

80755

NS 17 528(2)

L.2

f



Mémoire présenté pour l'obtention du titre de Docteur de  
l'École Nationale des Ponts et Chaussées

Spécialité: Sciences et Techniques de l'Environnement

**MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE D'UTILISATION  
D'UN MODÈLE PLUIE-DÉBIT CONCEPTUEL POUR LA  
PRÉVISION DES CRUES EN TEMPS RÉEL**

**YANG Xiaoliu**

Date de soutenance: le 11 octobre 19



**ANNEXES**

06

06



## **ANNEXE-I**

### **Calage global du modèle GR3 adapté directement du pas de temps journalier au pas de temps horaire**

**ANNEXE-I-A Bassin versant du Réal-Collobrier  
(1969-1972)**

**ANNEXE-I-B Bassin versant de l'Orgeval (1974-  
1977)**



**ANNEXE-I-A****Calage global du modèle GR3 sur le Réal-Collobrier**

(architecture identique à celle du modèle journalier GR3J)

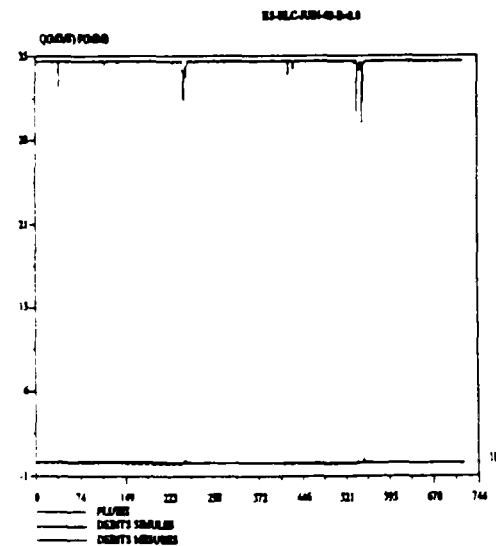
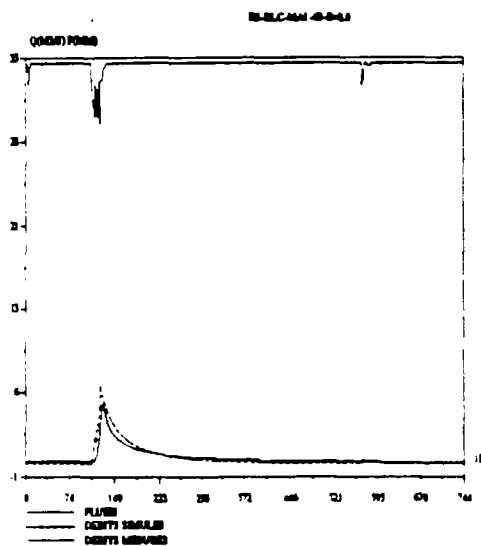
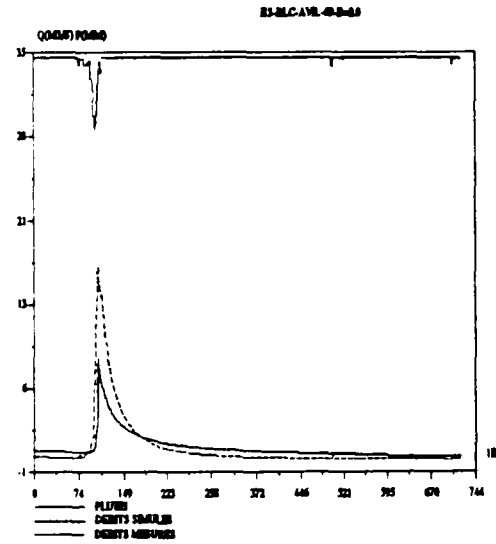
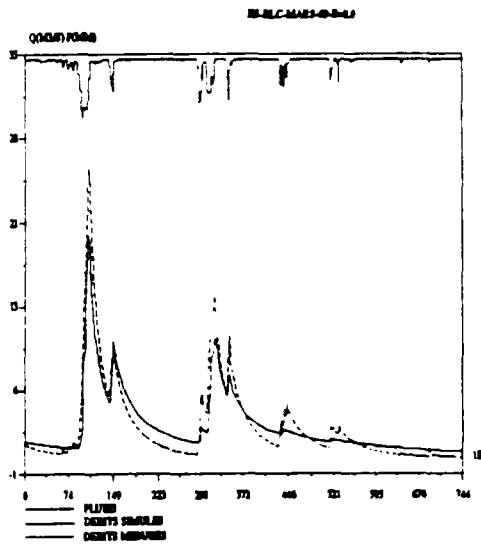
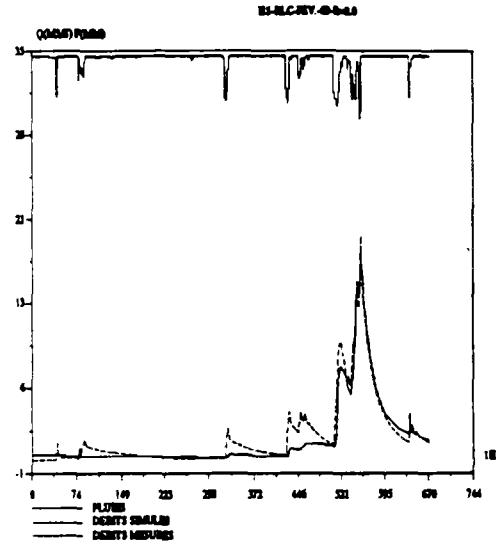
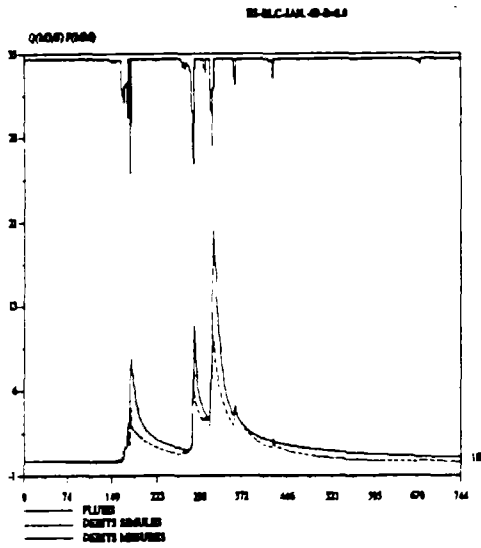
6 graphiques mensuels par page

Valeurs optimales:  $\ln(A) = 5.95$   $\ln(B) = 7.05$   $\ln(C-0.5) = -3.42$

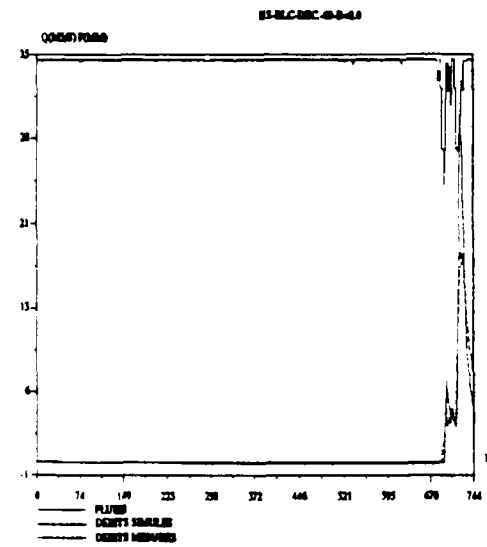
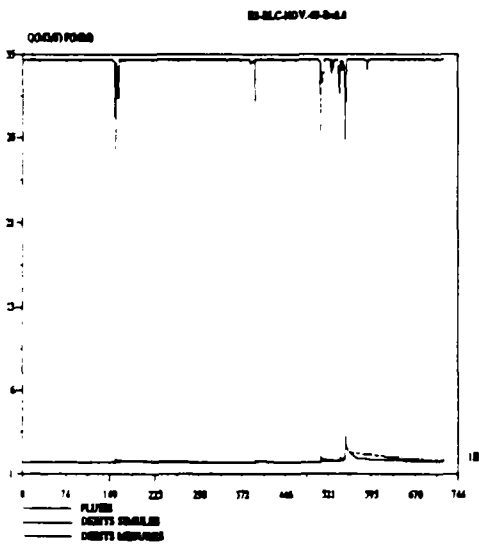
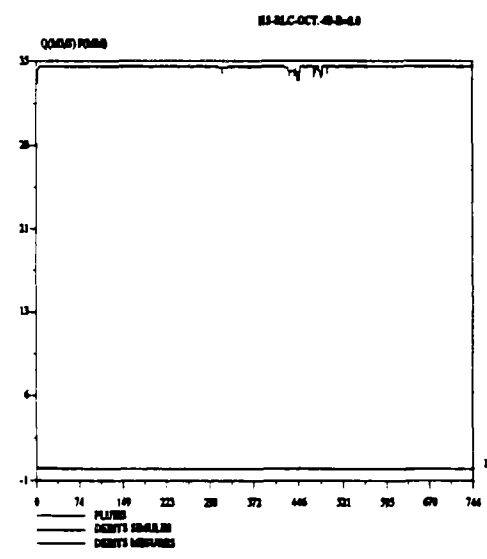
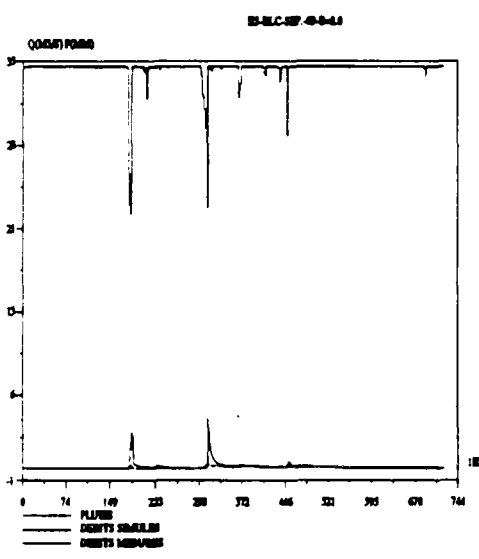
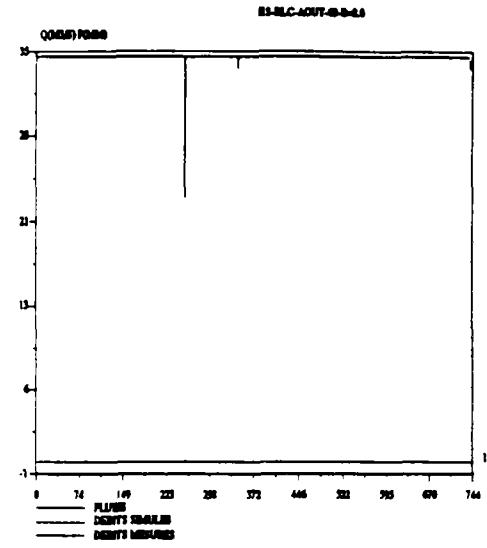
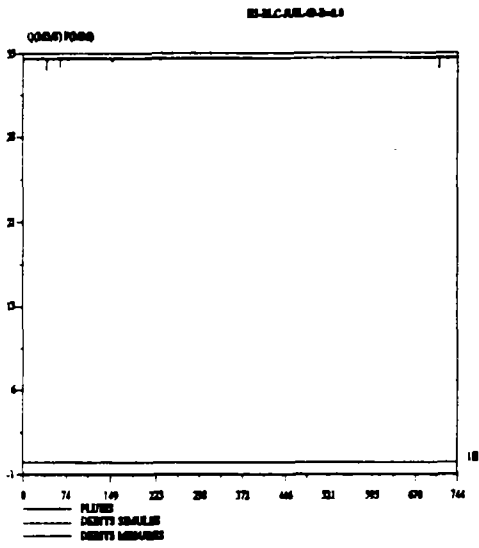
Critère d'appréciation pour la période 1969-1972

critère Nash-Sutcliffe (NS):	82.7%
erreur de bilan (EB):	-8.8%
rapport de pointes de crues (RD):	77.79%
rapport de durées à mi-crue (EP):	120.7%

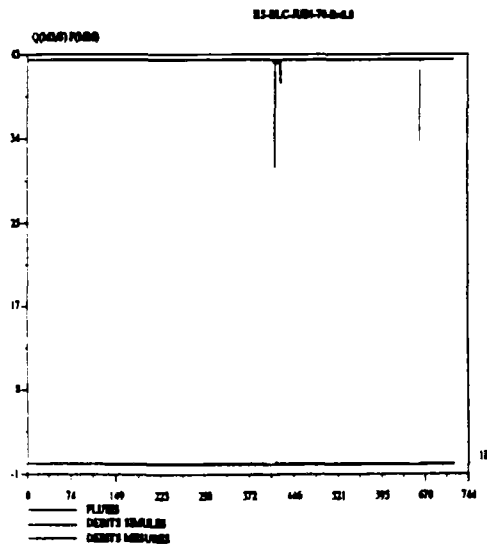
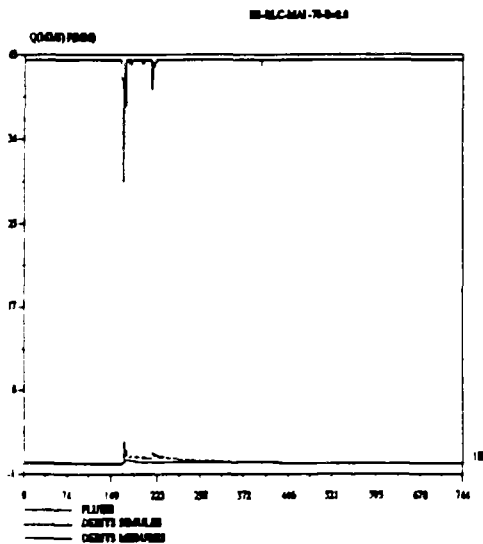
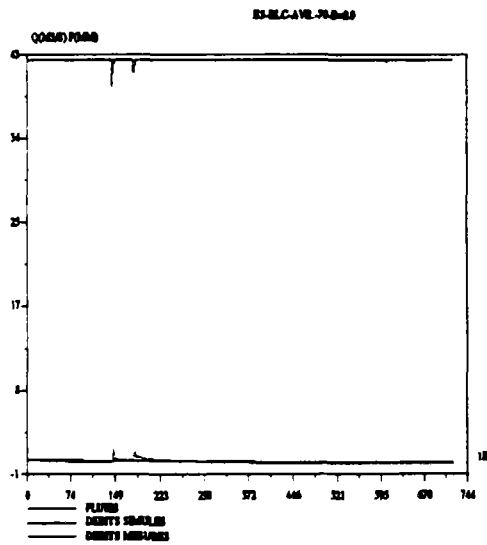
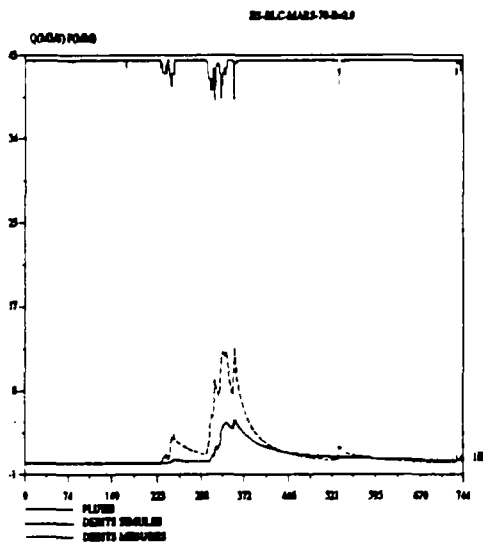
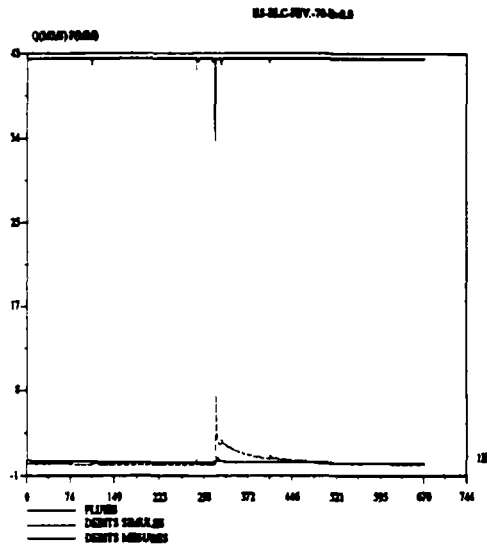
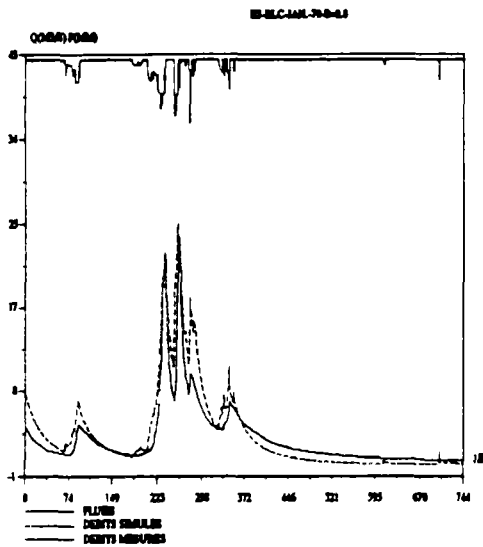
Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972  
premier semestre 1969



### Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972 deuxième semestre 1969

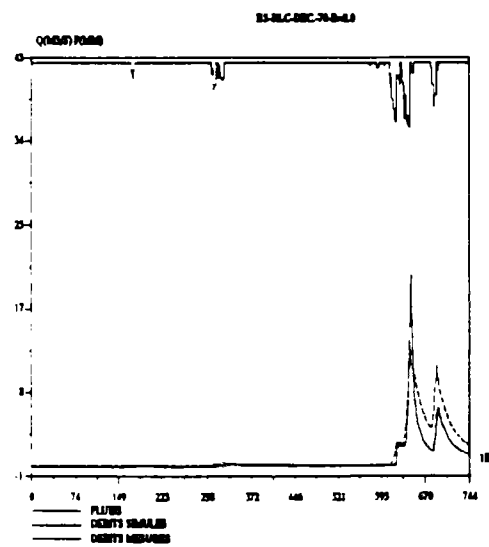
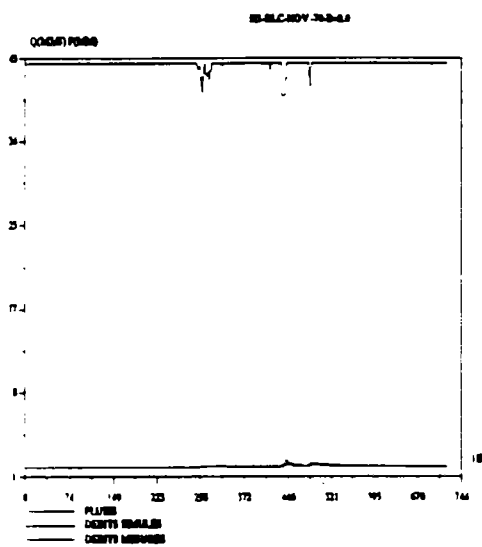
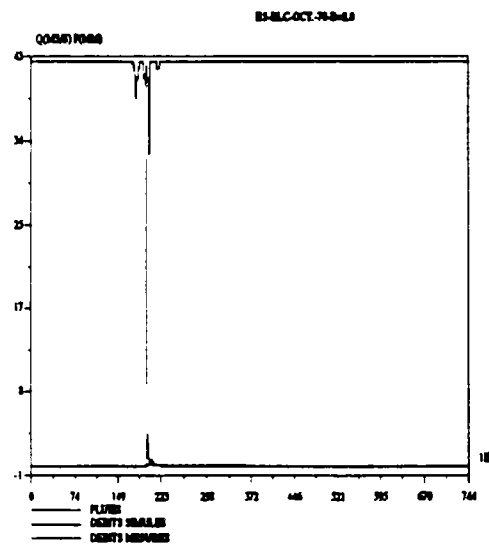
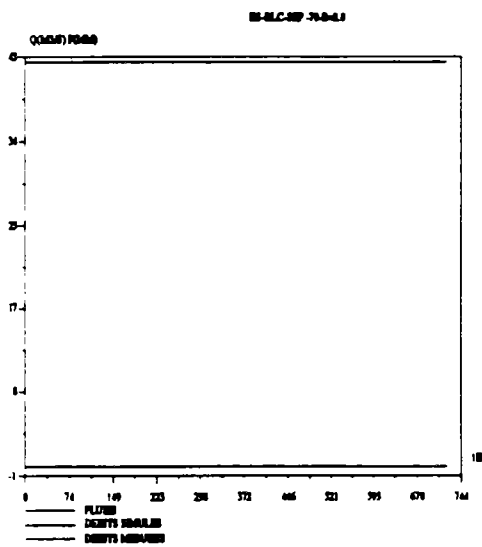
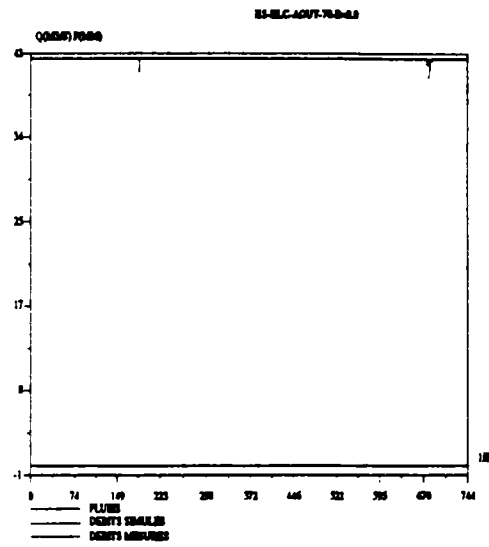
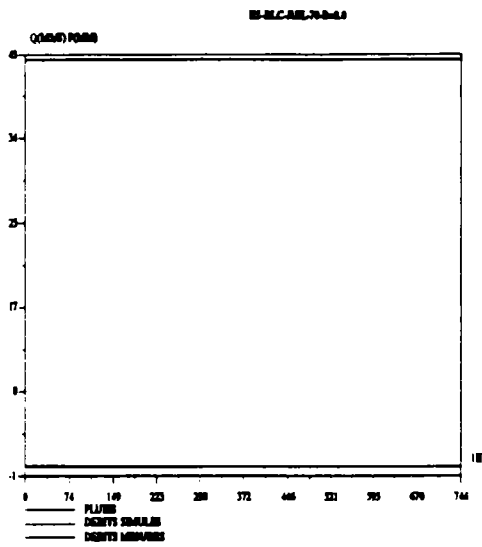


Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972  
premier semestre 1970

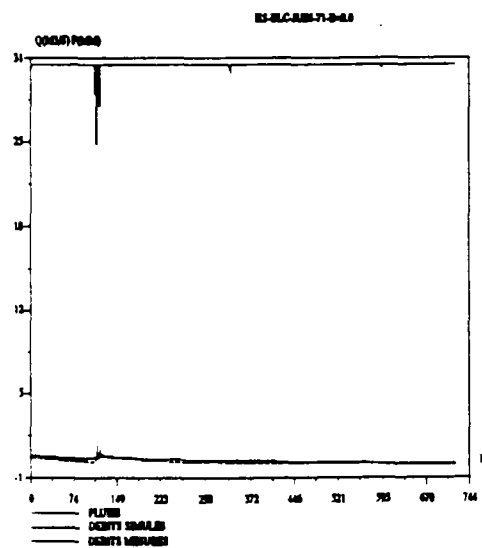
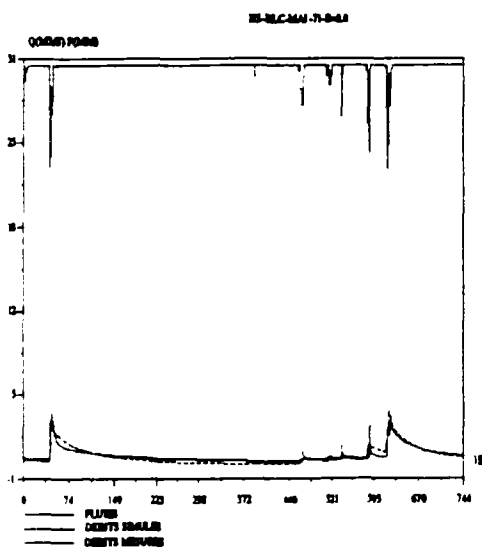
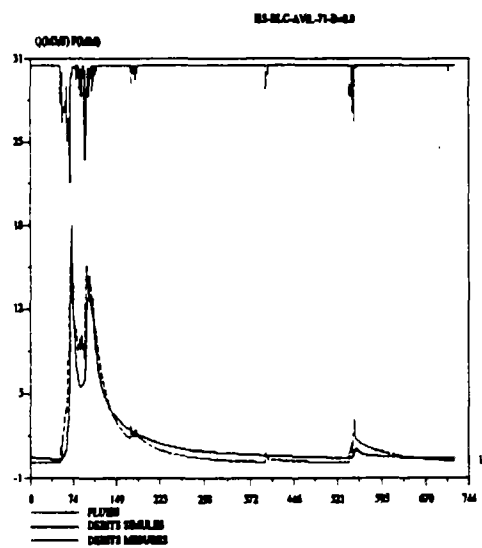
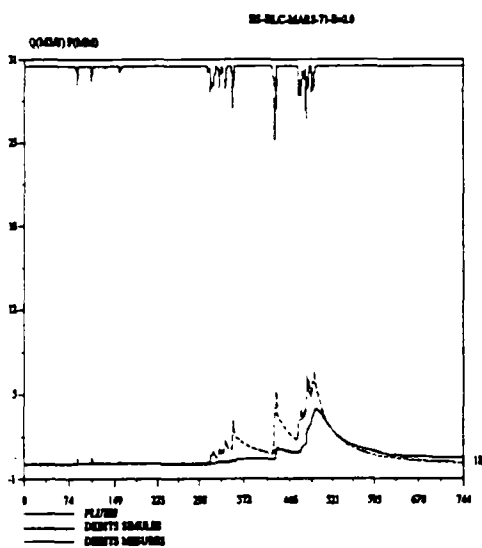
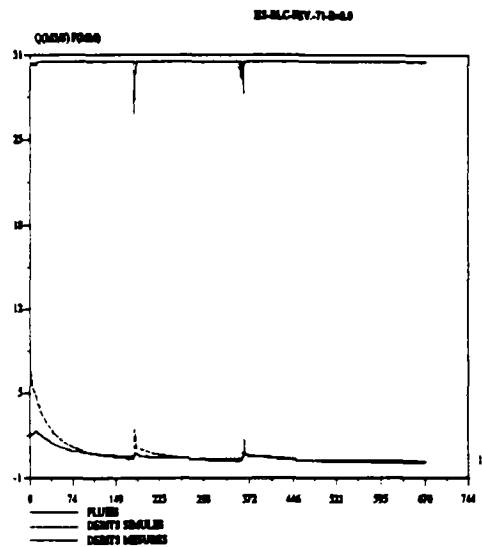
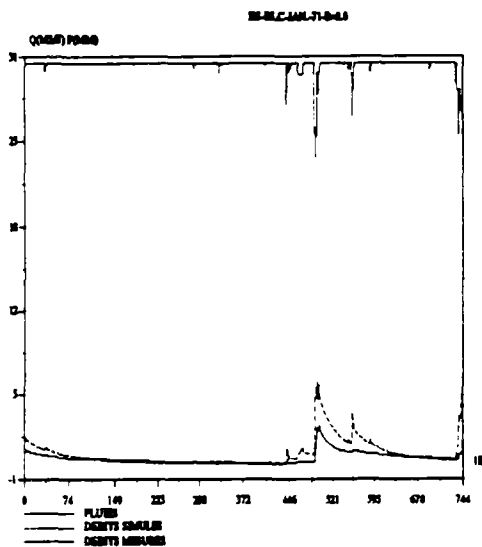




