas de baisse de la précision, ce qui montre que les trois mesures de débits enlevées ne sont pas importantes ou influantes pour les estimations et les prédictions.

Nous n'avons pas remarqué pour le retrait de chacune des huit autres mesures de débit une baisse significative de la qualité de l'estimation. Il faut juger de la soustraction globale : entre les configurations un et deux et la configuration trois, on passe de 2.5 à 22.3 pour la précision des estimations MCO des coefficients de rugosité de la seconde classe de rugosité. L'estimation de ce coefficient de rugosité par lui-même montre qu'il y a une grande imprécision :  $Chw=197$ , ce qui n'est pas une valeur physiquement admissible pour un coefficient de rugosité d'Hazen-Williams usuellement compris dans la plage [60;146].

Les précisions sur les estimations obtenues pour la quatrième configuration de mesure, i.e : sans mesures de débit, laissent à penser qu'il est difficile de se passer de quelques mesures de débit.

## 8. CONCLUSION

Le calage de la modulation de la demande globale a été réalisé, d'une part avec un bilan sur les productions et les consommations mesurées, d'autre part avec le module de calage automatique. On constate que pour les deux campagnes de mesures les courbes de modulations se superposent (figure 6). Ce qui laisse penser qu'il y a suffisamment d'abonnés pour que le comportement statistique moyen ou tendance soit bien estimé. Les estimateurs MCP et MCO ne conduisent pas à des résultats significativement meilleurs. En conséquence de quoi la première méthode d'estimation lui est préférée, car beaucoup moins gourmande en temps d'exécution et en mémoire. Ces remarques ne sont plus vraies dans le cas de plusieurs classes d'abonnés à déterminer.

Les estimations des rugosités que nous retiendrons sont celles du tableau 13 et correspondent aux estimations initiales : c'est-à-dire 0.10 mm ( $Chw = 136$ ) pour la classe de rugosité F2b, AR, FR, PVC et BO et de 2 mm ( $Chw = 95$ ) pour la classe des conduites en fonte de petits diamètres et en fonte ancienne F1a, F2a et F1b. Toute autre estimation peut conduire à une baisse effective du critère des moindres carrés mais pas

significative ; les erreurs moyennes des débits et des charges ne baissent pas. Un test de Fisher permet de tester si l'introduction de paramètres est pertinente. Il est cependant nécessaire que le poids de la mesure corresponde à l'inverse de l'écart-type. Ce qui n'est pas le cas si l'on sous-estime ou surestime les précisions des mesures et donc la dispersion autour des vraies valeurs.

Pour la première campagne de mesure, un problème de modélisation au point 10 a été constaté : la mesure est de 10 mCE en-dessous de la prédiction du modèle Zomayet. L'introduction d'une consommation en ce point et l'utilisation du module de calage automatique, n'a pas permis de le résoudre. On peut incriminer l'emplacement des mesures qui peut être n'était pas optimal et sans doute des pertes de charges singulières ou locales oubliées.

Il a été constaté que la sectorisation du réseau pour la seconde campagne de mesure a effectivement favorisé les pertes de charge. Les erreurs de mesures moyennes sur les débits et les charges sont moins importantes que pour la première configuration, mais les estimations des rugosités ne sont pas, comme pour la première campagne, significativement différentes des estimations initiales.

Augmenter la valeur mesurée par le débitmètre de Boissière de 5%, 10% et 15% n'a pas donné de résultats probants par rapport aux estimations et a conduit à de plus mauvaises prédictions pour certains points. Les résultats ne sont pas spécifiquement présentés dans le rapport d'étude, mais faire varier la demande globale s'interprète aisément comme faire varier la valeur en Boissière.

Il faut remarquer qu'une précédente répartition des conduites suivant cinq classes de rugosité n'a pas permis de caler les coefficients d'Hazen-Williams. C'est après avoir regroupé ces cinq classes en deux classes que l'on arrive à un résultat plus réaliste.

Les prédictions MCP apportent une amélioration pour la production du réservoir de Romainville et la mesure au point A si l'on met la demande globale variable. La précision des mesures de débit avantage certainement ces deux mesures.

L'importance des mesures de débit peut certainement être atténuée par un choix optimal de l'emplacement des mesures, par des manipulations de type ouvertures de poteaux d'incendies et par des sectorisations du réseau. Le choix du nombre, de la nature et de l'emplacement des mesures est nécessaire et primordial : Cette partie peut être menée par simulation. Il est possible de mesurer par des techniques de Monte-Carlo le gain en précision sur l'estimation des paramètres pour le nouveau choix de mesures. Les mêmes techniques permettent de tester différentes configurations de sectorisation.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

M. Carlier, "*Hydraulique générale et appliquée*", éditions Eyrolles, 565 pages, 1986.

O. PILLER, "*Modélisation du fonctionnement d'un réseau - Analyse hydraulique et choix des mesures pour l'estimation de paramètres*", Thèse de l'université de bordeaux I, 288 pages, 1995.