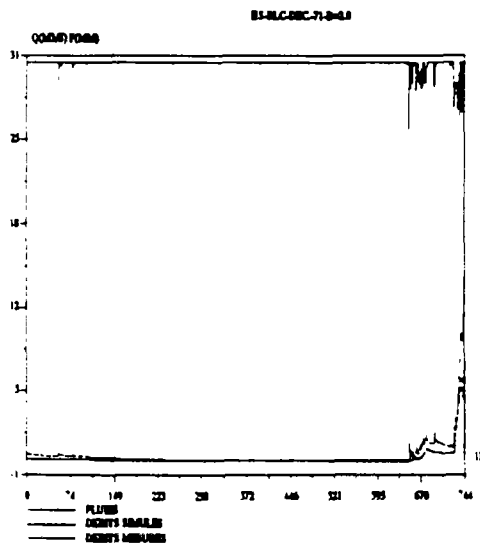
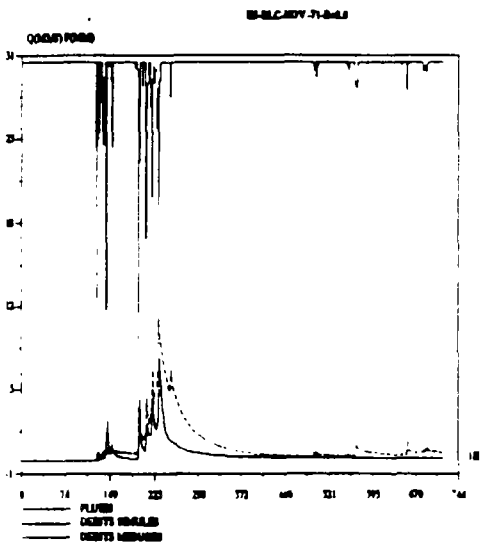
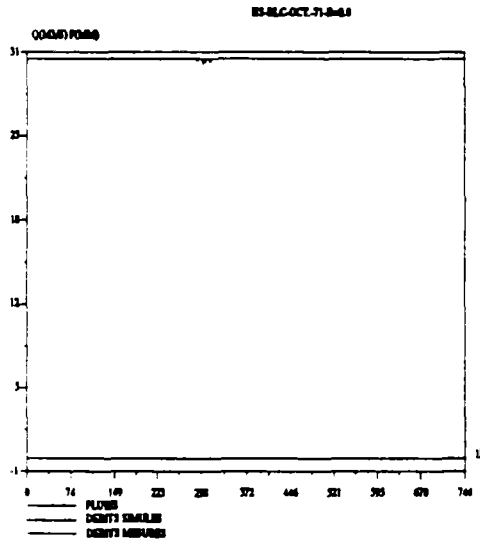
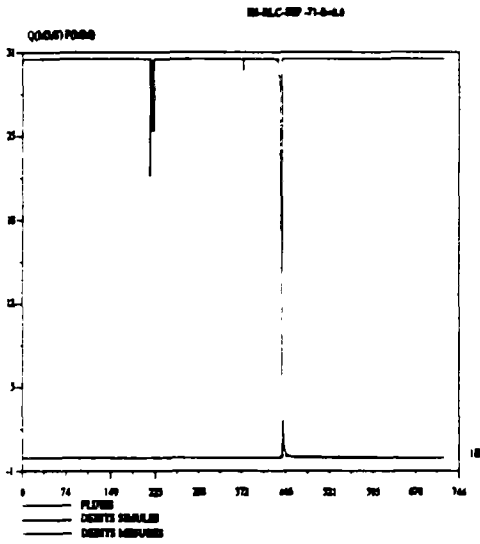
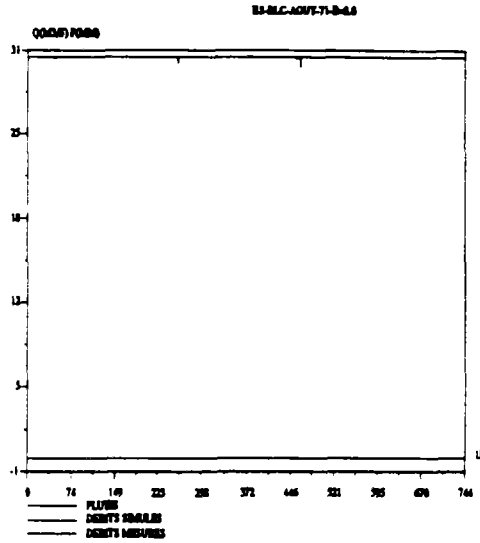
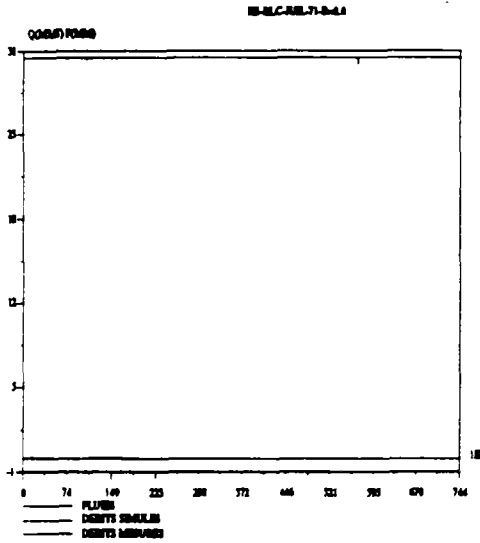
### Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972 deuxième semestre 1970



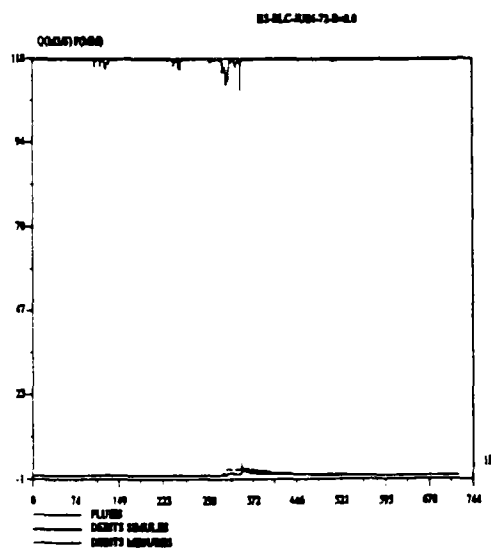
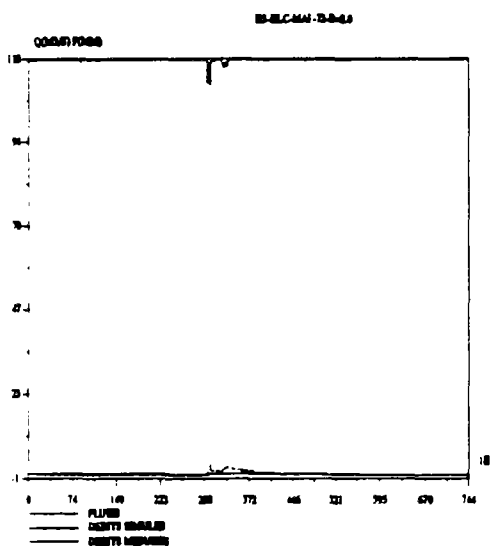
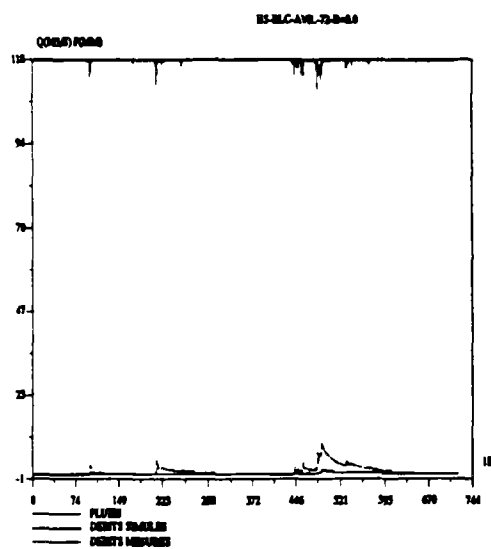
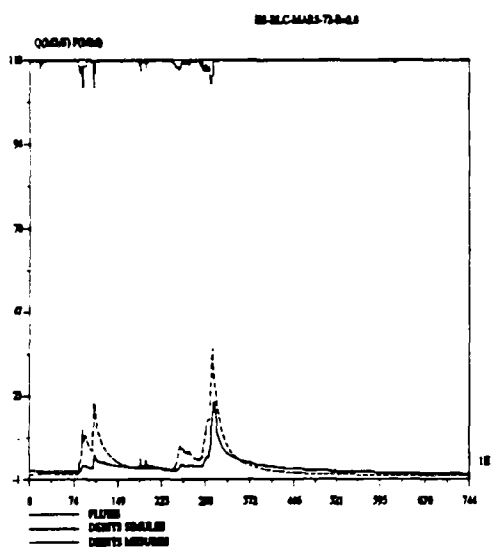
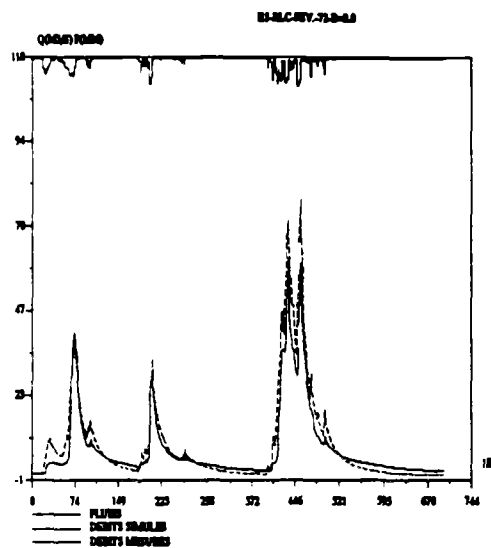
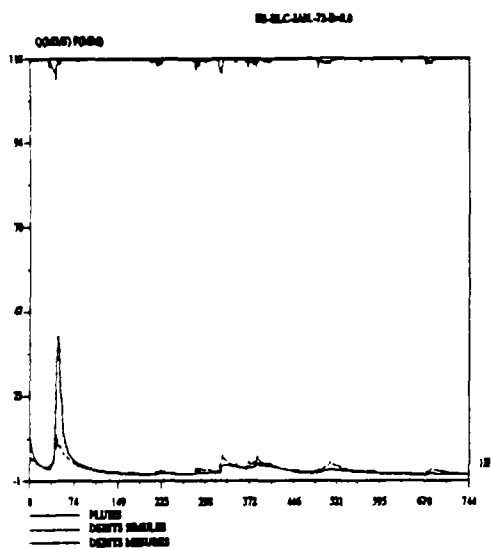
Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972  
premier semestre 1971



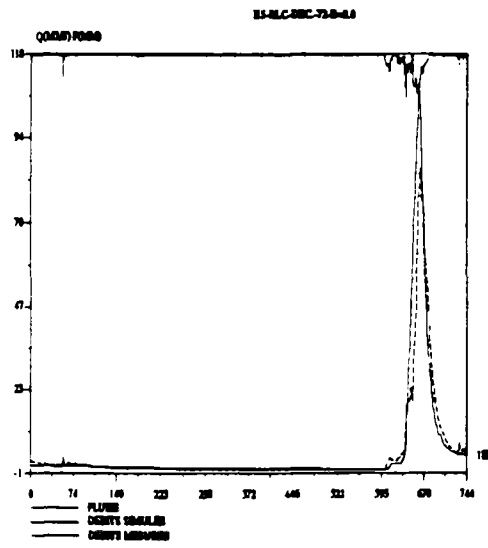
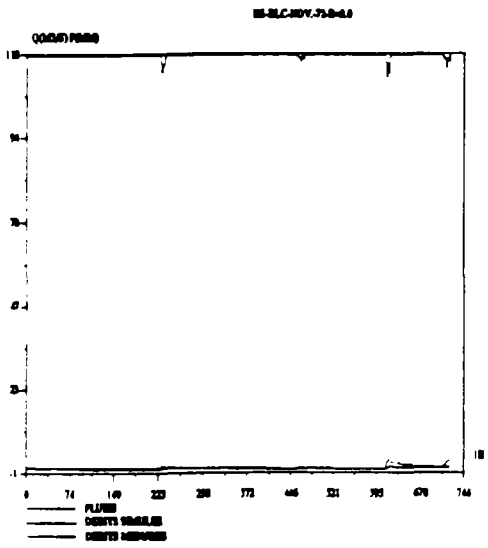
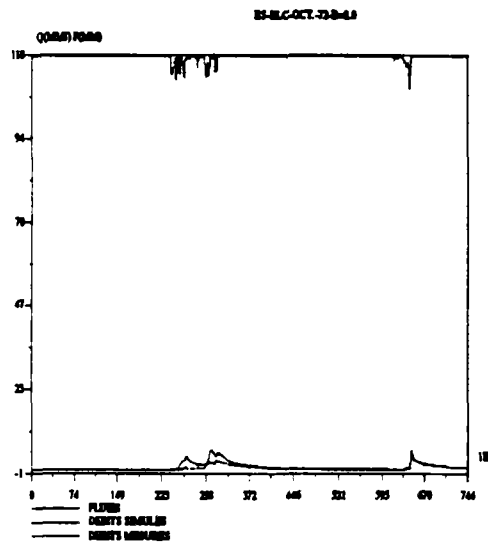
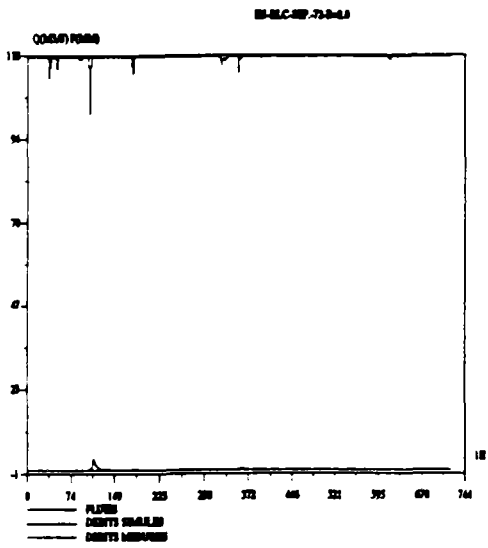
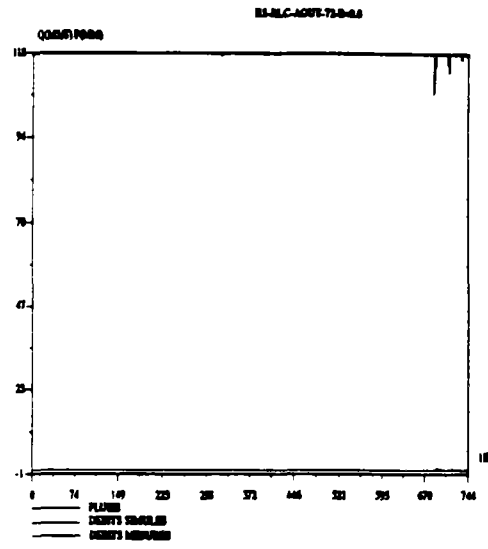
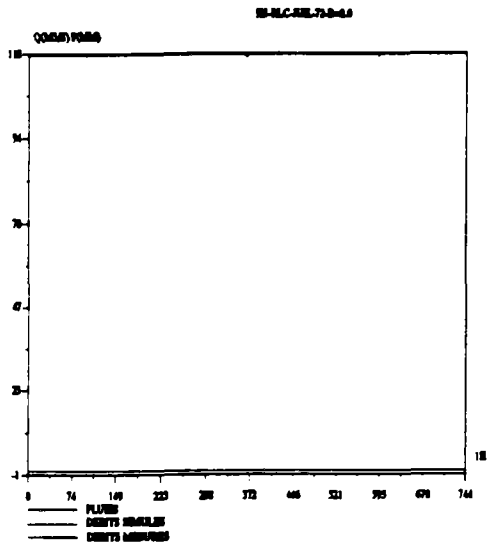
Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972  
deuxième semestre 1971



### Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972 premier semestre 1972



### Calage de GR3 sur le Réal-Collobrier 1969-1972 deuxième semestre 1972



**ANNEXE-I-B**

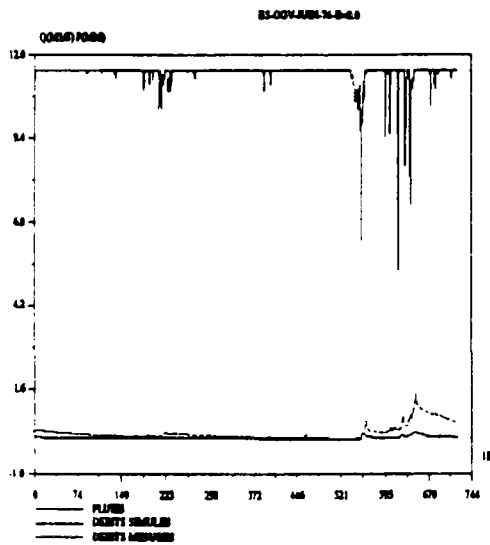
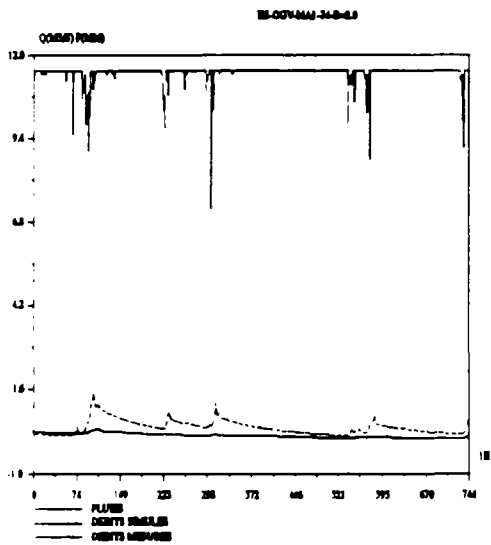
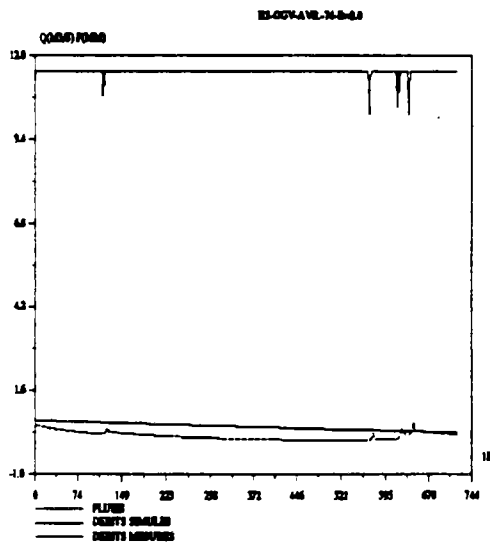
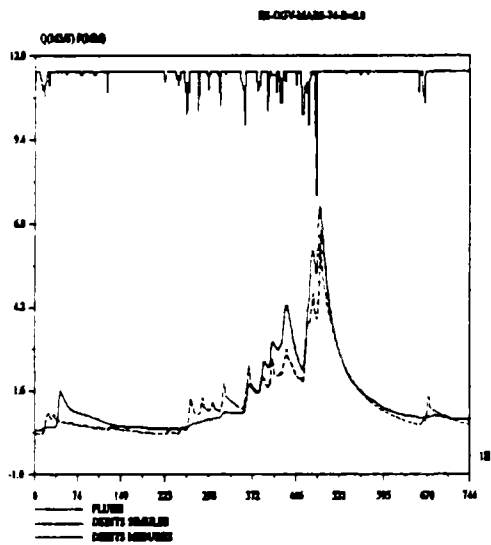
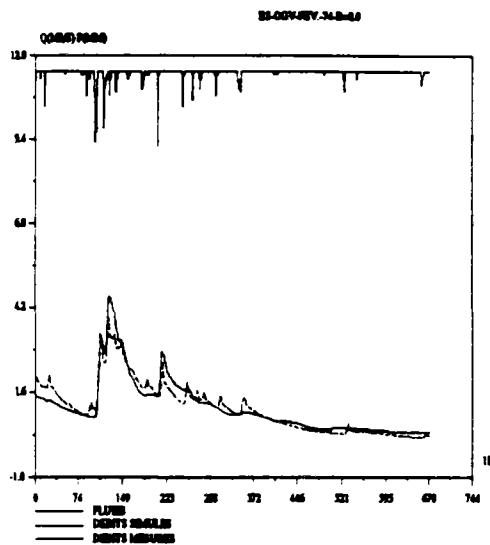
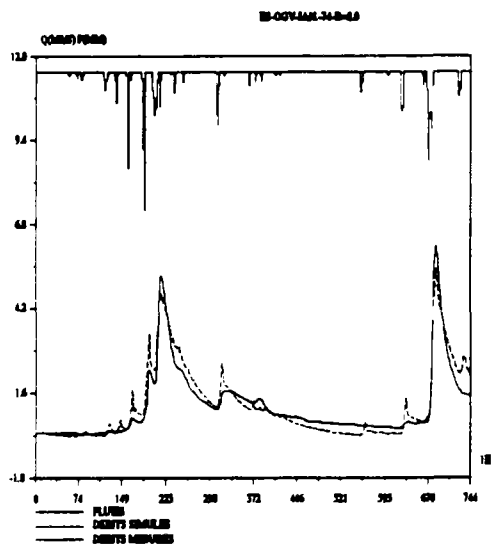
Calage global du modèle GR3 sur l'Orgeval  
(architecture identique à celle du modèle journalier GR3J)  
6 graphiques mensuels par page

Valeurs optimales:  $\ln(A) = 5.82$   $\ln(B) = 6.99$   $\ln(C-0.5) = 2.01$

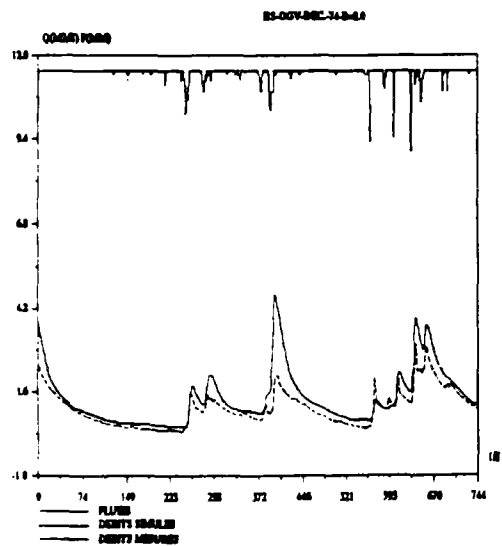
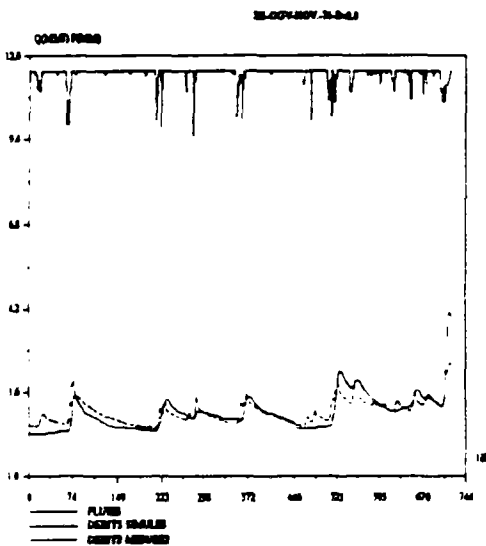
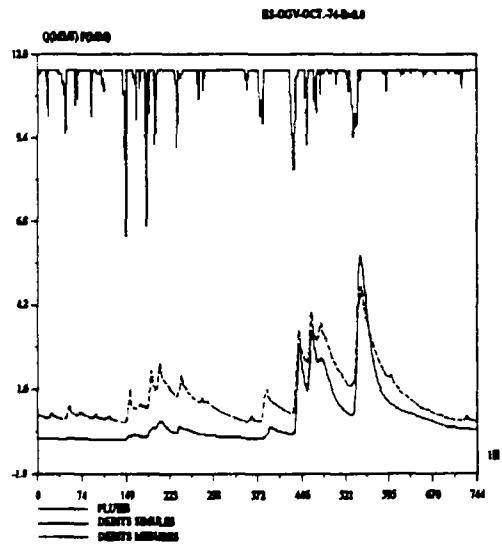
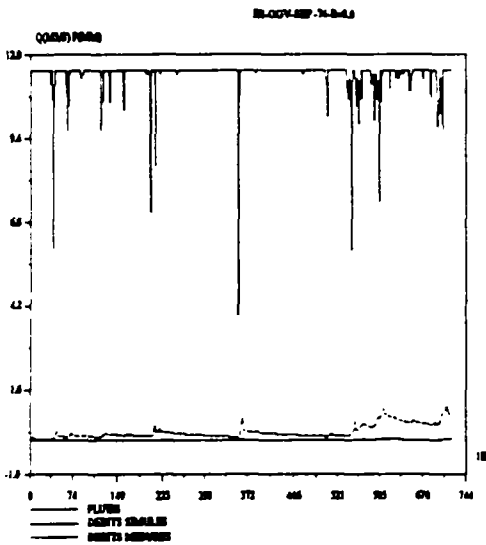
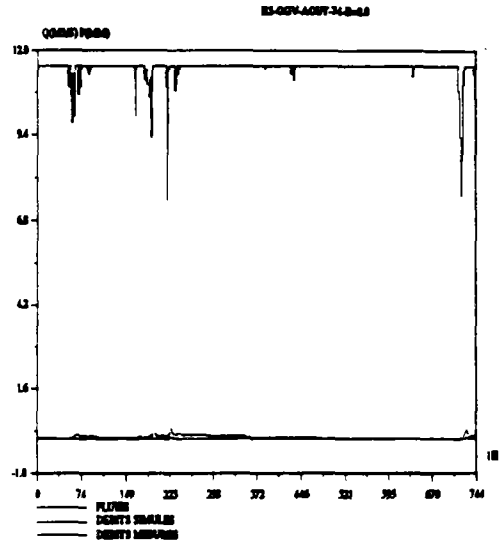
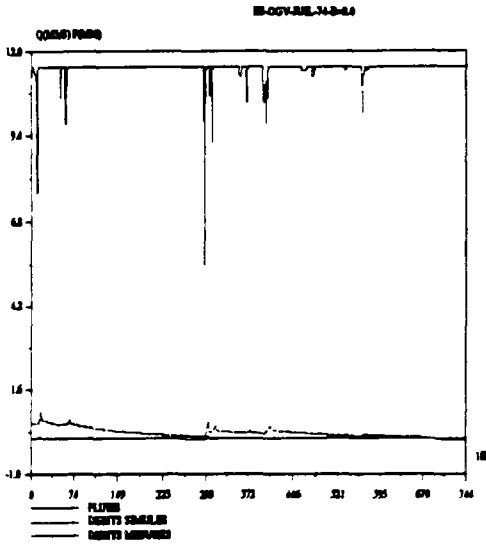
Critère d'appréciation pour la période 1974-1977

critère Nash-Sutcliffe (NS):	70.2%
erreur de bilan (EB):	-20.4%
rapport de pointes de crues (RD):	77.8%
rapport de durées à mi-crue (EP)	29.9%

### Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977 premier semestre 1974

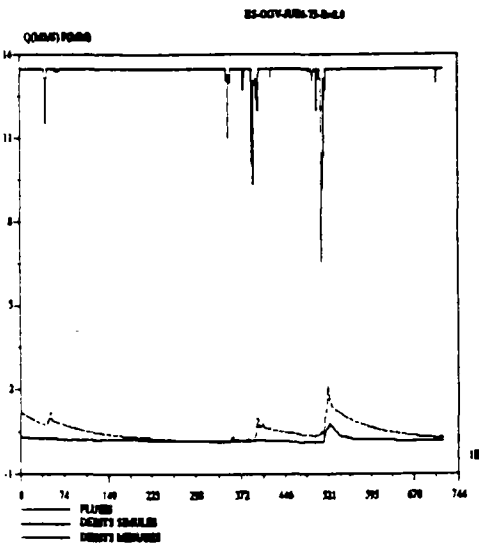
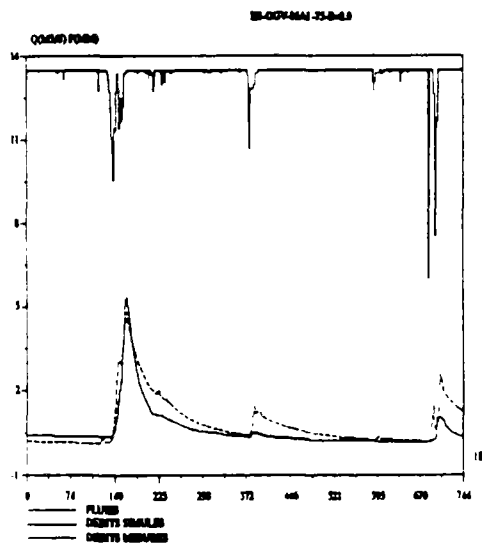
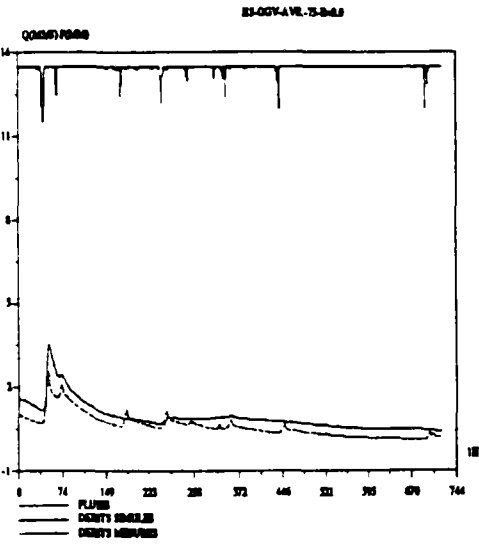
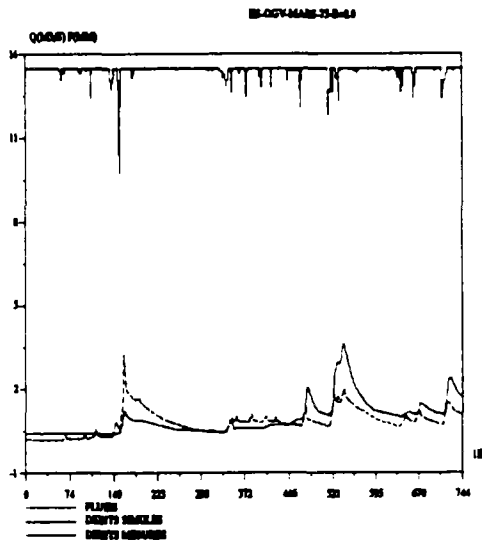
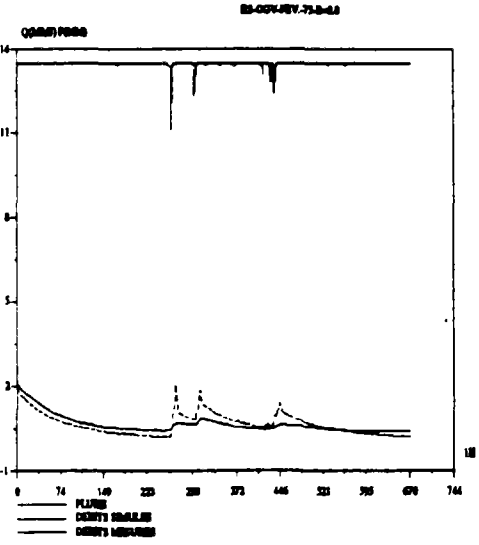
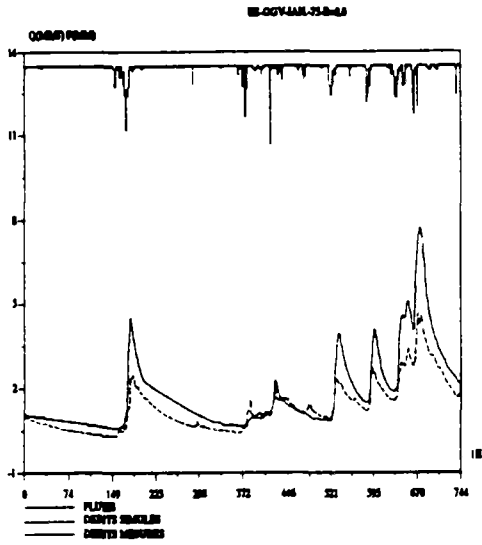


### Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977 deuxième semestre 1974

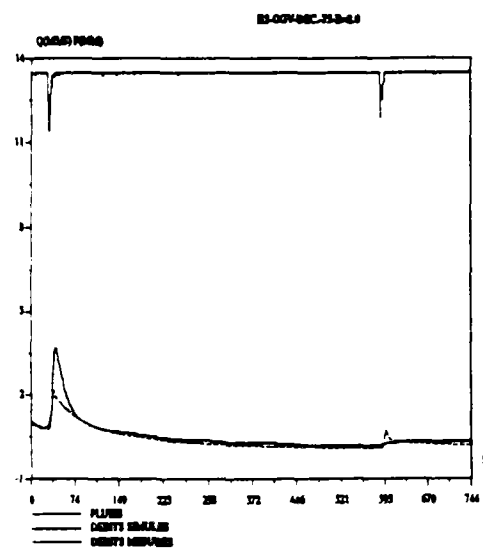
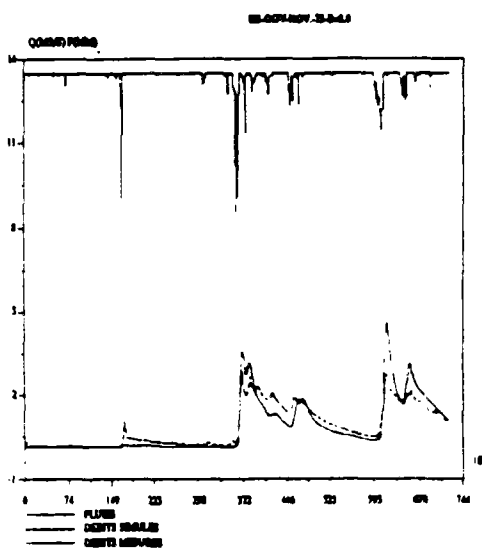
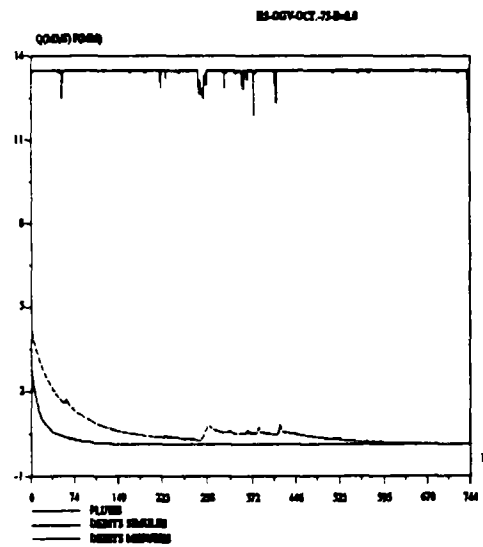
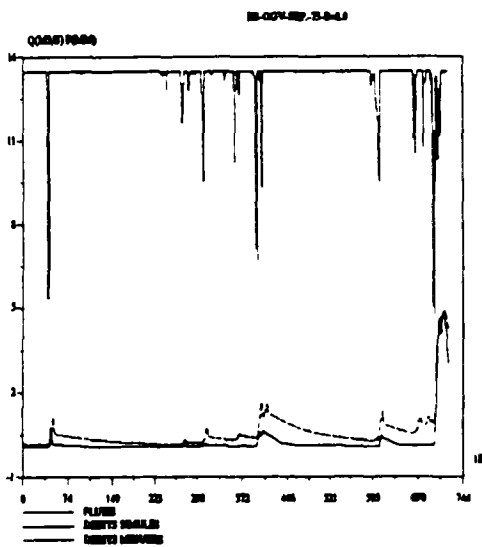
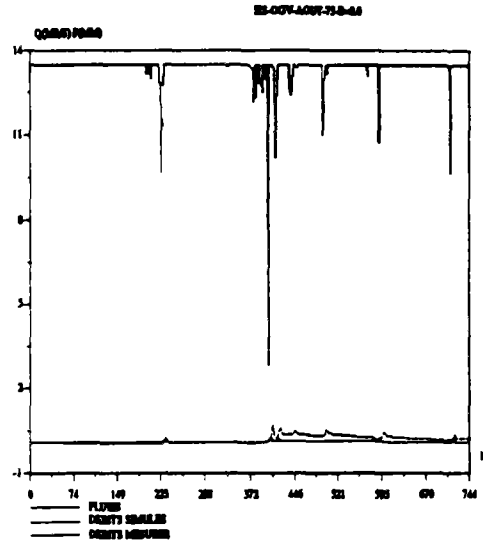
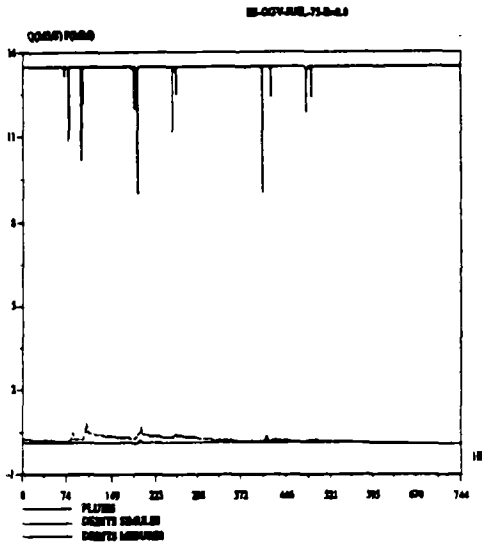




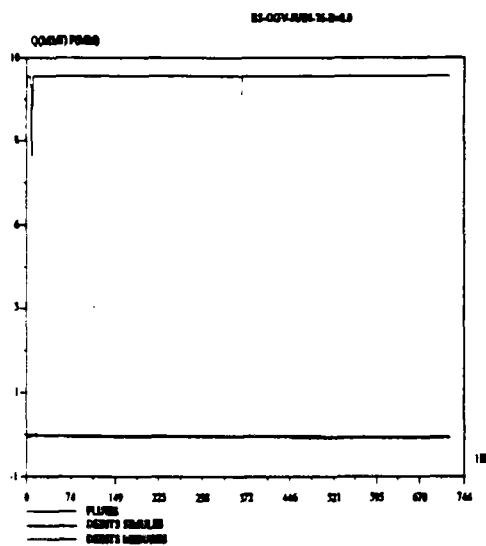
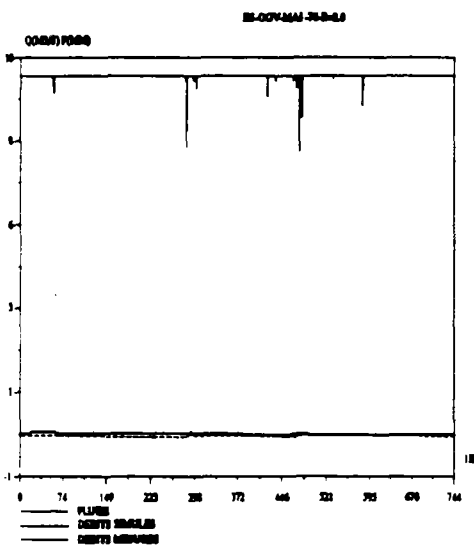
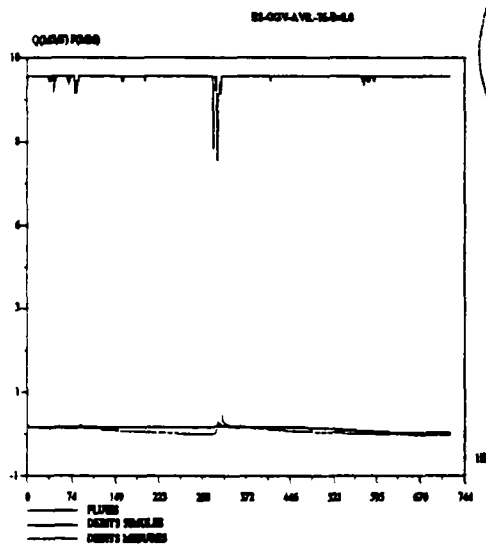
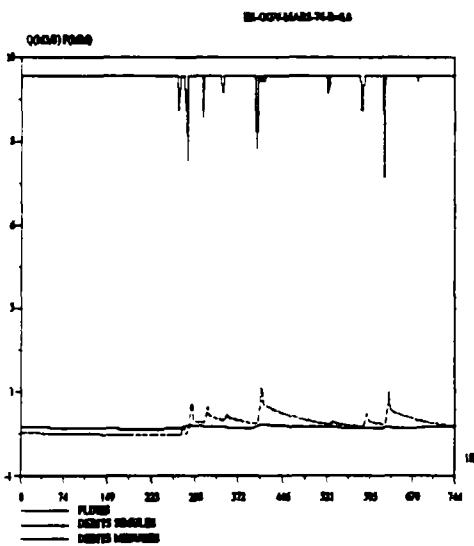
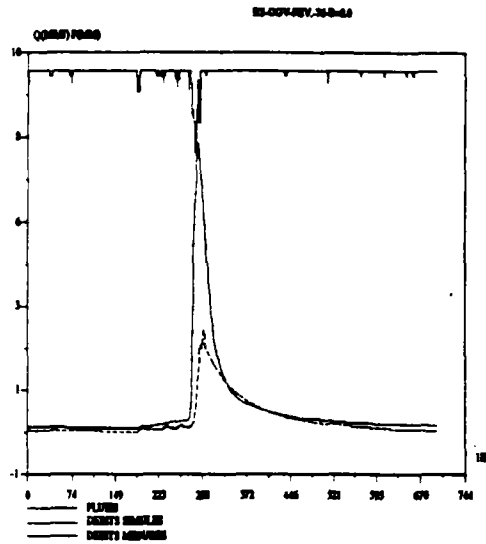
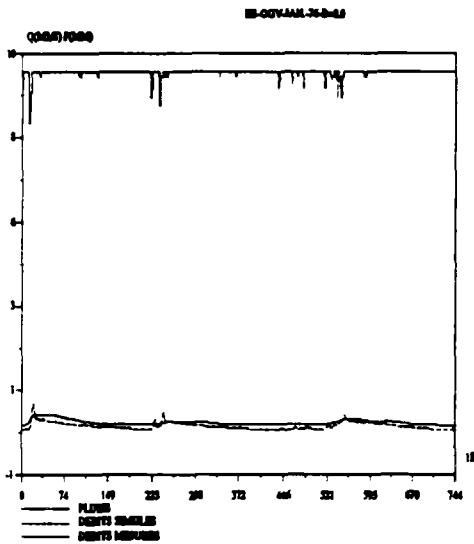
Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977  
premier semestre 1975



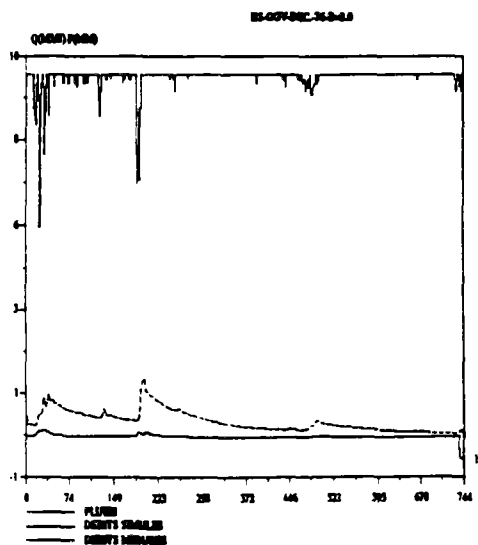
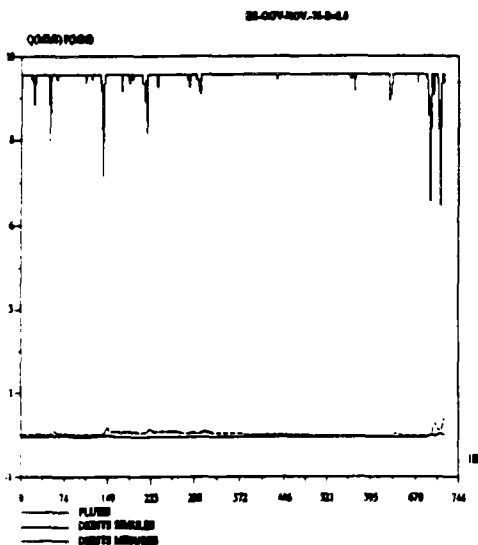
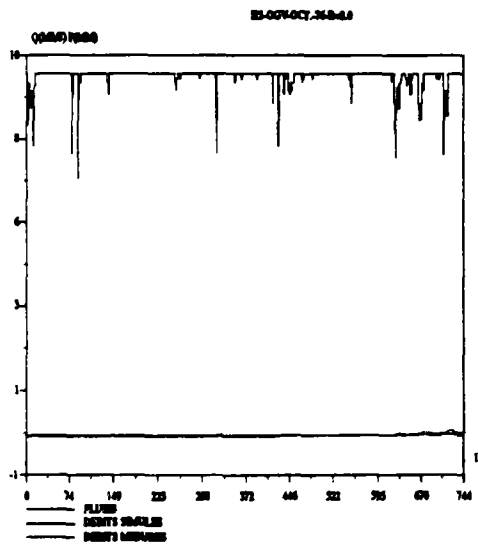
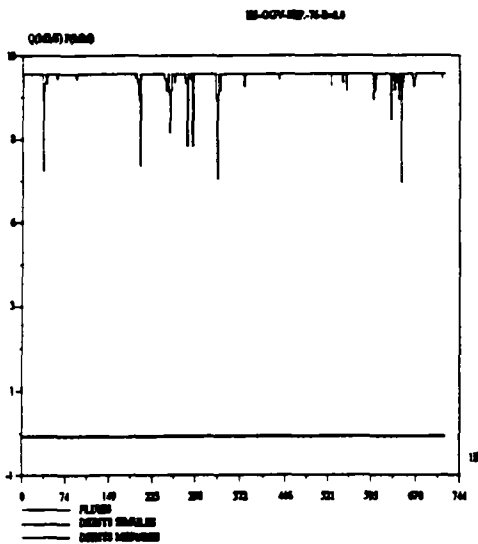
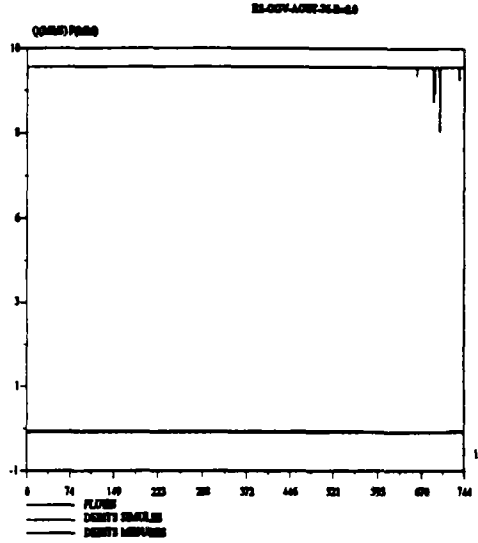
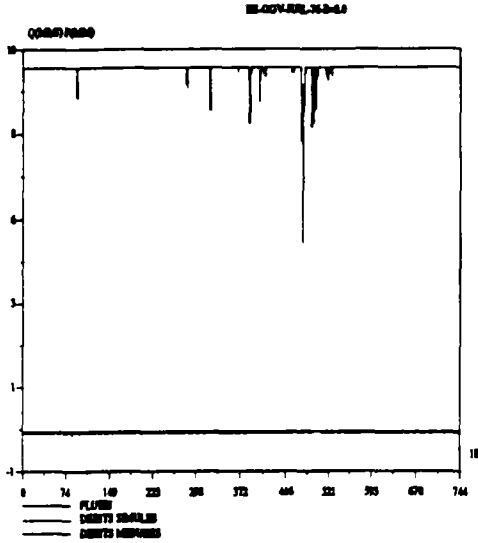
### Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977 deuxième semestre 1975



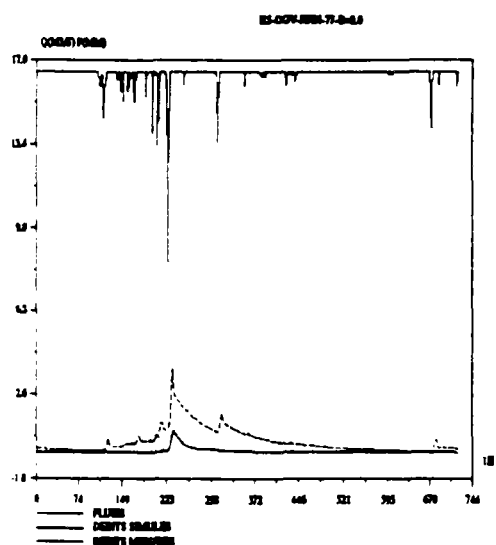
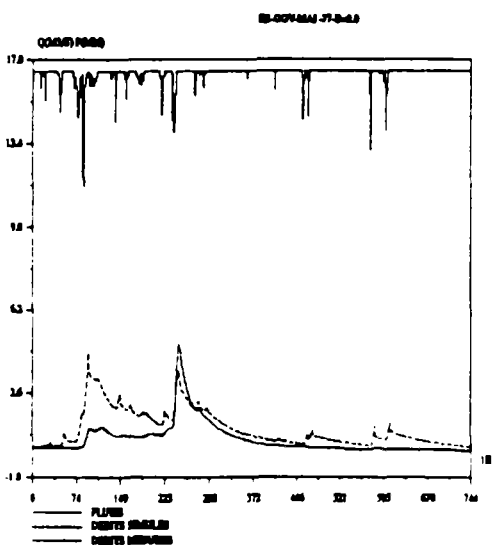
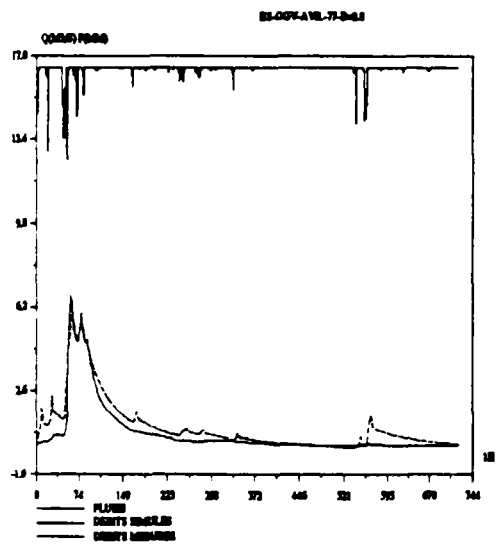
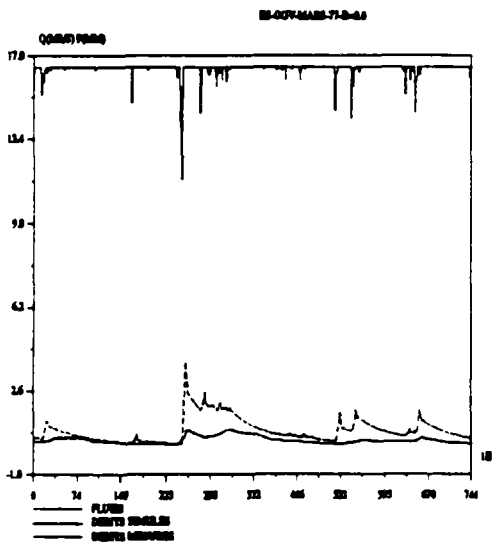
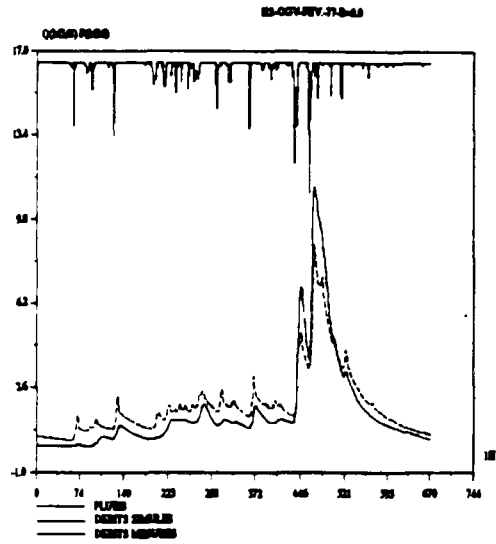
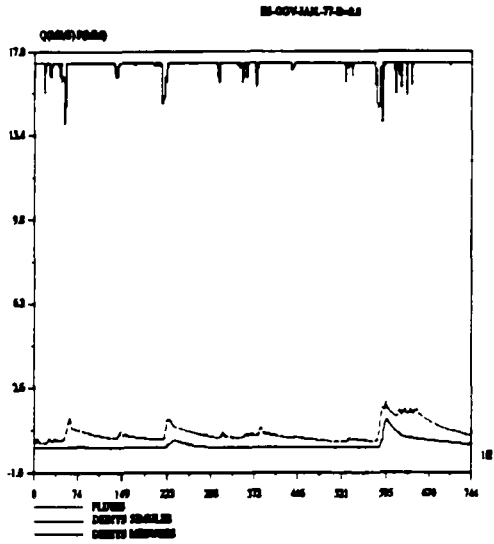
### Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977 premier semestre 1976



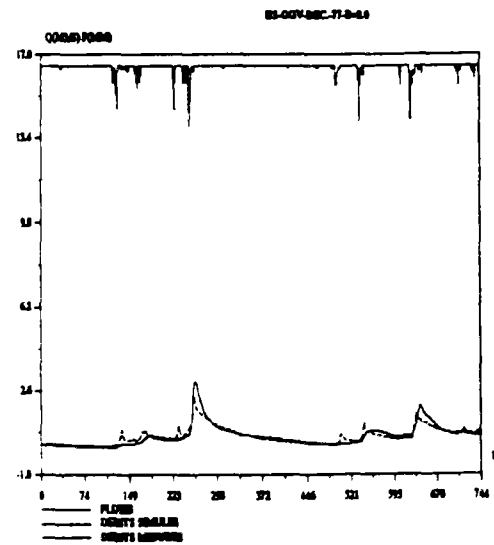
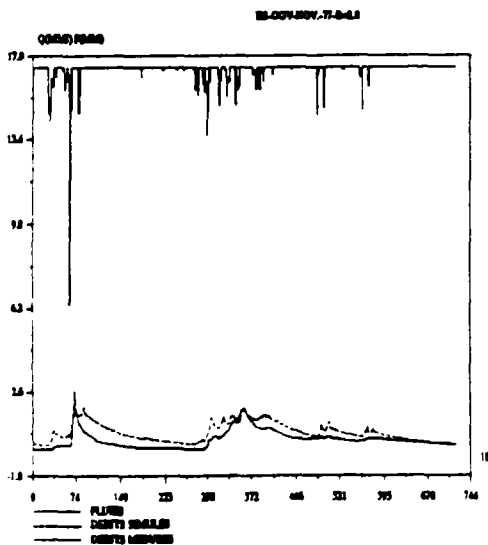
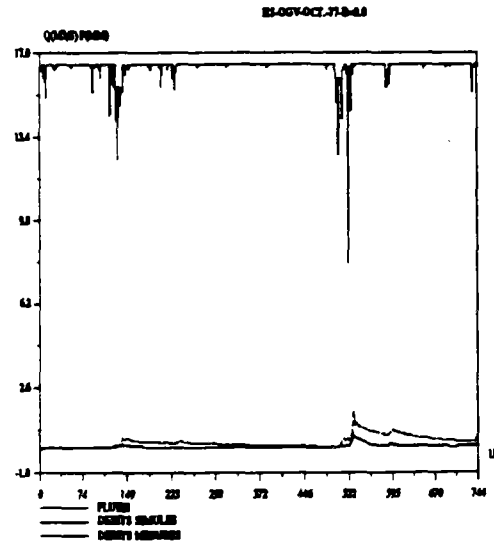
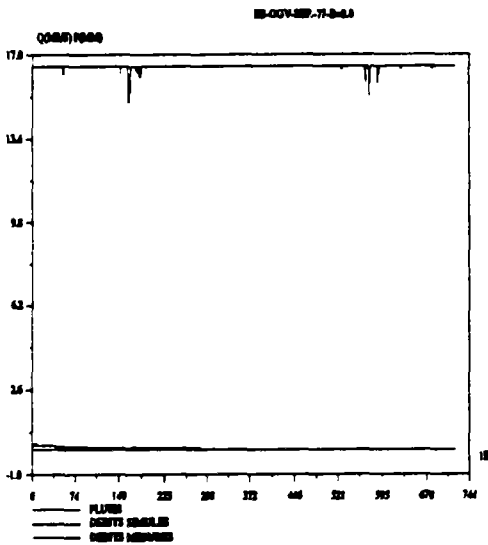
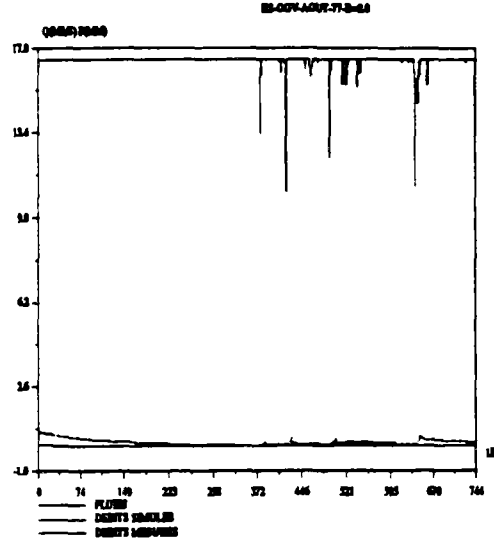
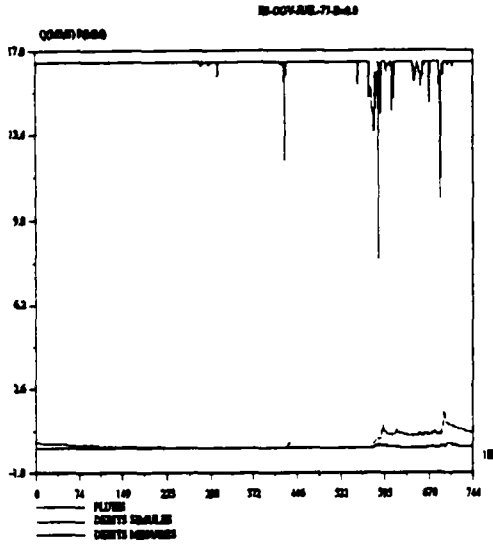
### Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977 deuxième semestre 1976



Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977  
premier semestre 1977



### Calage de GR3 sur l'Orgeval 1974-1977 deuxième semestre 1977









## **ANNEXE-II**

**Calage du modèle GR3 horaire année par année**

**ANNEXE-II-A bassin versant du Réal-Collobrier  
(1969-1972)**

**ANNEXE-II-B bassin versant de l'Orgeval (1974-  
1977)**



## ANNEXE-II-A

### Calage du modèle GR3 horaire sur le Réal-Collobrier année par année

(6 graphiques par page)

#### Rappel des résultats numériques

Année	lnA	lnB	ln(C-0.5)	NS (%)	EB(%)	EP (%)	RD (%)
1969	5.64	7.92	-0.90	87.8	-9.0	72.7	90.2
1970	6.09	7.21	0.39	81.9	-2.1	70.6	75.0
1971	6.22	7.06	0.35	84.0	-4.9	64.0	62.5
1972	5.82	6.75	-8.98	86.3	3.4	93.2	117.2
moyenne	5.93	7.24	-3.09	85.0	-0.7	75.1	86.2
écart-type	0.23	0.43	3.90	2.2	5.5	10.9	20.4
calage global	5.95	7.05	3.42	82.7	-8.8	77.8	120.7

NS: critère de Nash-Sutcliffe

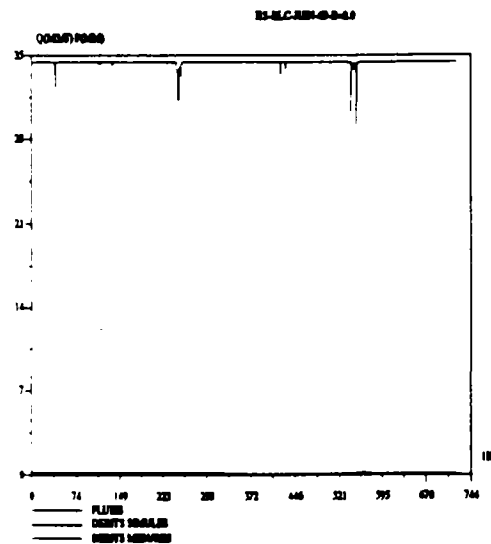
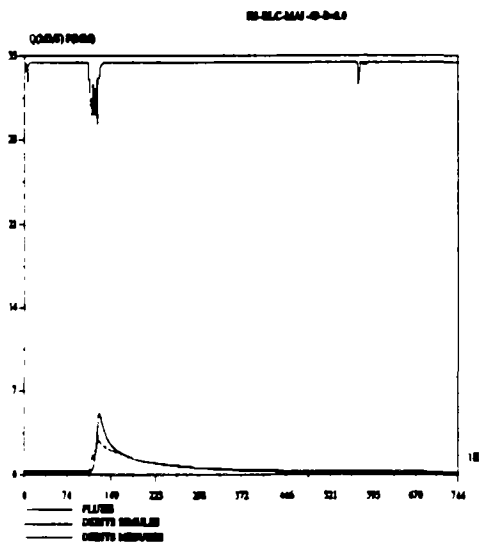
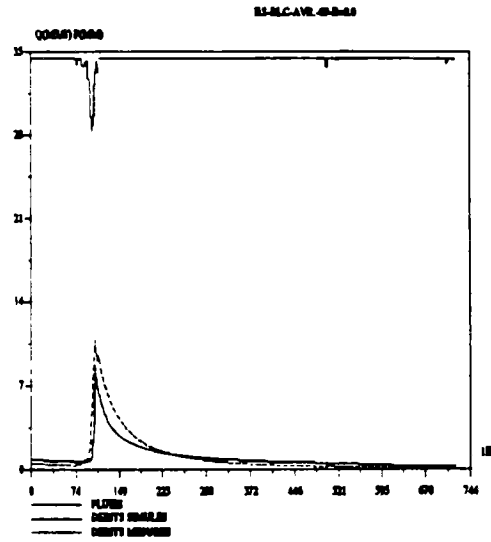
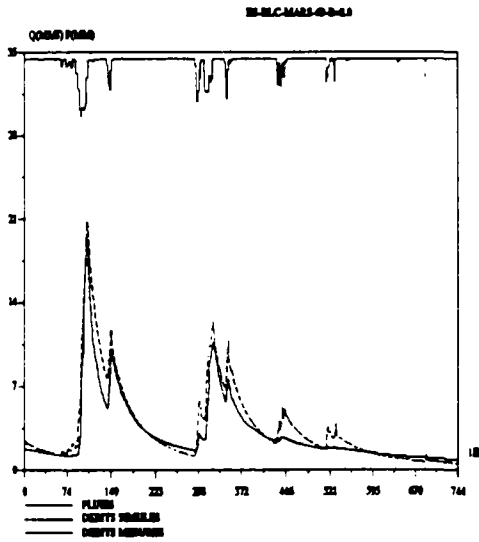
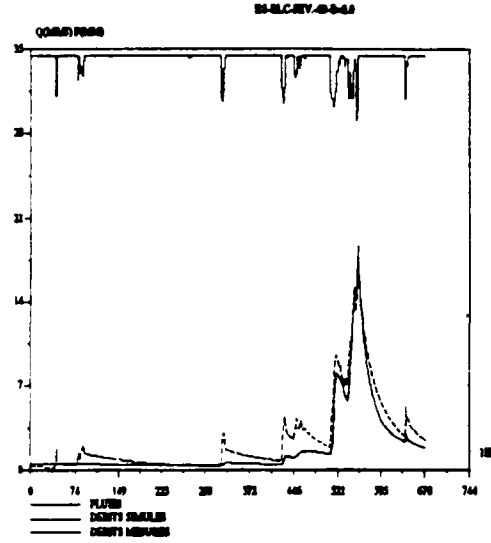
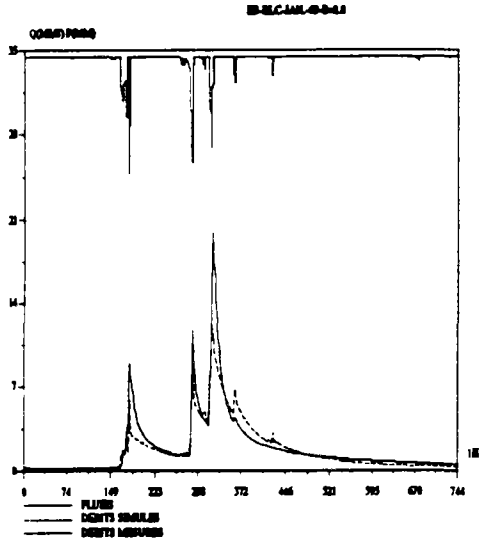
EB: erreur relative de bilan

RD: rapport des durées à mi-crue

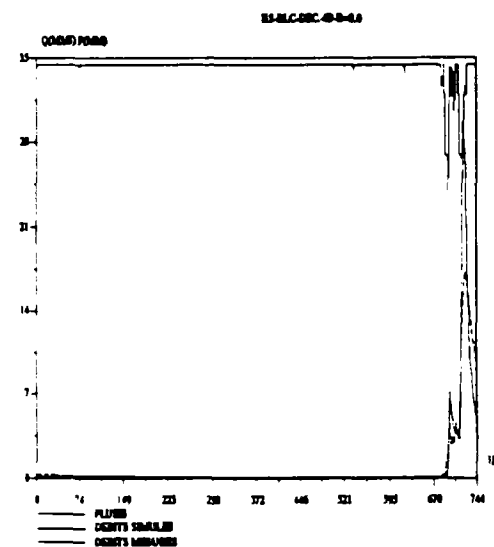
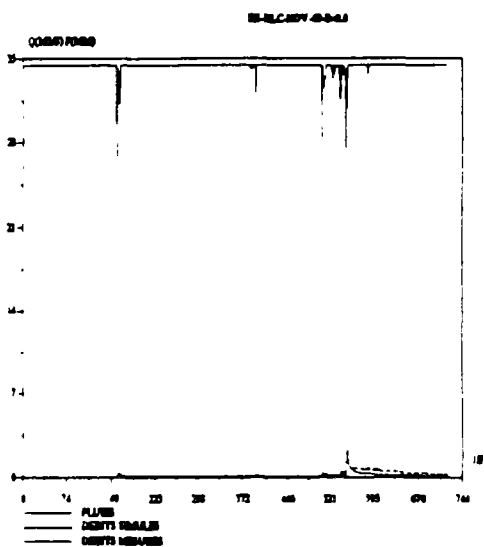
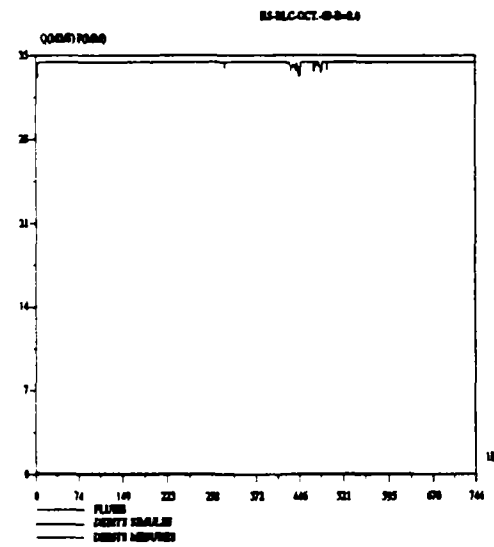
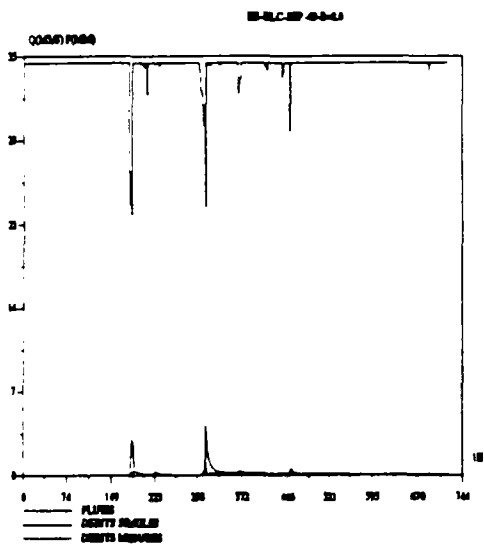
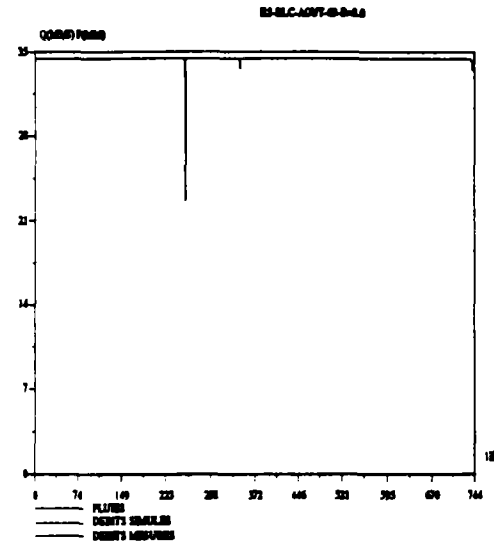
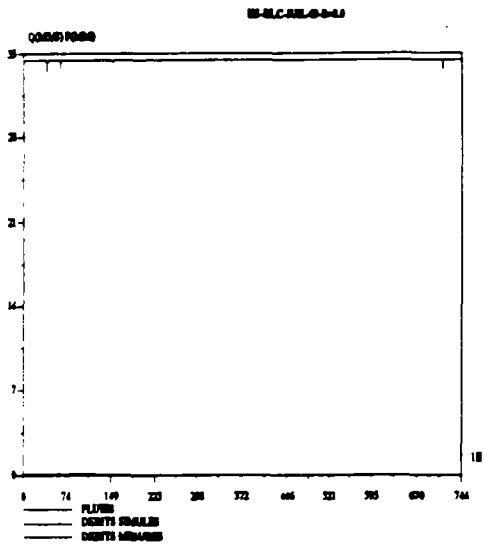
EP: rapport des pointes de crues



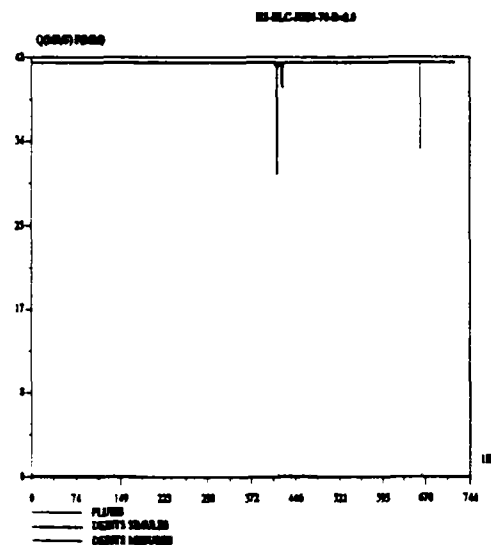
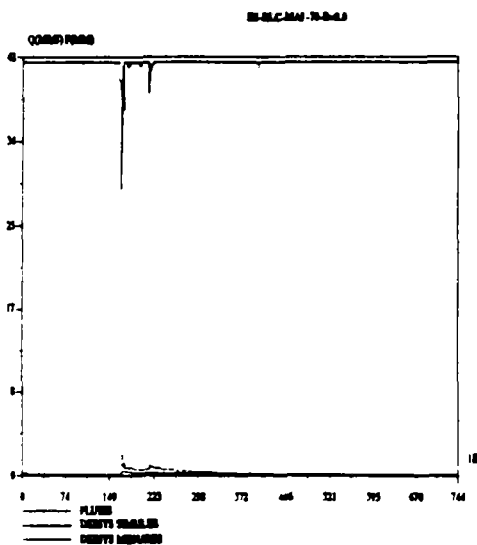
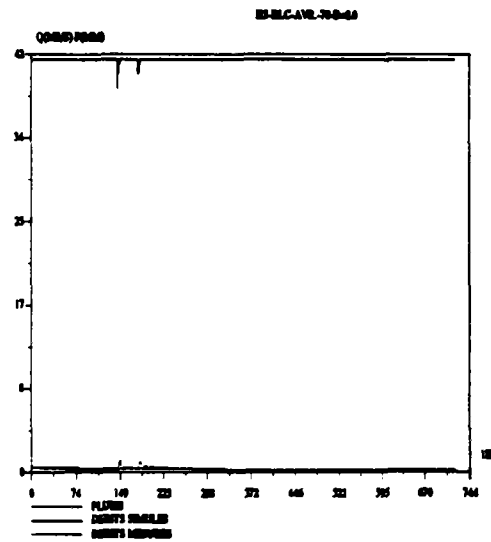
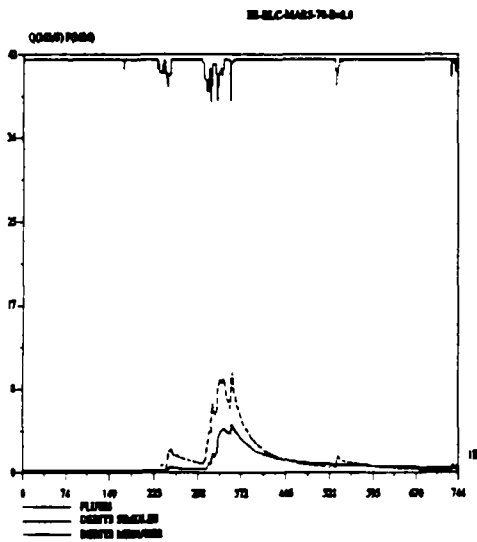
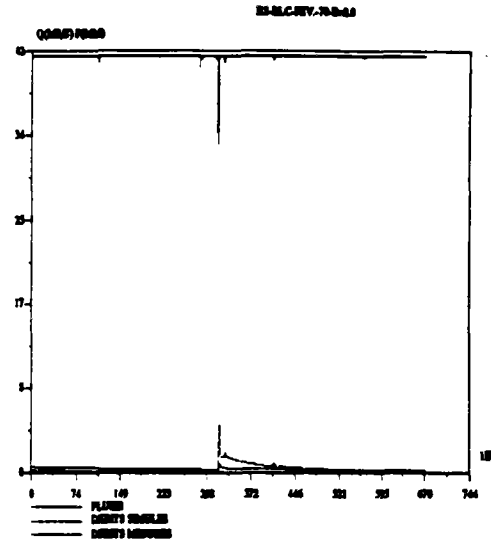
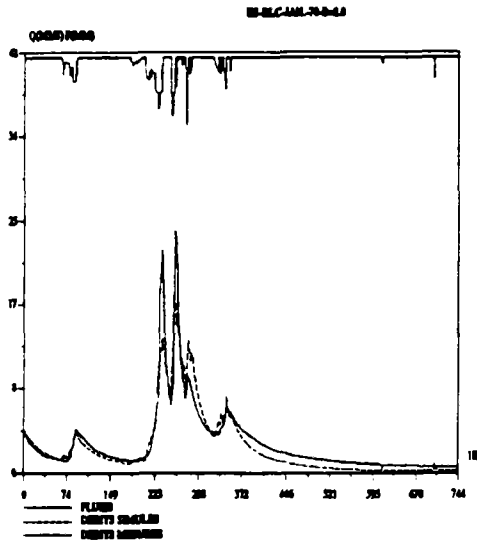
### Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1969 premier semestre 1969



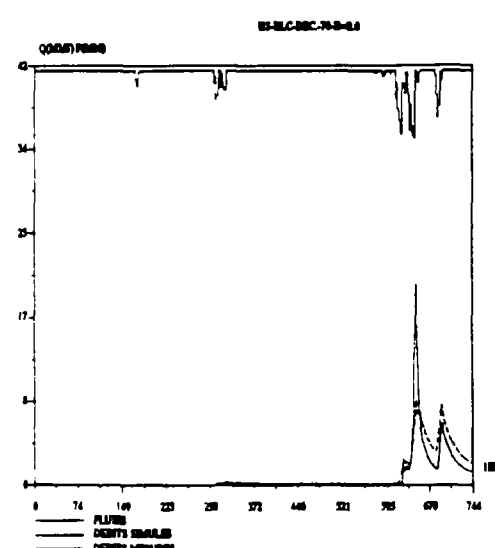
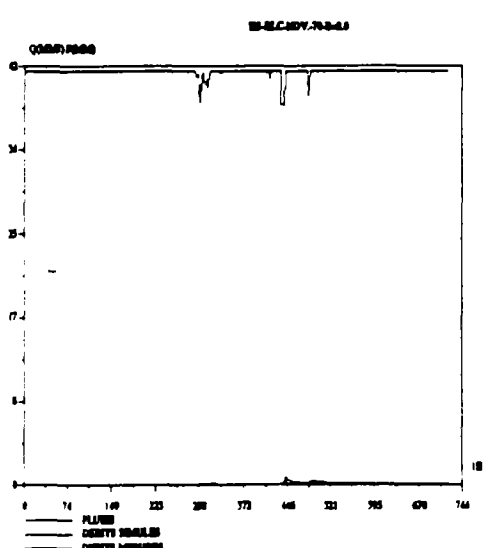
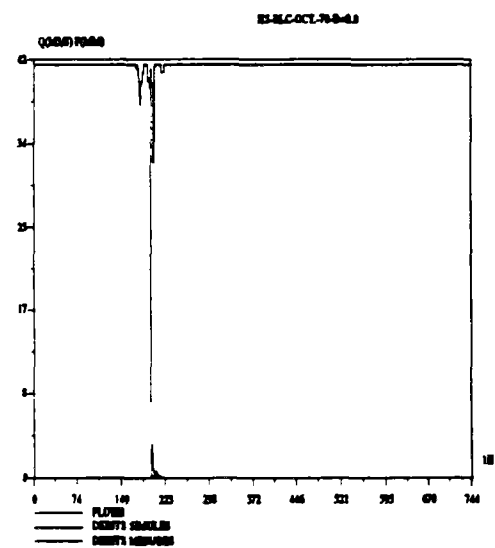
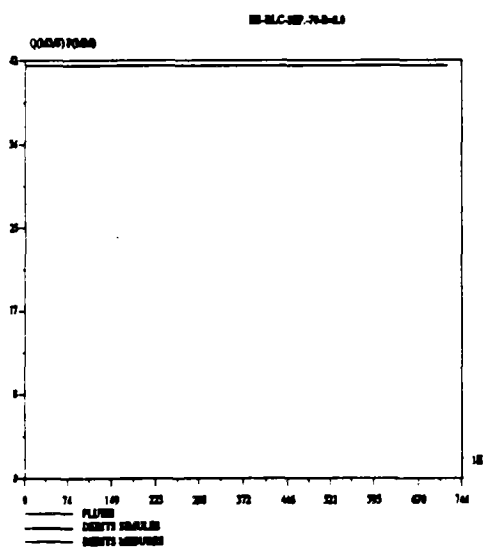
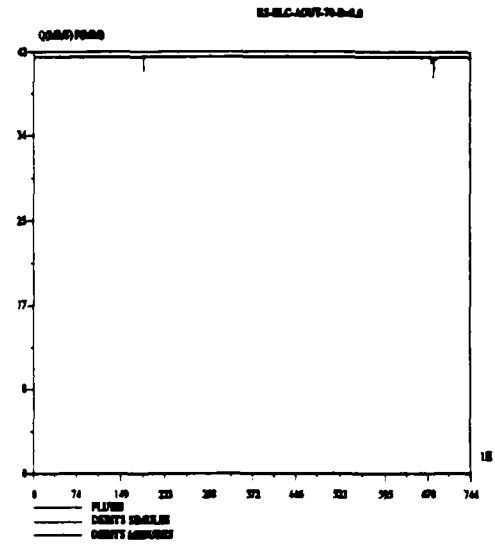
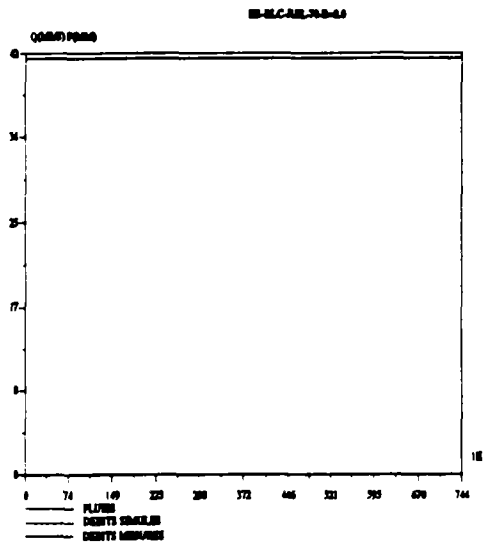
### Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1969 deuxième semestre 1969



### Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1970 premier semestre 1970

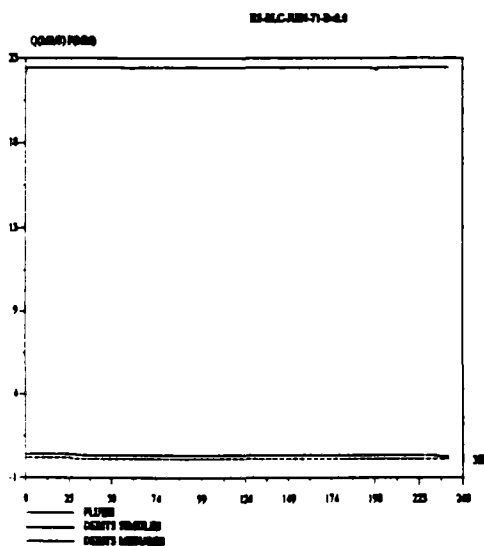
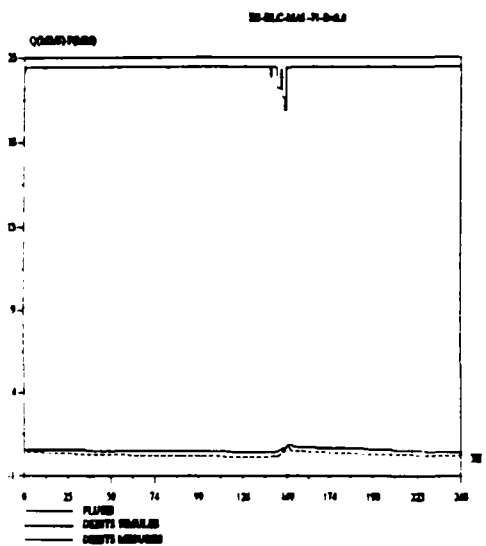
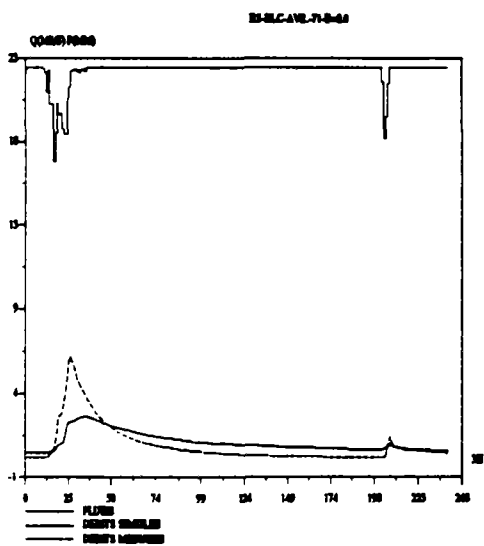
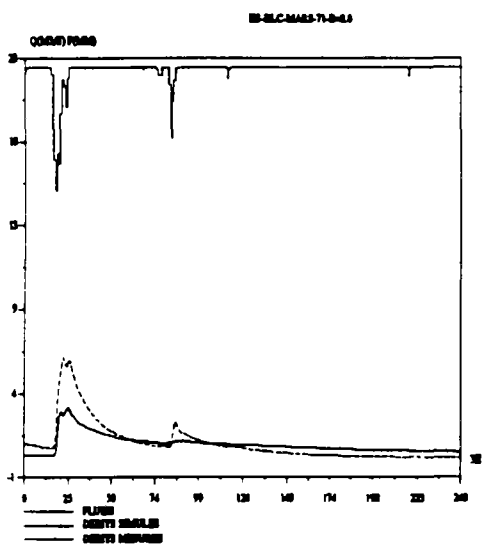
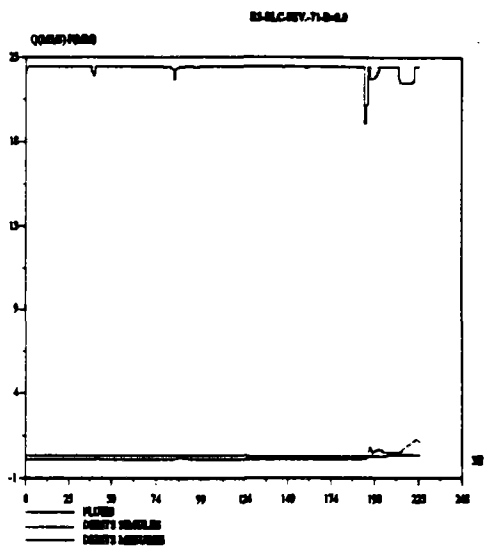
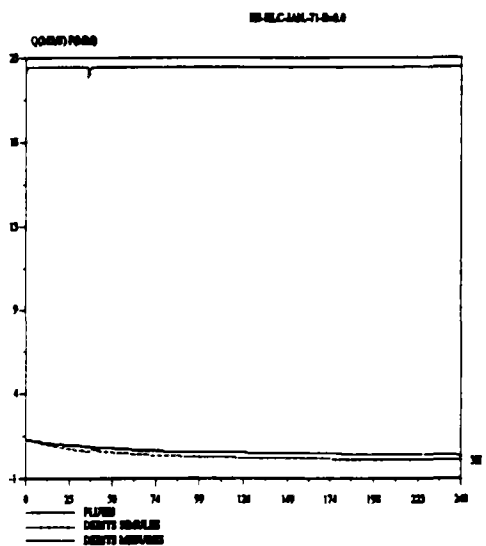


Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1970  
deuxième semestre 1970

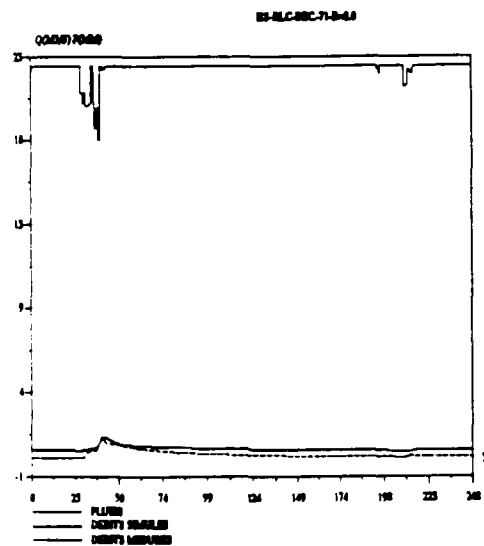
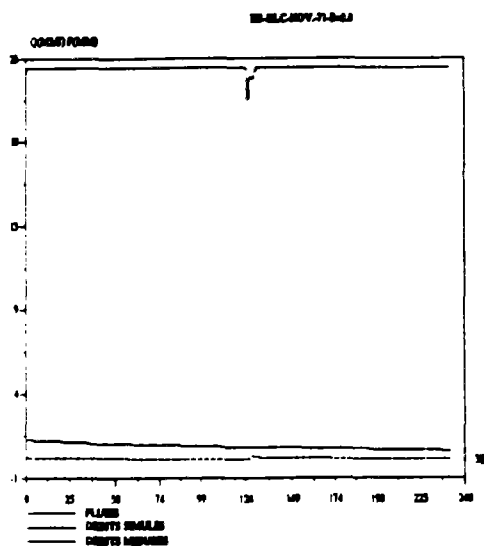
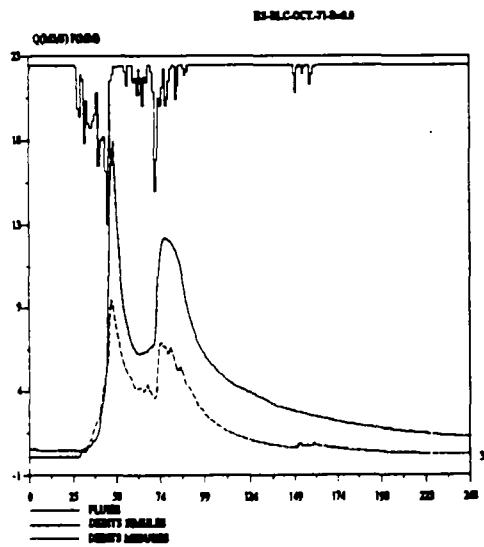
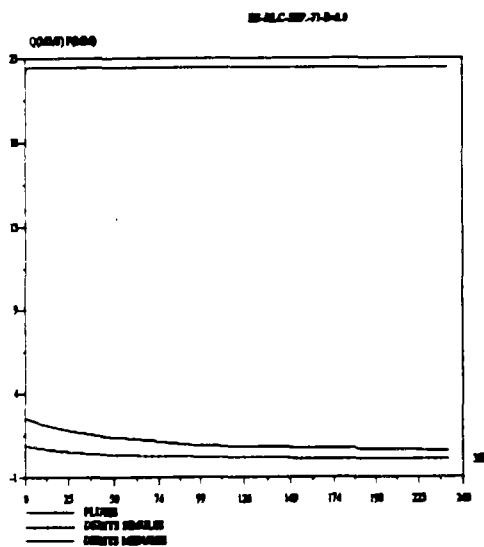
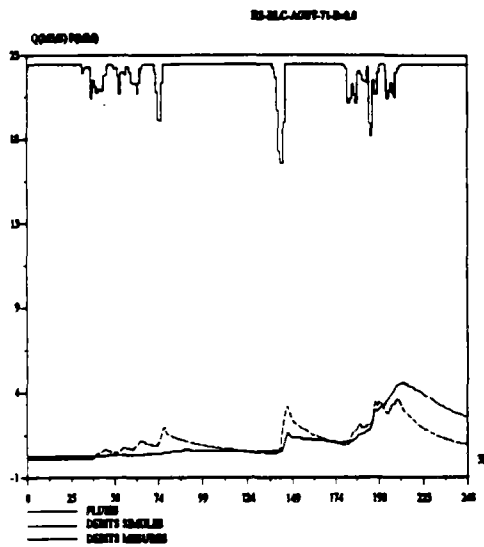
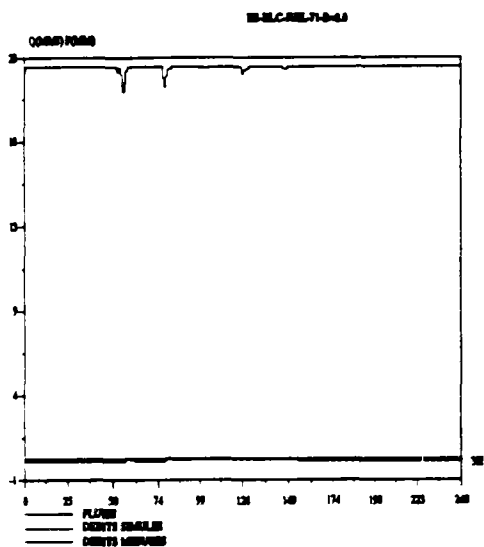




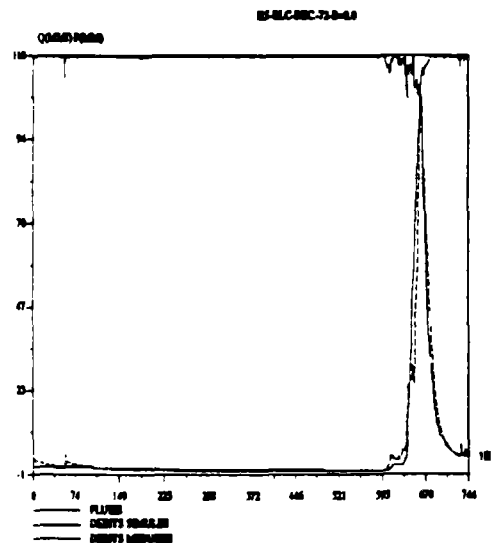
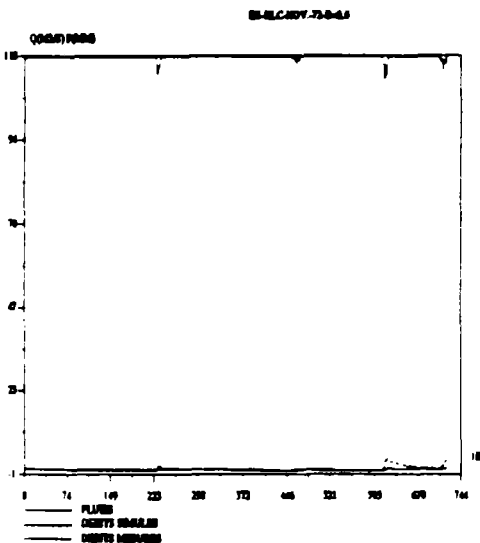
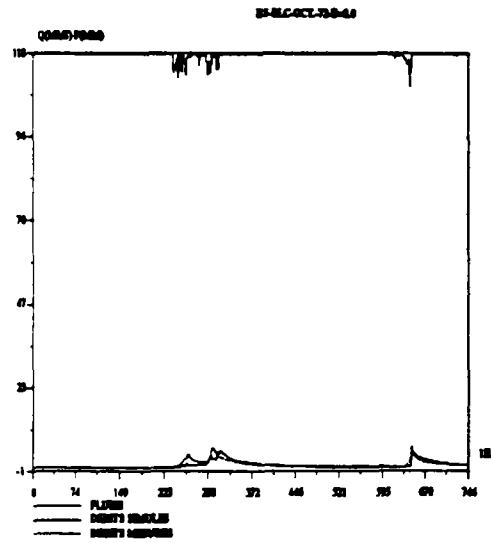
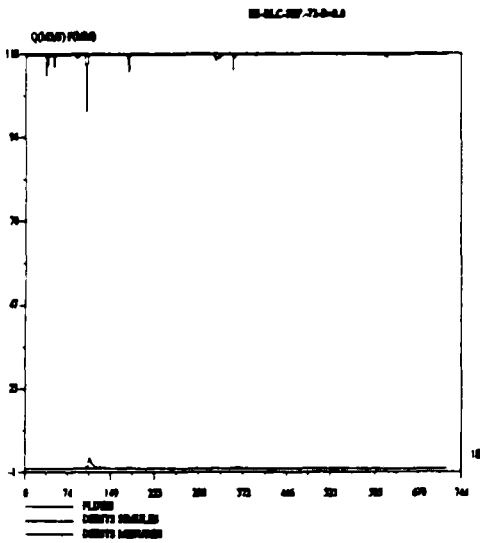
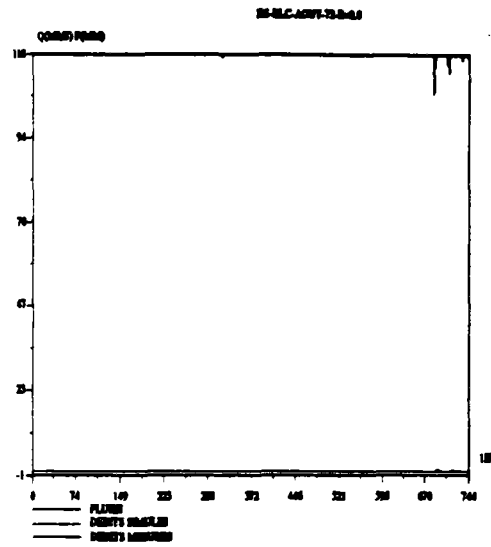
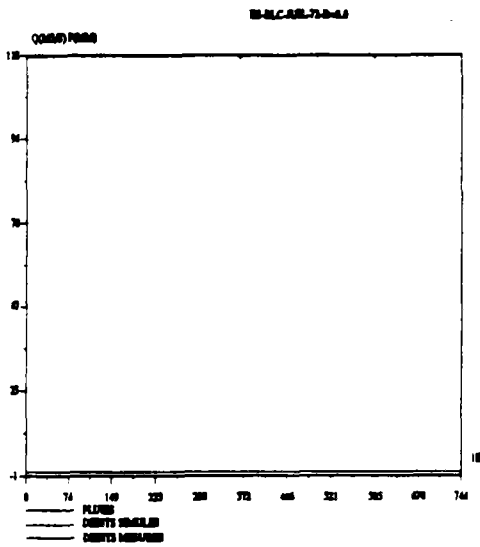
### Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1971 premier semestre 1971



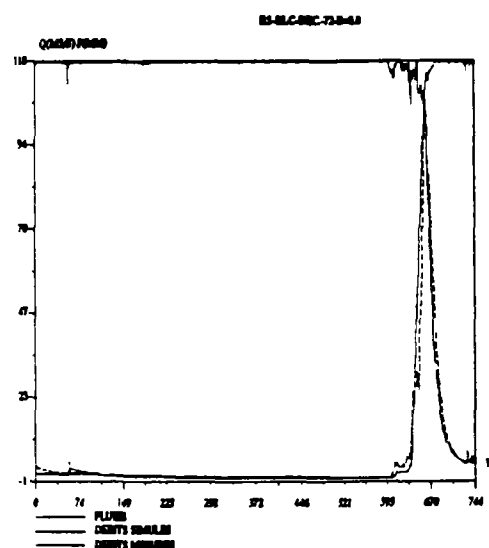
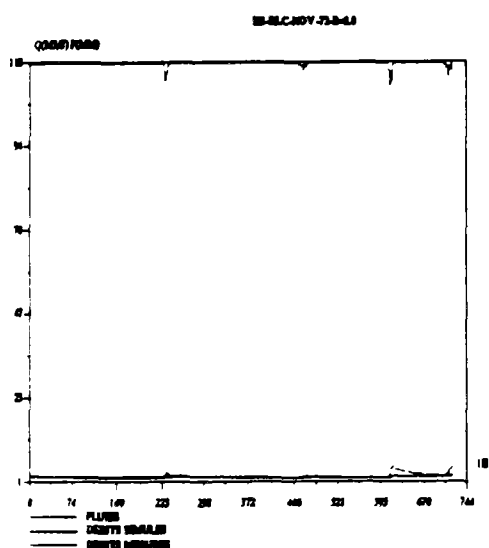
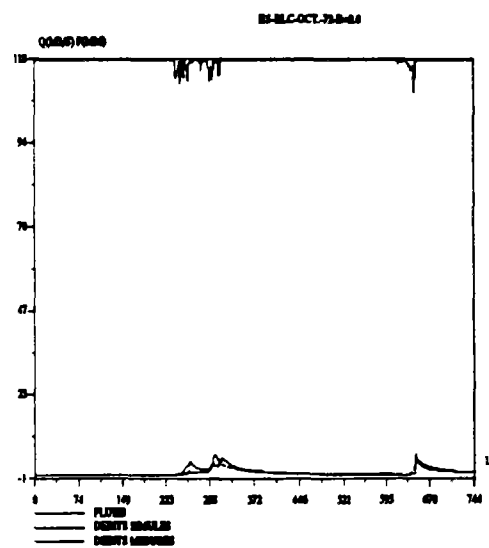
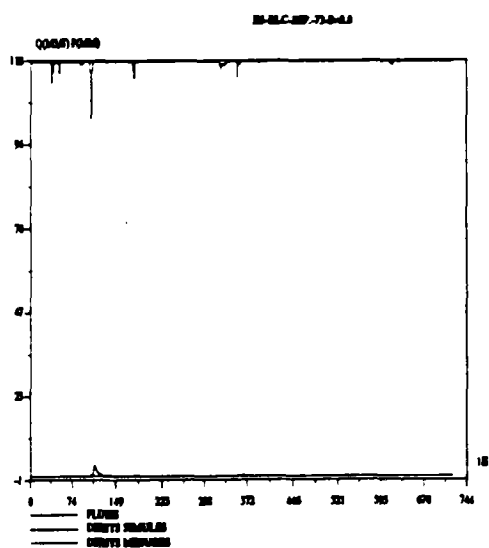
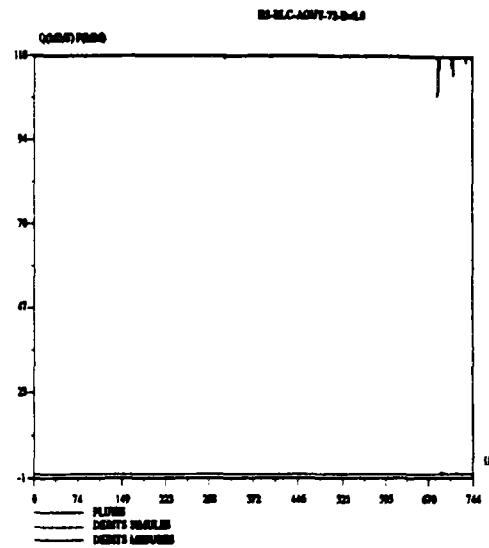
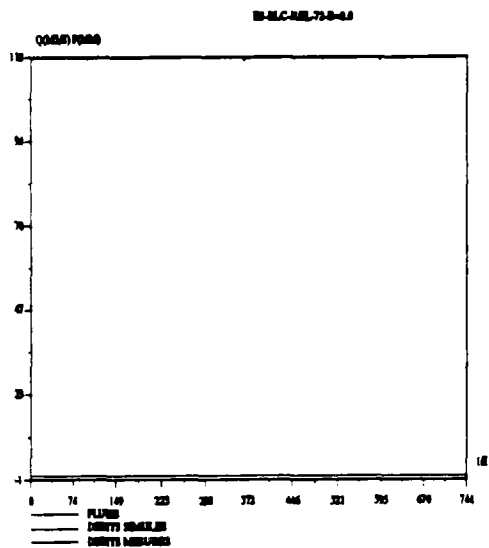
Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1971  
deuxième semestre 1971



### Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1972 premier semestre 1972



### Calage de GR3H au Réal-Collobrier sur l'année 1972 deuxième semestre 1972



## ANNEXE-II-B

### Calage du modèle GR3 horaire sur l'Orgeval année par année

(6 graphiques mensuels par page)

#### Rappel des Résultats numériques

Année	lnA	lnB	ln(C-0.5)	NS (%)	EB(%)	EP (%)	RD (%)
1974	5.78	6.90	2.03	74.0	-10.3	90.2	72.4
1975	5.61	7.29	2.01	70.3	-19.1	76.3	62.2
1976	6.25	5.97	-3.06	68.5	-11.4	86.0	74.1
1977	5.55	6.87	2.02	67.0	-46.0	69.7	52.1
moyenne	5.80	6.76	0.75	70.0	-21.7	80.6	65.2
écart-type	0.27	0.48	2.20	2.6	14.4	8.0	8.8
calage global	5.82	6.99	2.01	70.2	-20.4	77.8	29.2

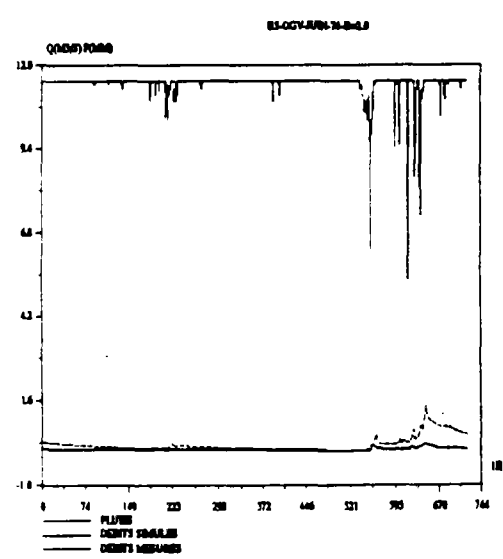
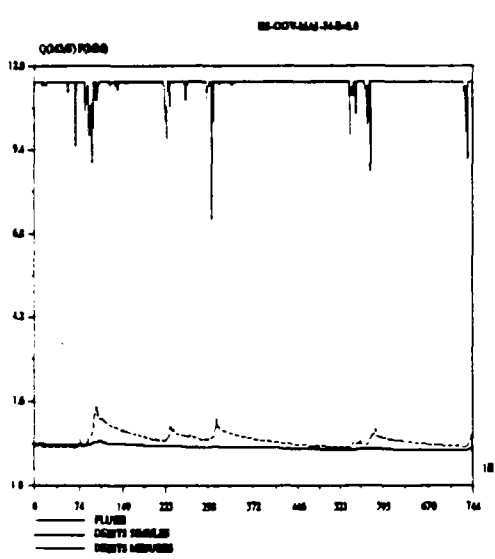
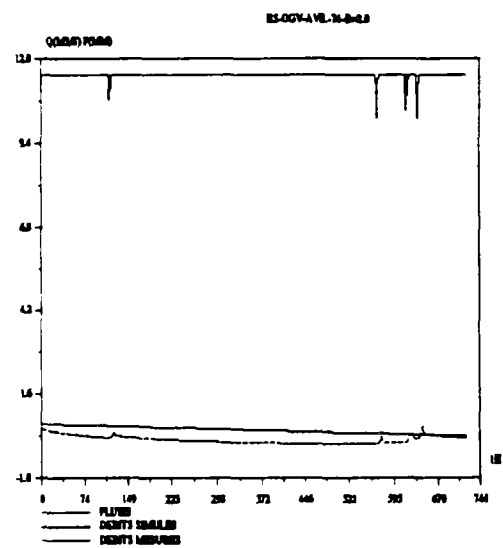
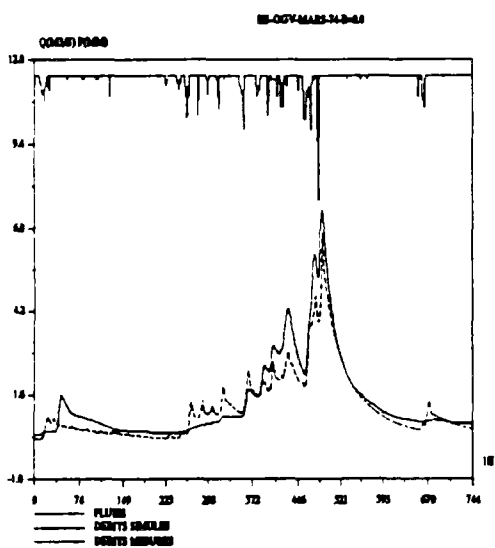
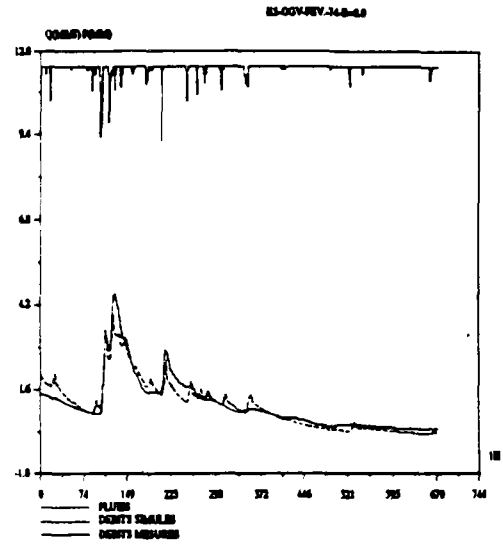
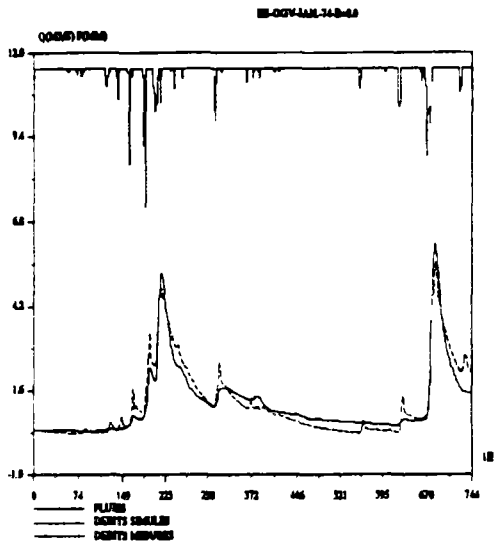
NS: critère de Nash-Sutcliffe

EB: erreur relative de bilan

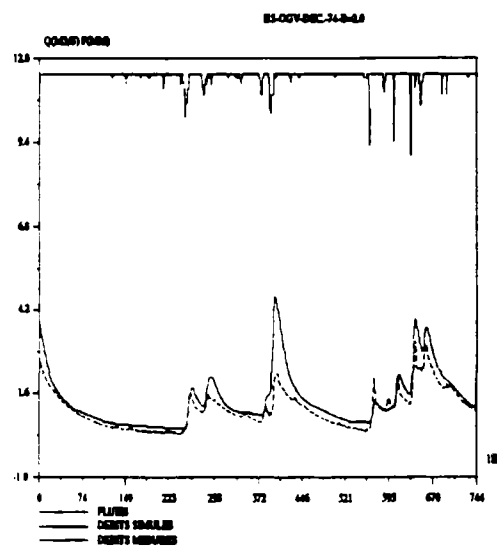
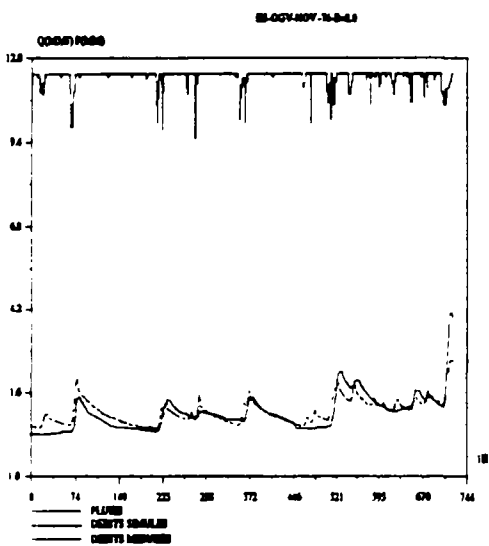
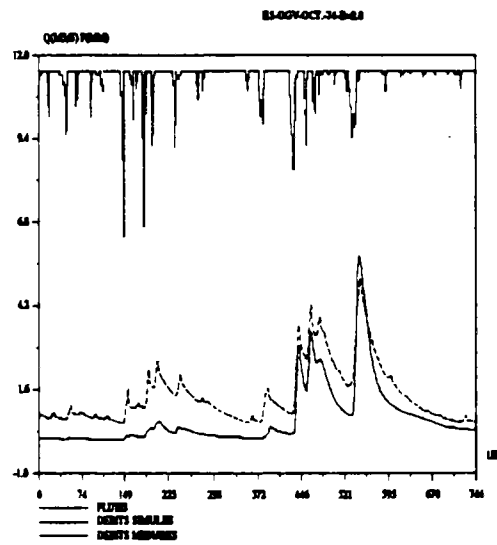
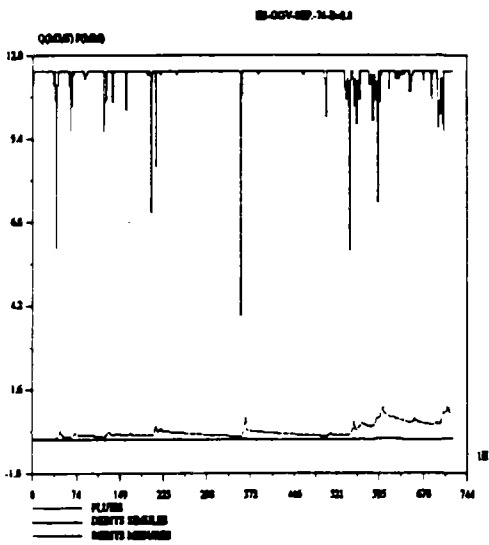
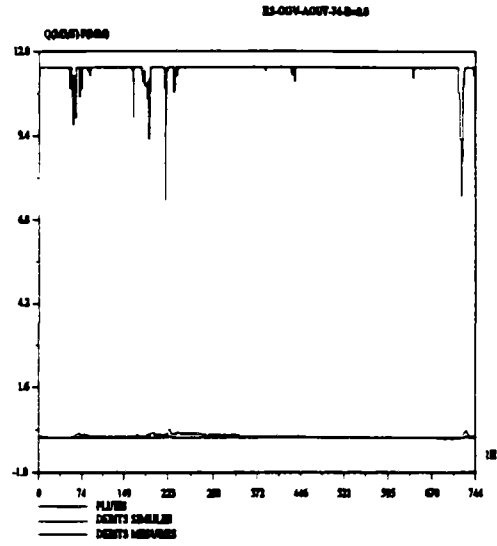
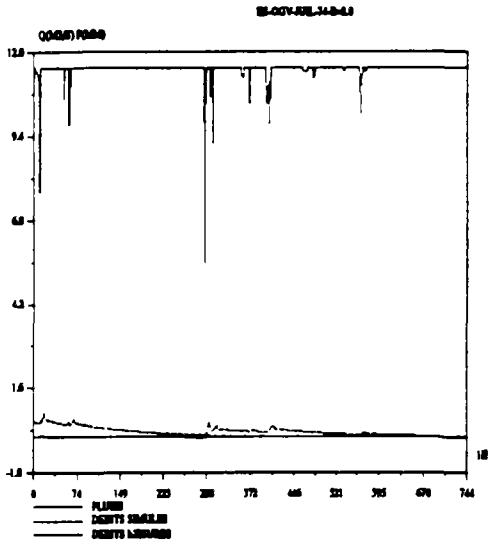
RD: rapport des durées à mi-crue

EP: rapport des pointes de crues

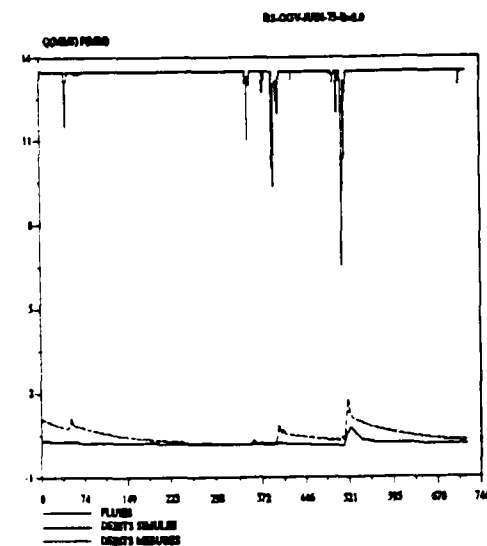
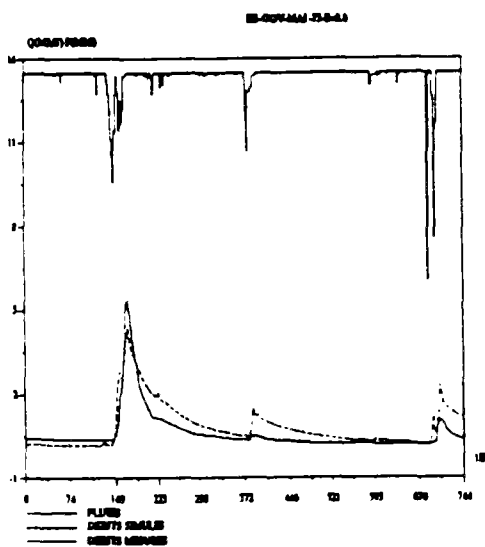
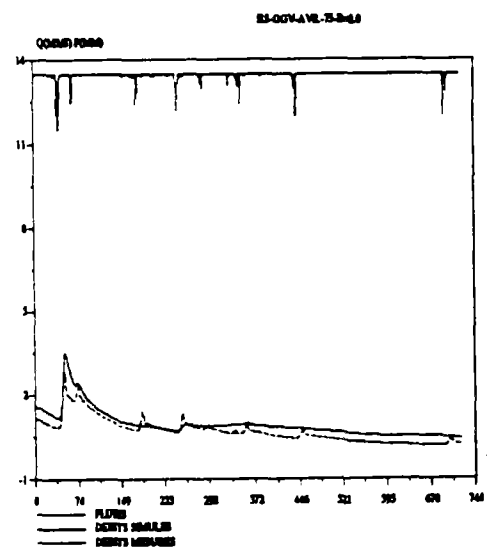
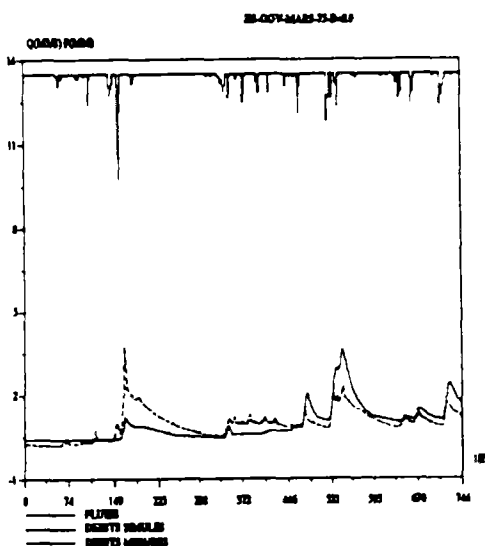
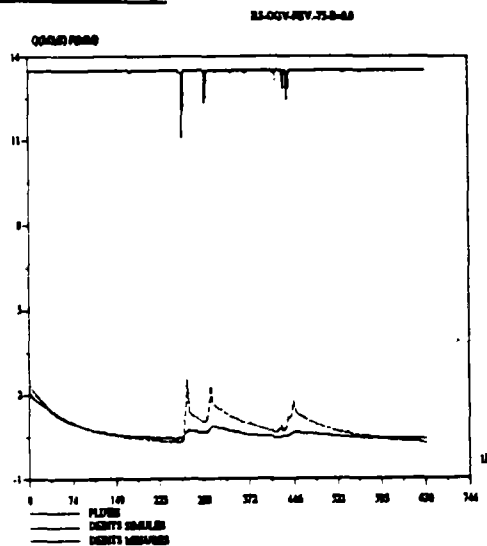
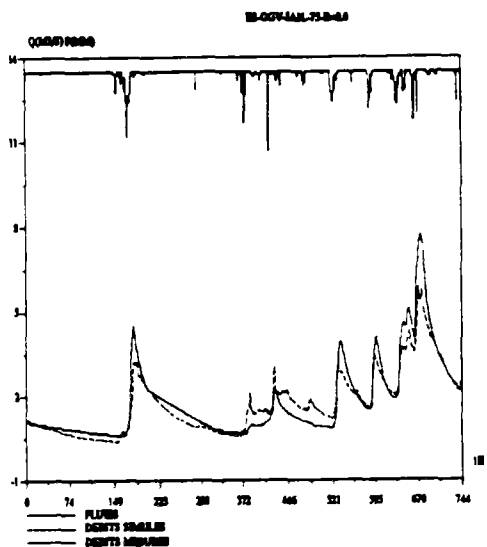
### Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1974 premier semestre 1974



### Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1974 deuxième semestre 1974

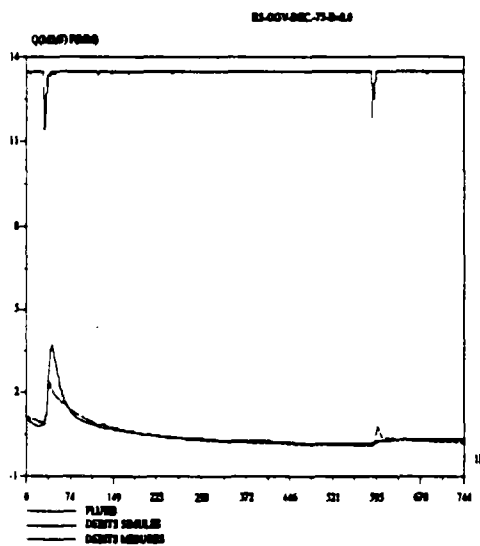
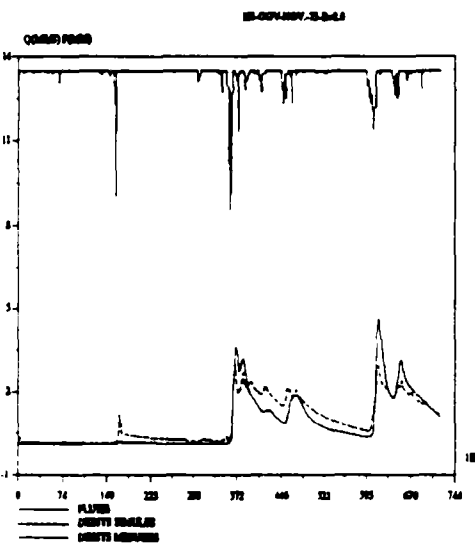
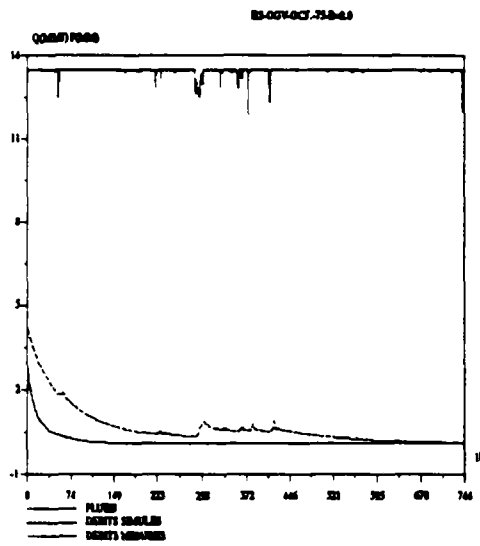
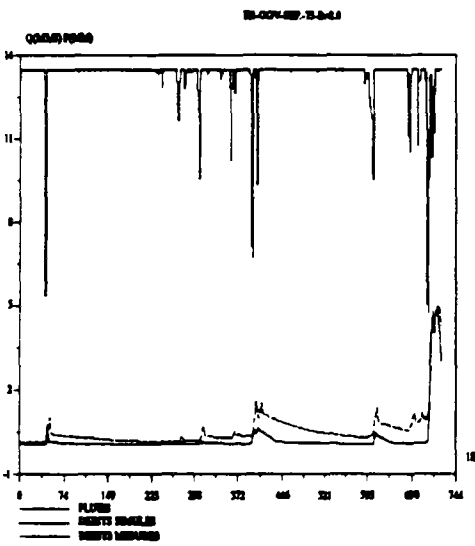
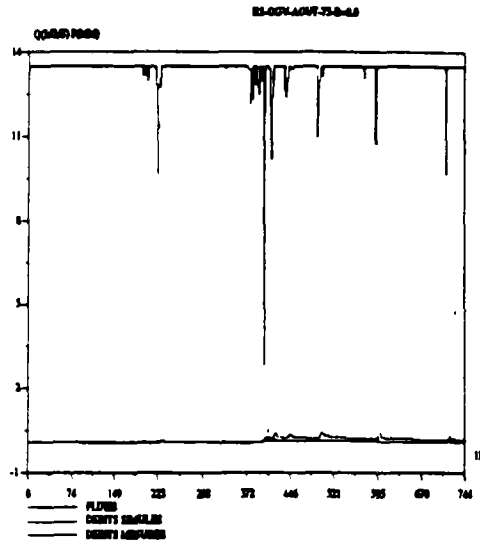
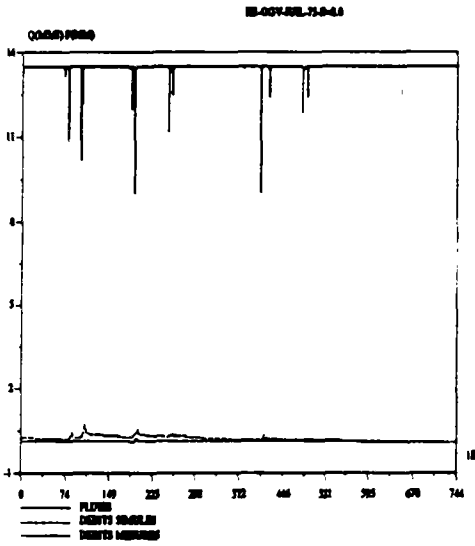


### Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1975 premier semestre 1975

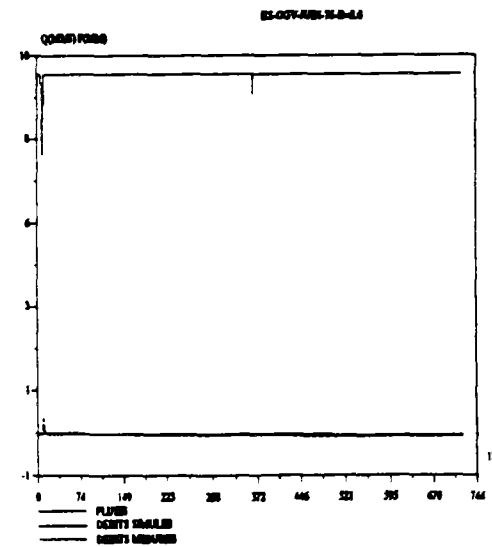
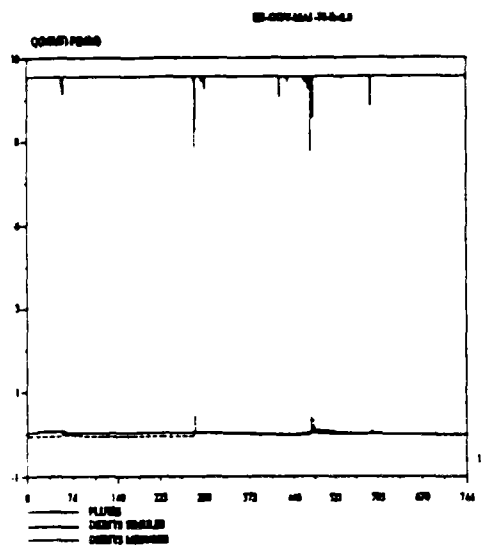
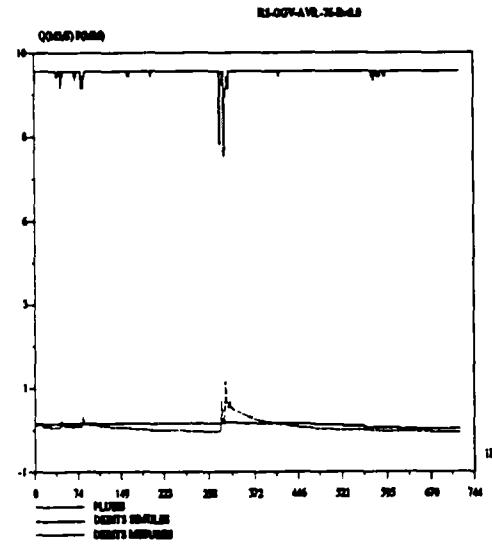
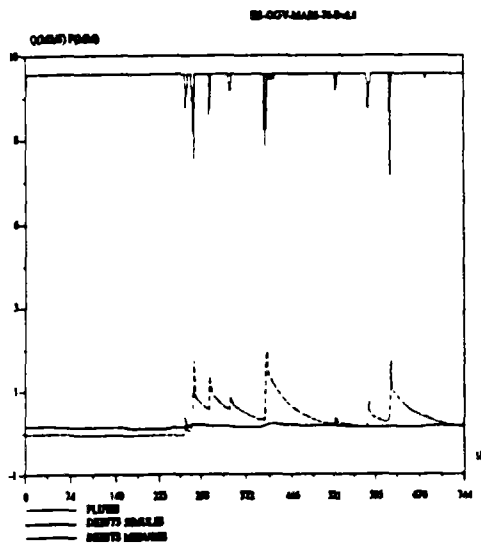
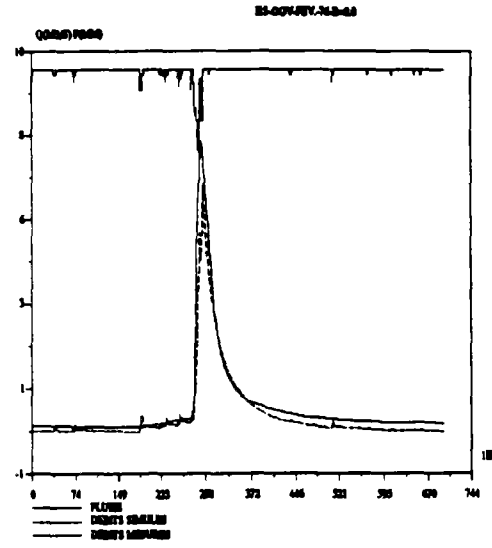
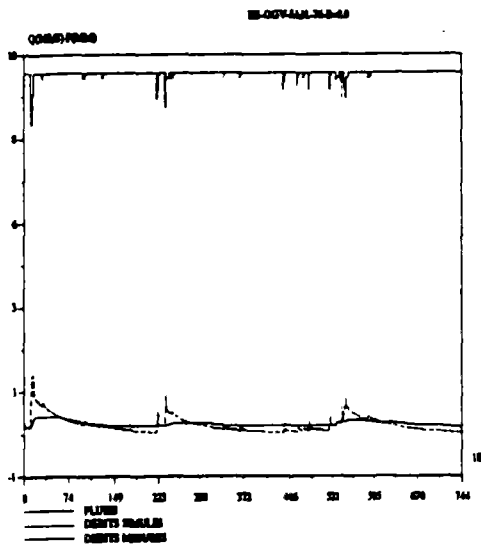




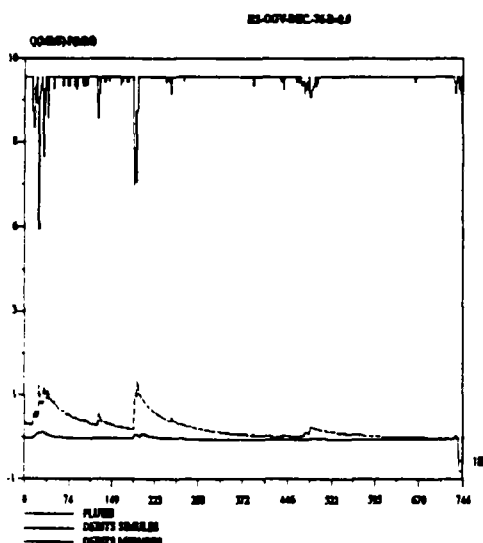
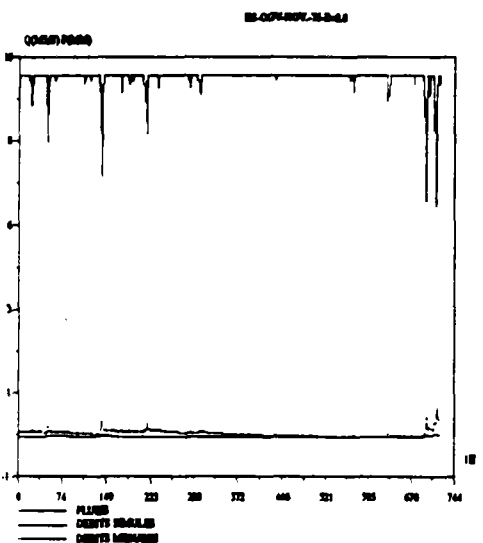
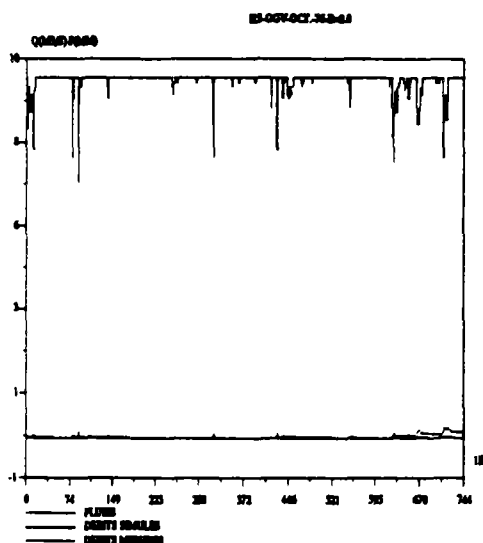
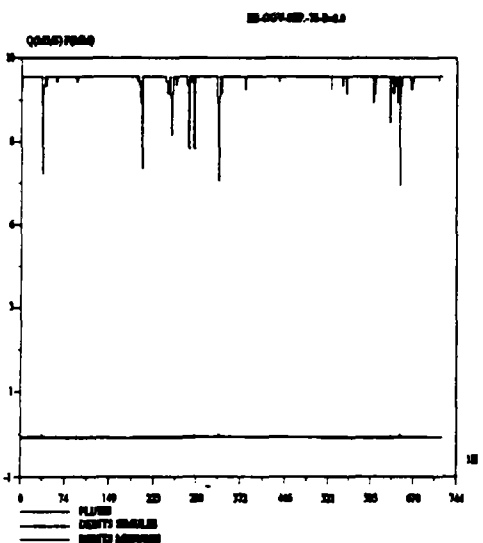
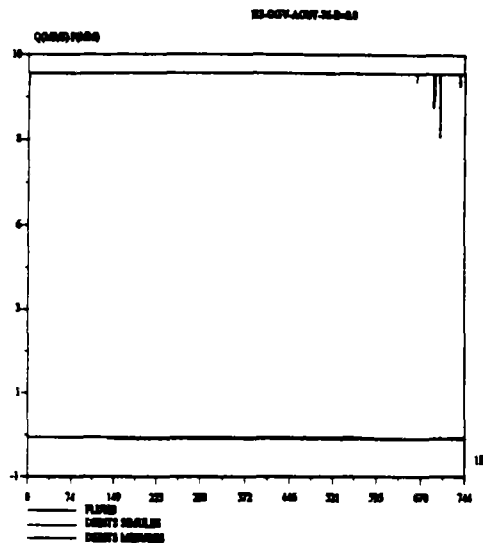
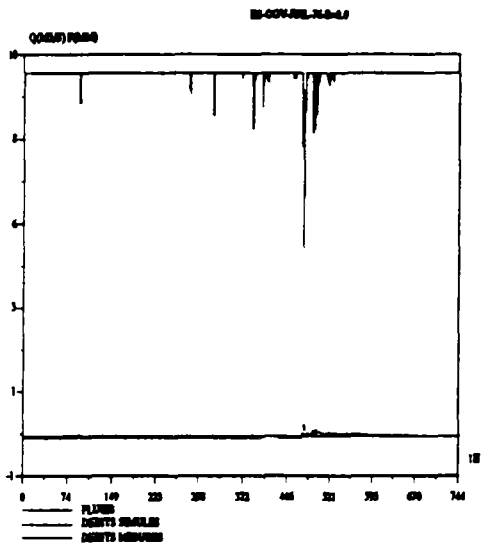
Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1975  
deuxième semestre 1975



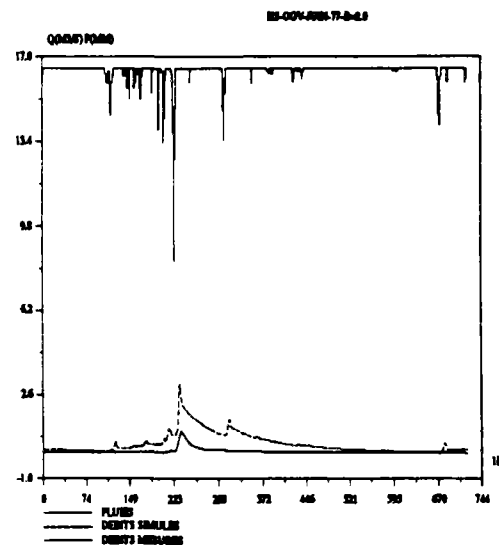
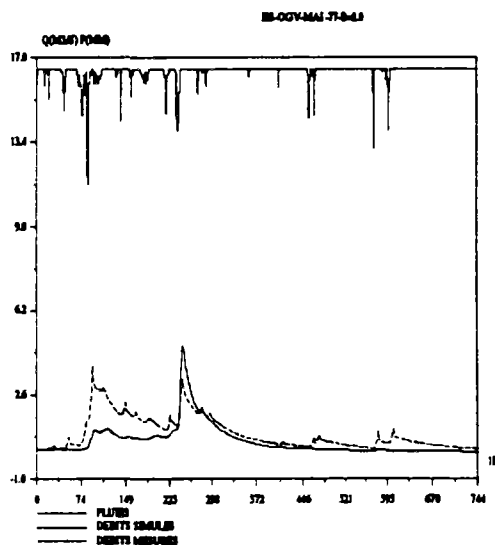
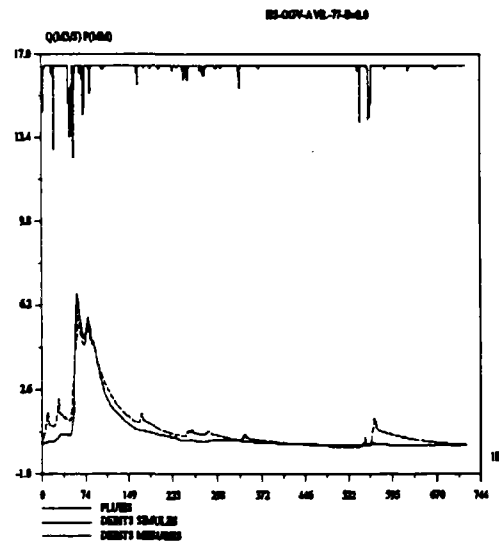
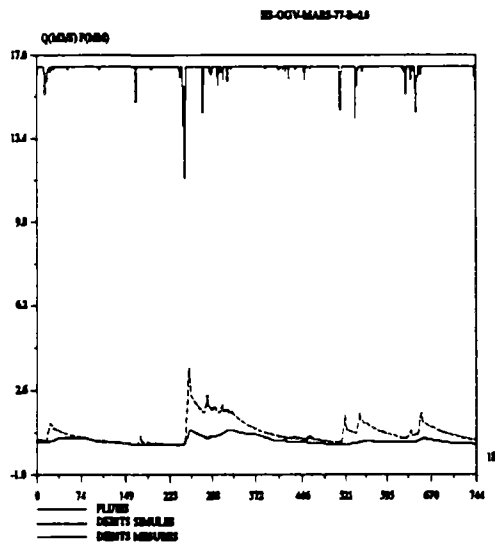
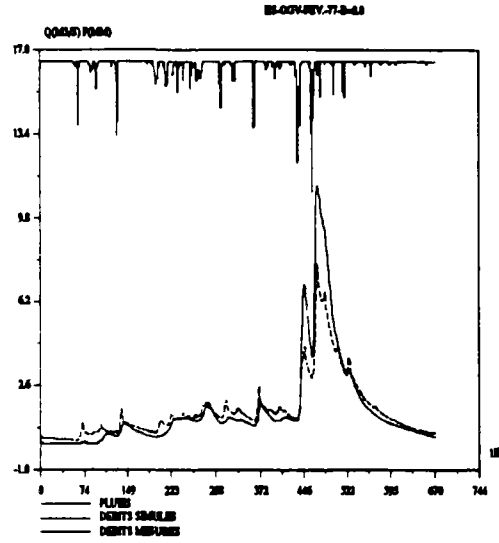
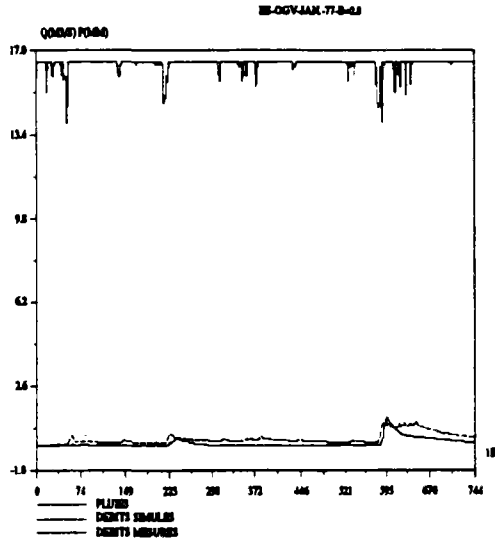
### Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1976 premier semestre 1976



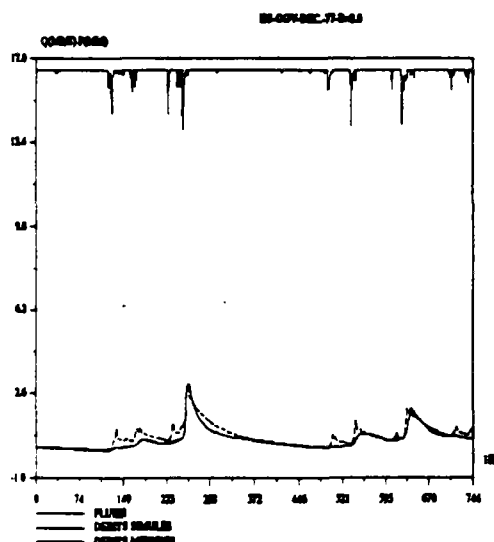
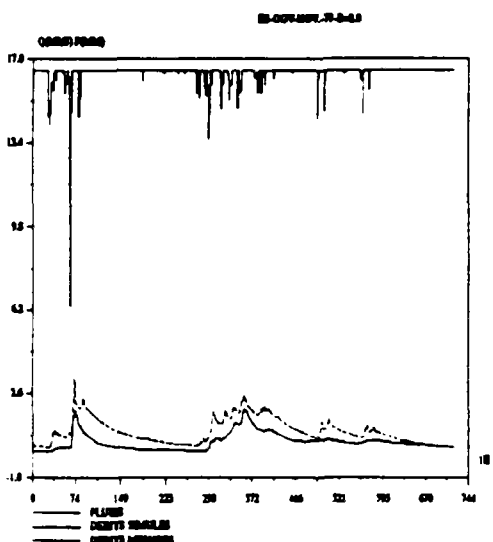
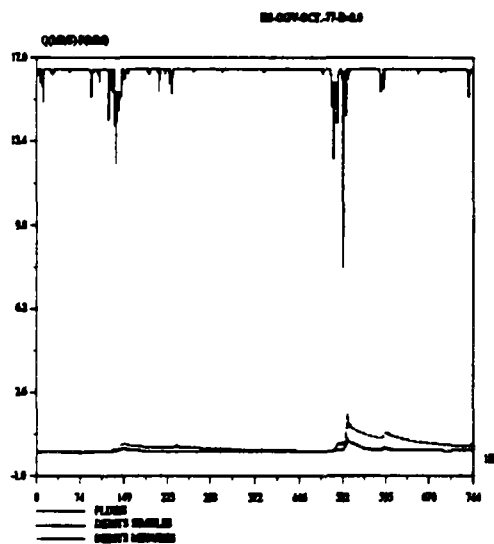
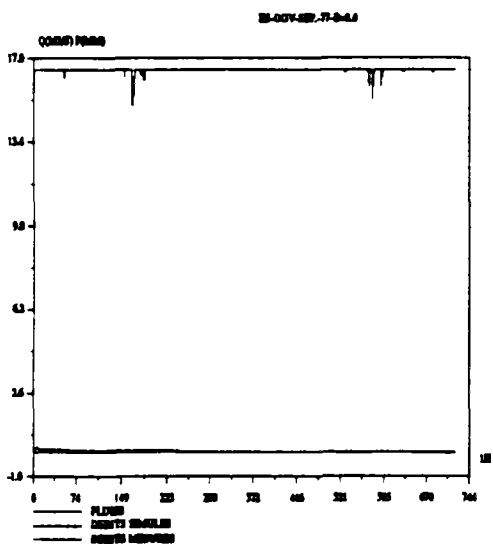
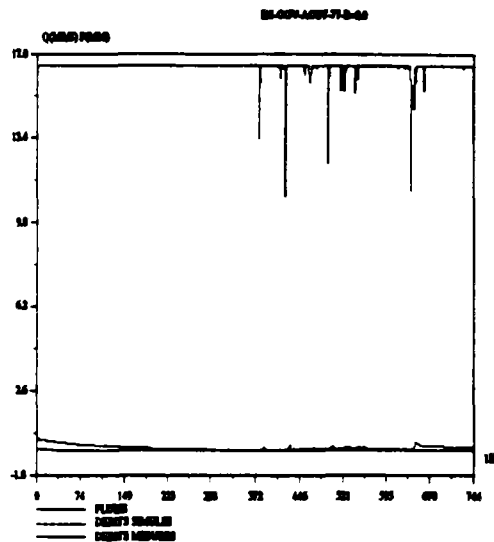
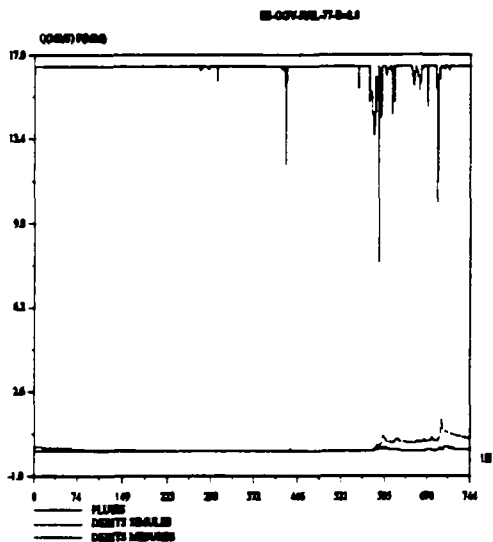
### Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1976 deuxième semestre 1976



### Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1977 premier semestre 1977



### Calage de GR3H à l'Orgeval sur l'année 1977 deuxième semestre 1977





## **ANNEXE-III**

### **Validation du modèle GR3 horaire sur deux échantillons de crues sur le Réal Collobrier**

**ANNEXE-III-A calage sur l'échantillon-I et validation sur l'échantillon-II**

**III-A-1 calage sur l'échantillon-I**

**III-A-2 validation sur l'échantillon-II**

**ANNEXE-III-B calage sur l'échantillon-II et validation sur l'échantillon-I**

**III-B-1 calage sur l'échantillon-II**

**III-B-2 validation sur l'échantillon-I**





### ANNEXE-III-A-1 calage sur l'échantillon-I

#### 1. Valeurs des paramètres calées

$$\ln A = 5.00; \ln B = 7.15; \ln(C-0.5) = 1.13$$

#### 2. Moyennes et écarts-types des critères sur 26 crues de l'échantillon-I

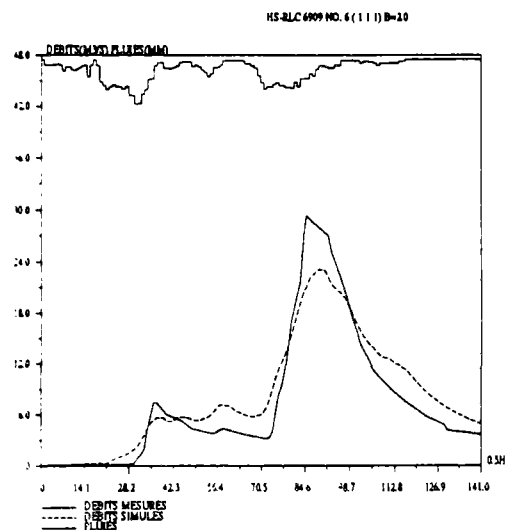
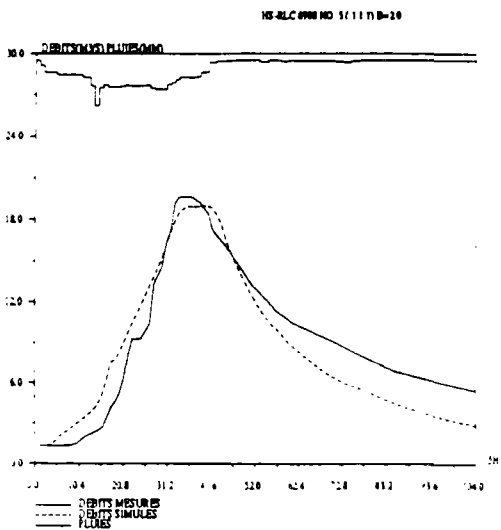
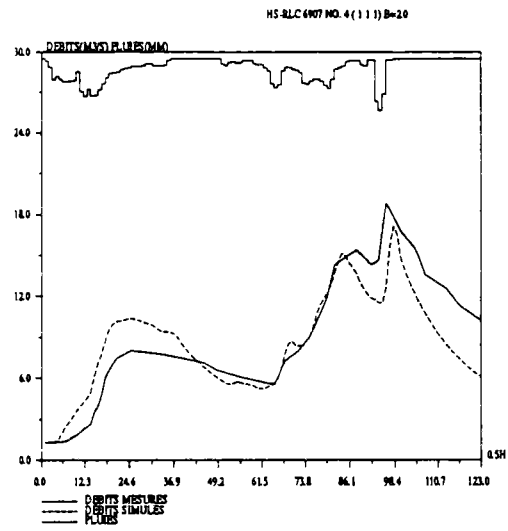
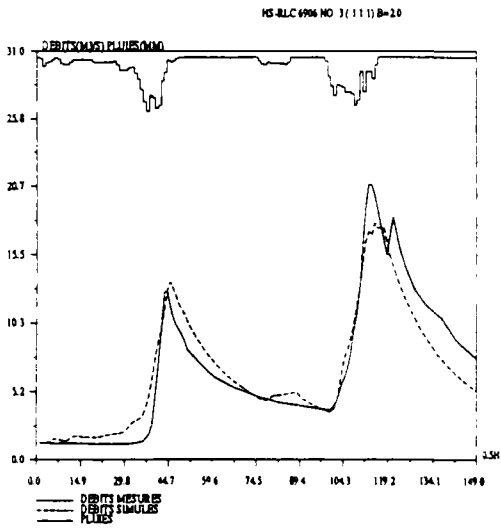
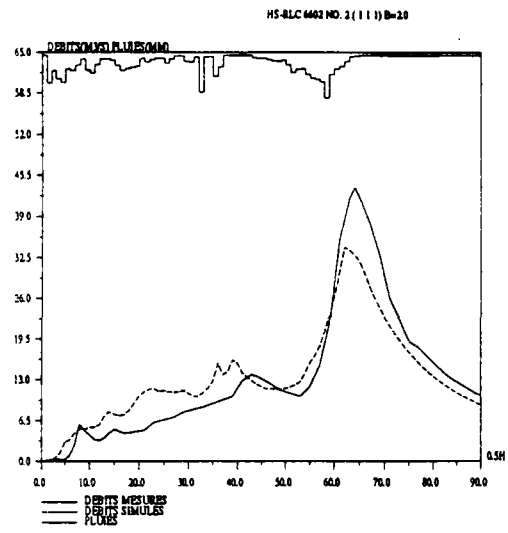
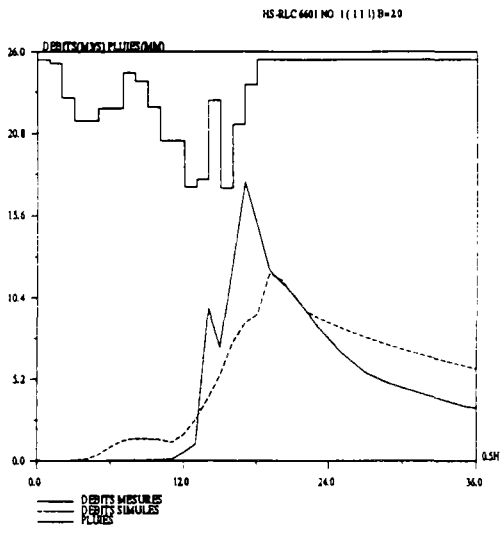
critere de Nash-Sutcliff (NS):	77.9 %
écart-type de NS:	18.60 %
erreur relative de bilan (EB):	-6.3 %
écart-type de EB:	13.71 %
rapport des durées à mi-crue (RD):	108.4 %
écart-type de RD:	45.52 %
rapport des pointes de crues (EP):	82.6 %
écart-type de EP:	13.09 %
erreur de pointe de crue (ED):	-0.7 pas de temps
écart-type de ED:	3.43 pas de temps

#### 3. Valeurs des critères de chaque crue de l'échantillon-I issues du calage

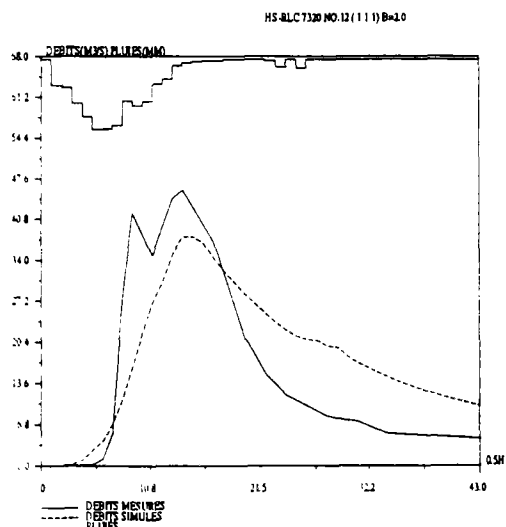
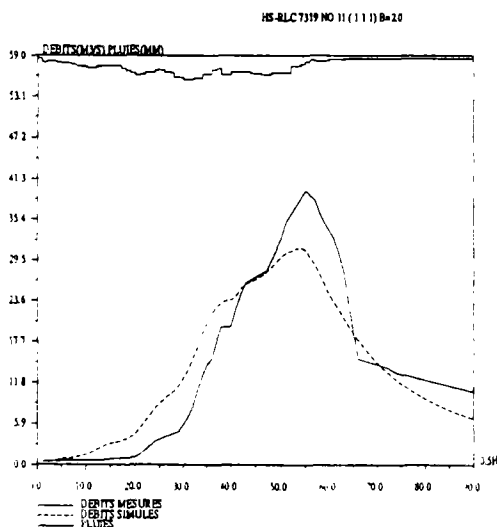
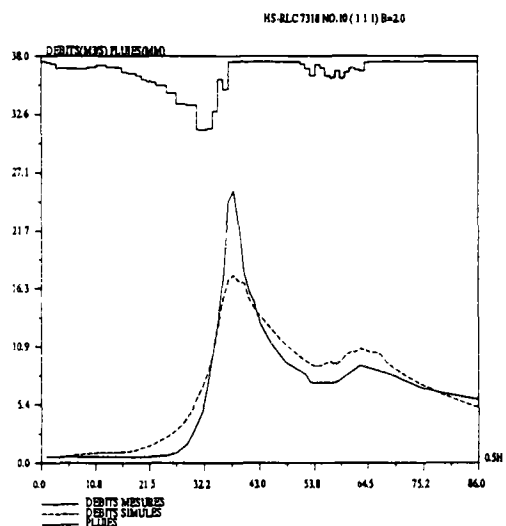
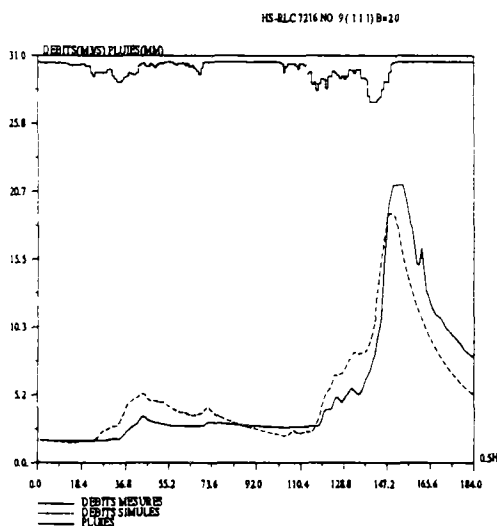
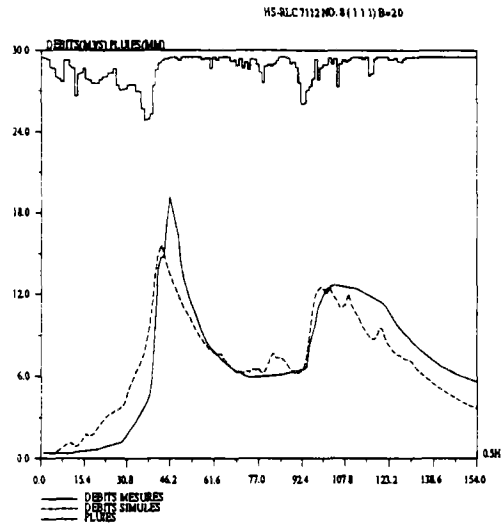
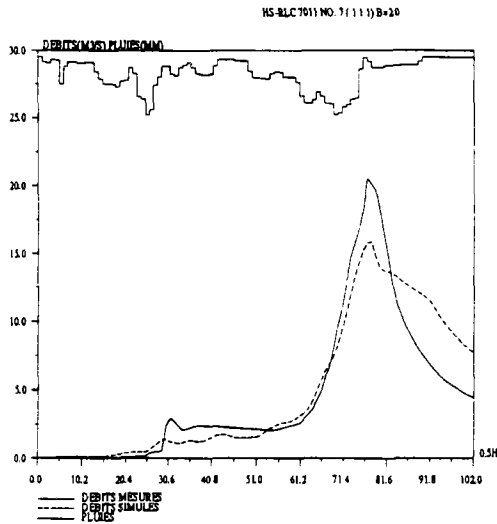
ordre	codage	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (pdt)
1	6601	68.5	-7.0	75.0	67.6	-2.0
2	6602	85.3	-0.9	80.0	78.4	2.0
3	6906	89.7	0.8	87.9	86.0	-2.0
4	6907	74.7	4.6	108.3	91.0	-2.0
5	6908	85.3	8.1	87.5	96.8	-6.0
6	6909	89.5	-11.6	109.1	78.6	-4.0
7	7011	85.0	-5.2	153.3	77.1	-1.0
8	7112	80.5	2.9	76.1	81.5	3.0
9	7216	85.3	0.2	77.8	89.9	1.0
10	7318	89.8	-8.0	111.1	69.0	0.0
11	7319	86.9	1.5	125.0	78.8	1.0
12	7320	61.3	-18.4	108.3	82.8	0.0
13	7422	87.2	-3.7	87.5	81.6	1.0
14	7426	41.5	-10.6	0.0	40.9	-1.0
15	7527	83.5	-13.9	195.5	91.1	-2.0
16	7630	92.5	-3.6	110.0	78.6	-2.0
17	7734	93.5	-6.5	108.3	96.3	1.0
18	7836	84.3	6.1	95.7	105.0	9.0
19	7837	90.7	0.4	91.7	98.4	-1.0
20	7938	96.5	1.3	95.1	87.3	1.0
21	8040	63.3	9.7	87.2	100.9	3.0
22	8041	12.3	-64.6	266.7	83.2	-7.0
23	8142	89.8	-10.2	133.3	83.8	1.0
24	8343	60.4	-14.1	110.5	67.8	-9.0
25	8344	58.6	-11.5	125.0	66.9	-2.0
26	8345	88.7	-9.7	111.8	88.0	0.0

#### 4. Figures du calage sur l'ensemble des crues de l'échantillon-I (6 figures par page sauf la dernière)

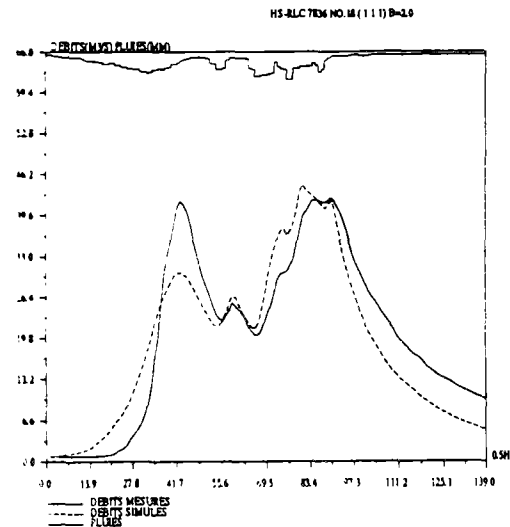
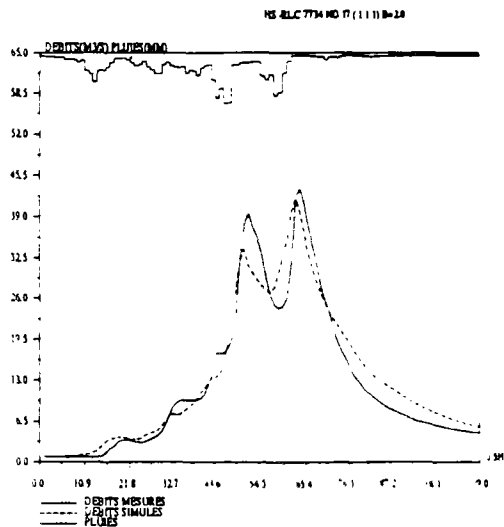
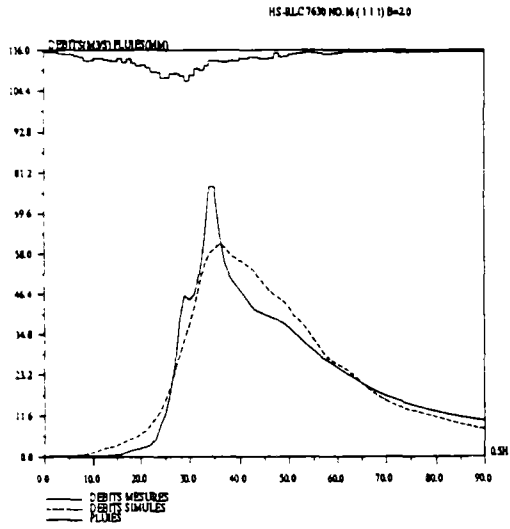
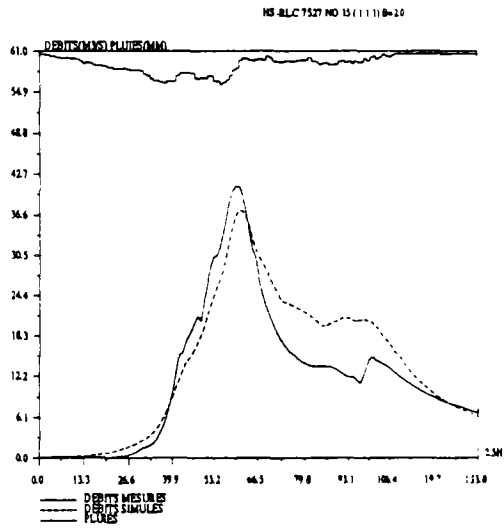
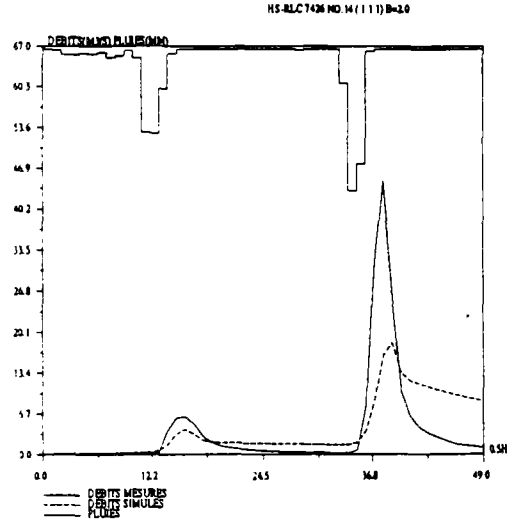
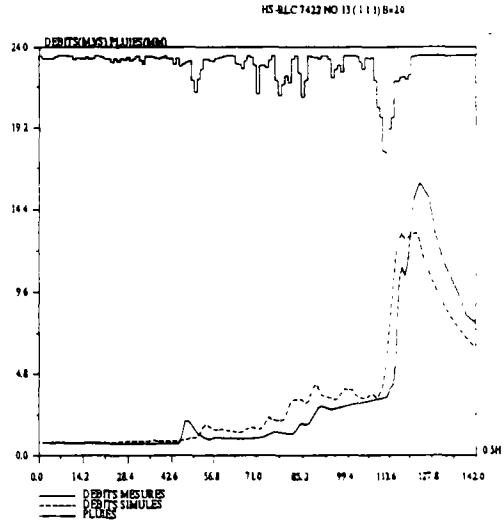
### Calage sur l'échantillon-I (N°1 - N°6)



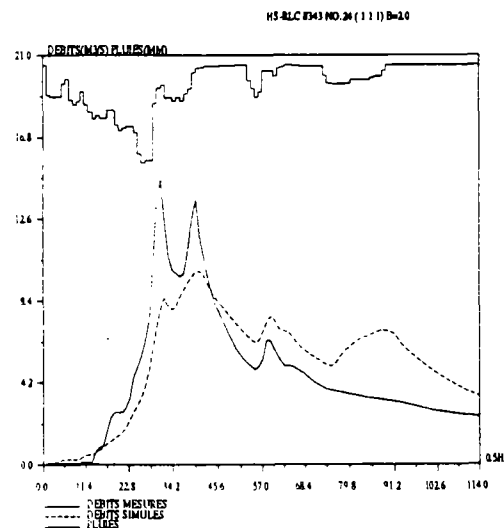
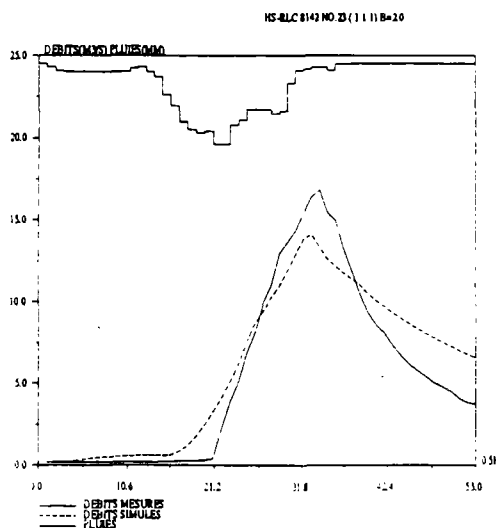
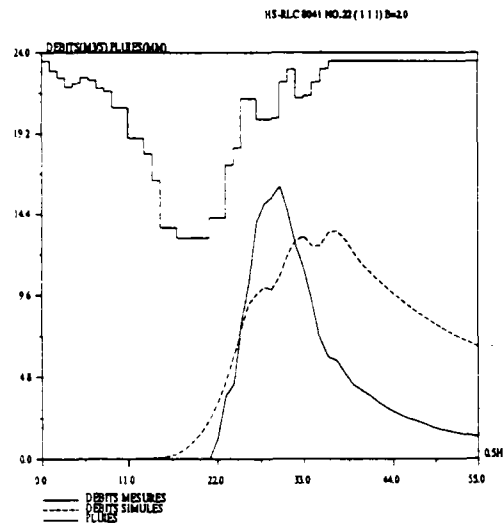
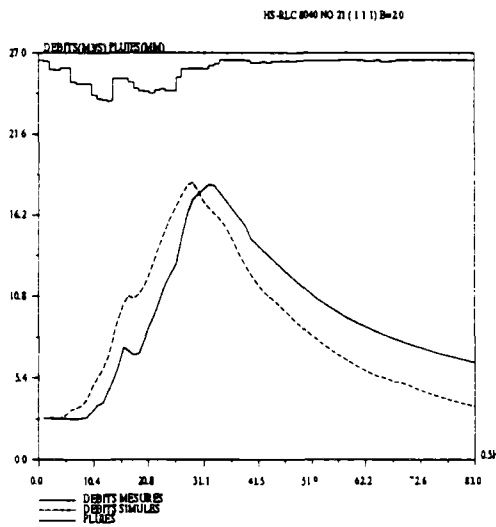
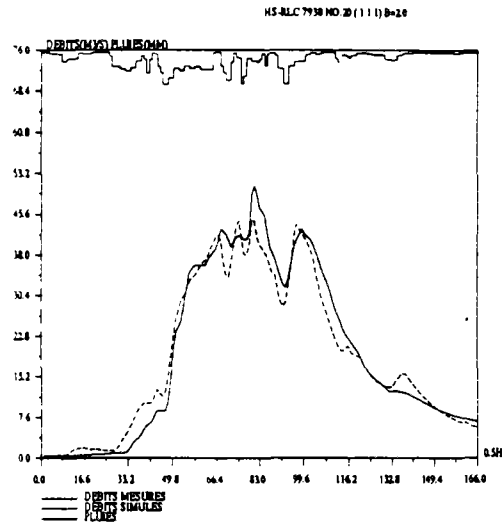
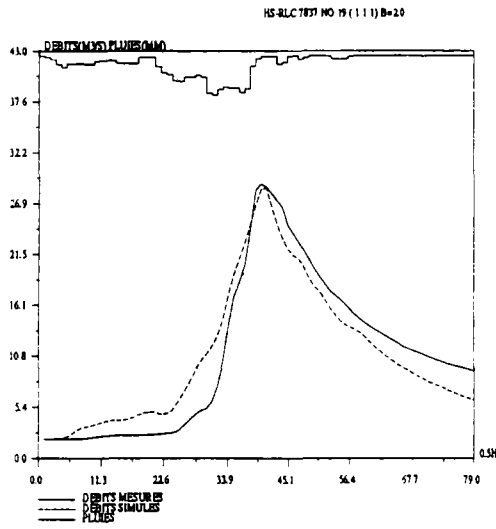
Calage sur l'échantillon-I (N°7 - N°12)



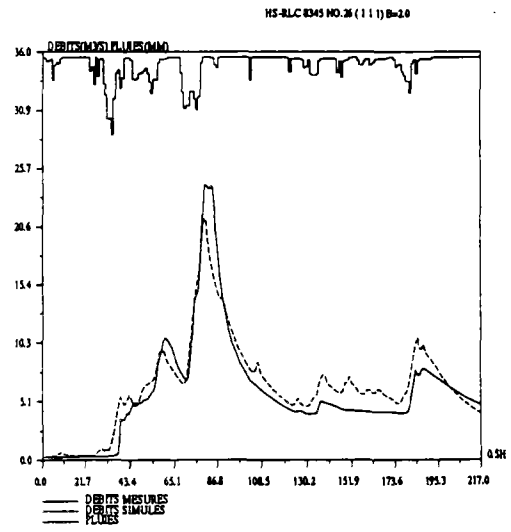
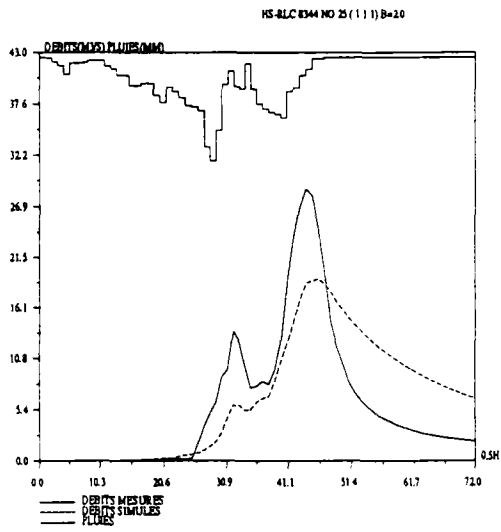
Calage sur l'échantillon-I (N°13 - N°18)



### Calage sur l'échantillon-I (N°19 - N°24)



Calage sur l'échantillon-I (N°25 - N°26)



## ANNEXE-III-A-2 validation sur l'échantillon-II

### 1. Valeurs des paramètres utilisées pour la validation

$$\ln A = 5.00; \ln B = 7.15; \ln(C-0.5) = 1.13$$

### 2. Moyennes et écarts-types des critères 18 crues de l'échantillon-II pour la validation

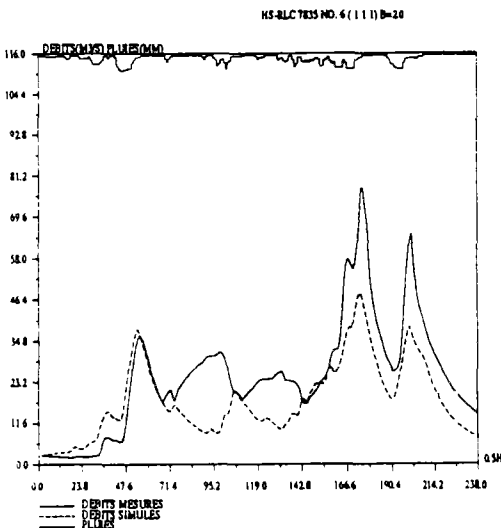
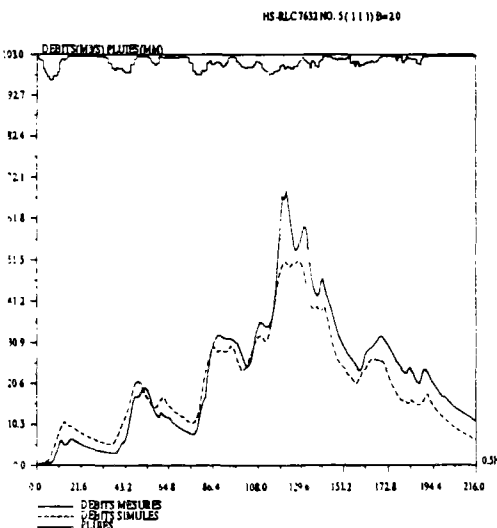
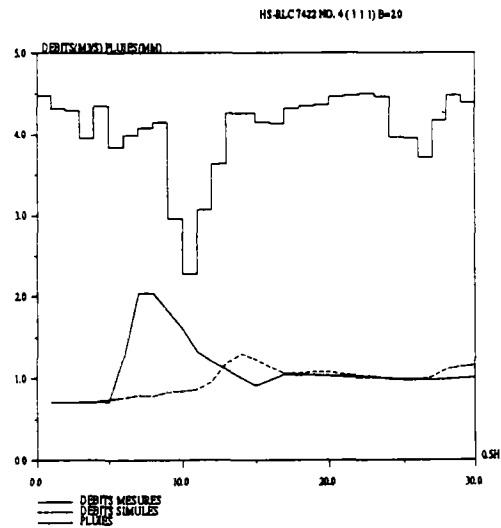
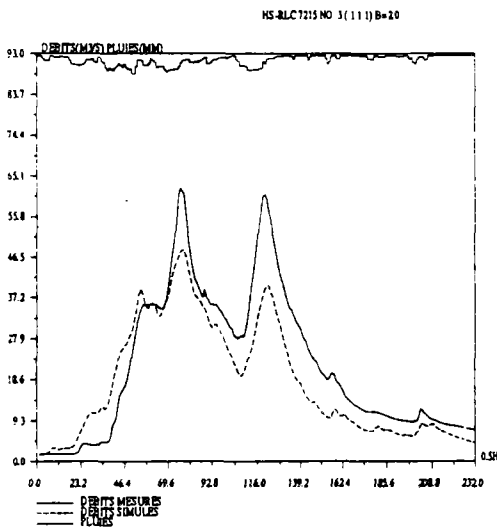
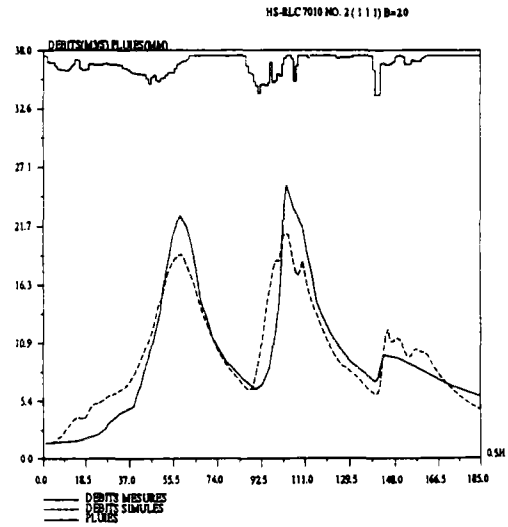
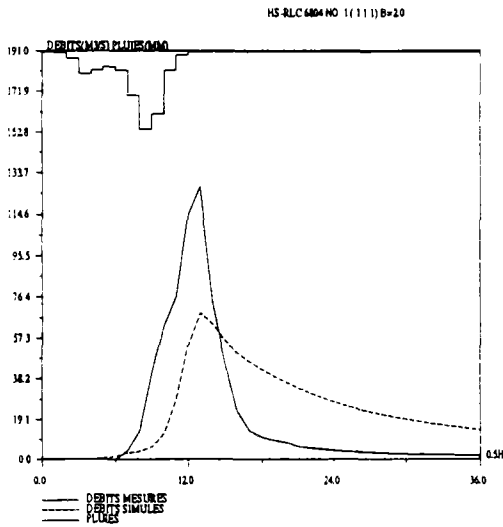
critere de Nash-Sutcliff (NS):	65.9 %
écart-type de NS:	44.02 %
erreur relative de bilan (EB):	5.4 %
écart-type de EB:	12.70 %
rapport des durées à mi-crue (RD):	79.5 %
écart-type de RD:	28.09 %
rapport des pointes de crues (RD):	84.5 %
écart-type de RD:	16.75 %
erreur de pointe de crue (ED):	-1.1 pas de temps
écart-type de ED:	3.08 pas de temps

### 3. Valeurs des critères de chaque crue de l'échantillon-II pour la validation

ordre	codage	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (pdt)
1	6804	36.6	-27.3	50.0	54.2	0.0
2	7010	75.8	-2.0	107.0	82.4	0.0
3	7215	75.3	17.0	68.4	77.4	-1.0
4	7423	-52.7	12.4	107.7	63.7	-7.0
5	7632	79.6	9.6	77.5	74.4	-7.0
6	7835	48.6	27.3	25.8	61.9	0.0
7	7113	82.0	-3.8	93.5	83.4	-1.0
8	7423	80.5	13.2	88.2	94.5	0.0
9	7424	83.2	3.2	76.0	104.1	0.0
10	7631	84.3	0.1	100.0	103.5	-8.0
11	7449	91.9	-1.8	100.0	96.4	-1.0
12	7450	60.1	31.6	0.0	49.8	-1.0
13	7151	80.0	-6.8	100.0	94.1	3.0
14	7352	83.4	4.5	106.9	91.9	1.0
15	7253	73.6	1.6	83.3	92.1	1.0
16	6954	78.1	3.8	86.2	98.4	-2.0
17	7655	-35.2	9.6	73.4	99.6	3.0
18	7456	79.5	5.2	87.5	99.0	1.0

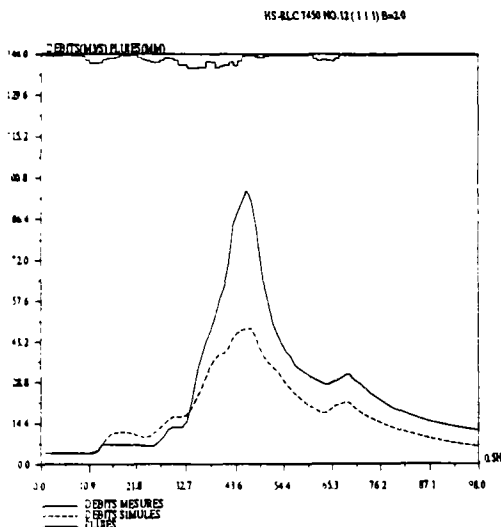
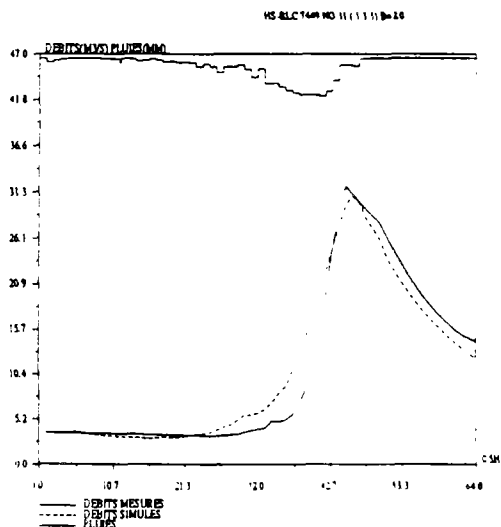
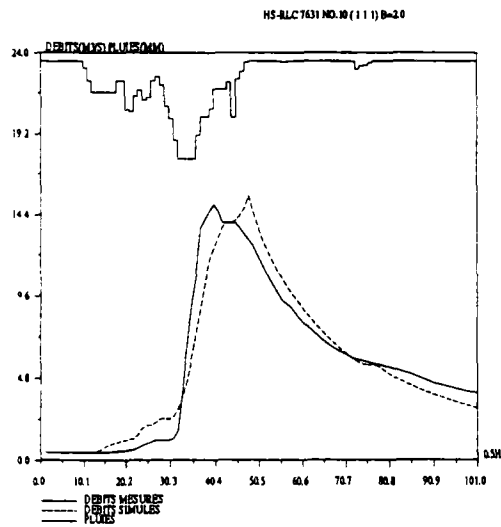
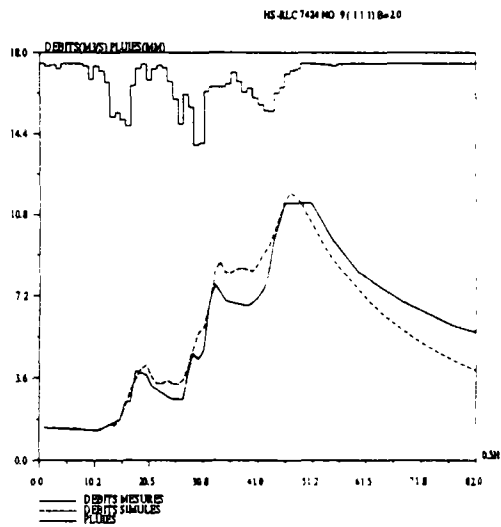
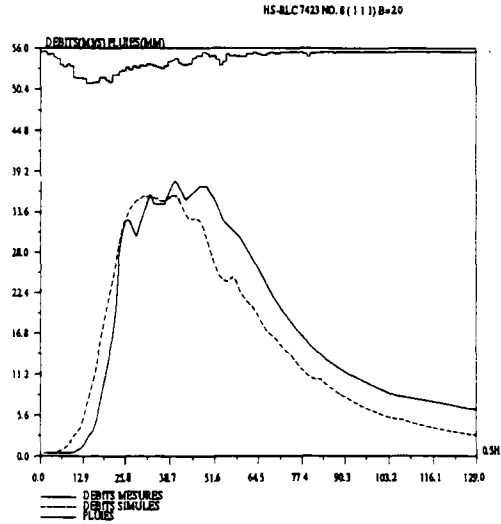
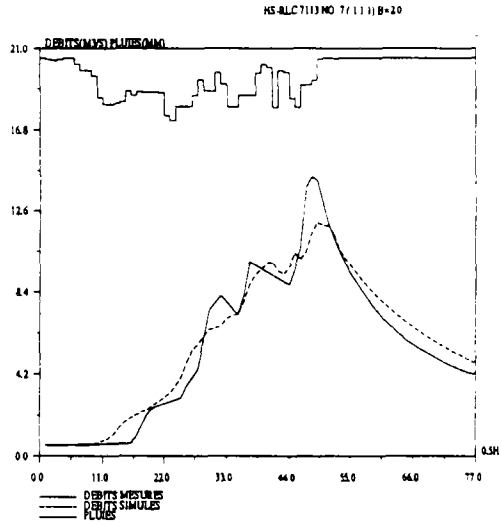
### 4. Figures de la validation des crues de l'échantillon-II (6 figures par page sauf la dernière)

Validation sur l'échantillon-II (N°1 - N°6)

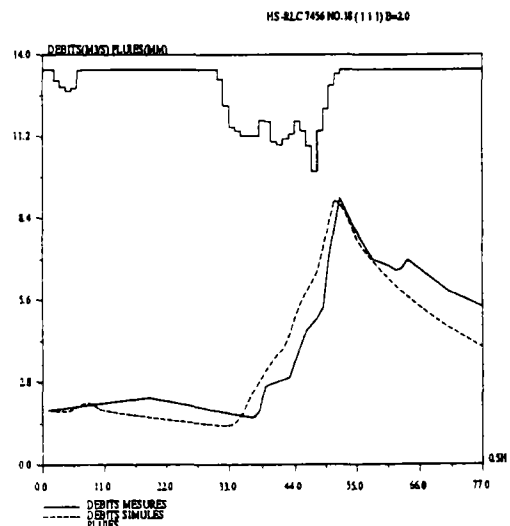
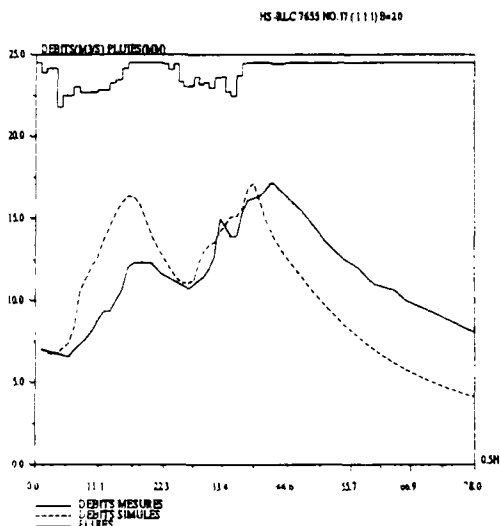
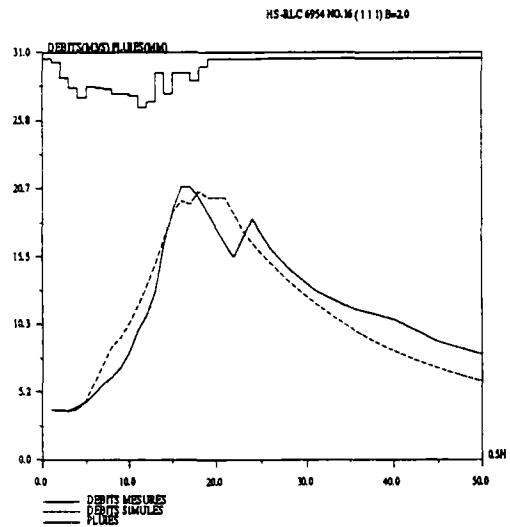
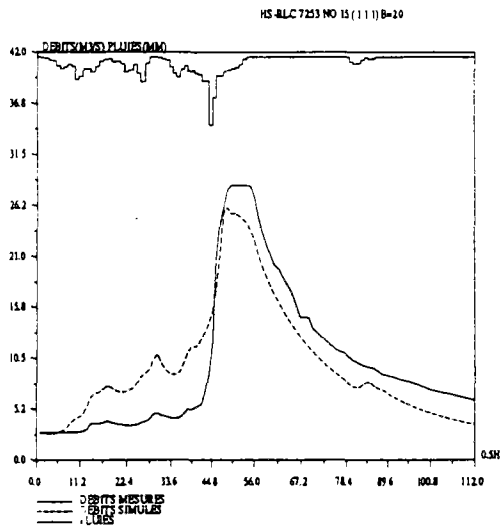
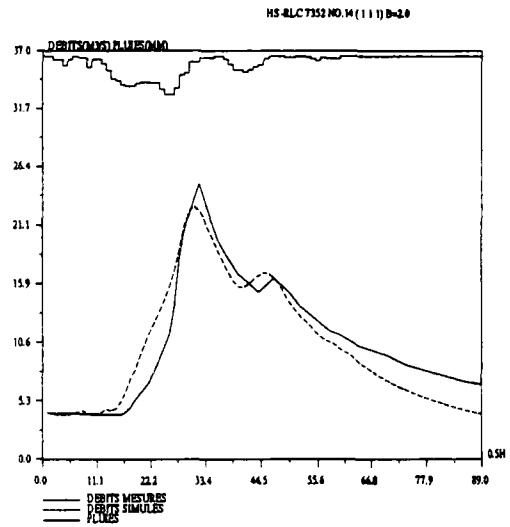
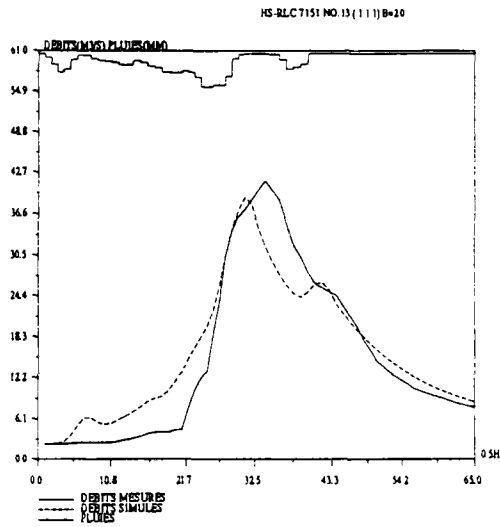




Validation sur l'échantillon-II (N°7 - N°12)



Validation sur l'échantillon-II (N°13 - N°18)



## ANNEXE-III-B-1 calage sur l'échantillon-II

### 1. Valeurs des paramètres calées sur 18 crues de l'échantillon-II

$$\ln A = 4.10; \ln B = 7.08; \ln(C-0.5) = 0.76$$

### 2. Moyennes et écarts-types sur 18 crues de l'échantillon-II

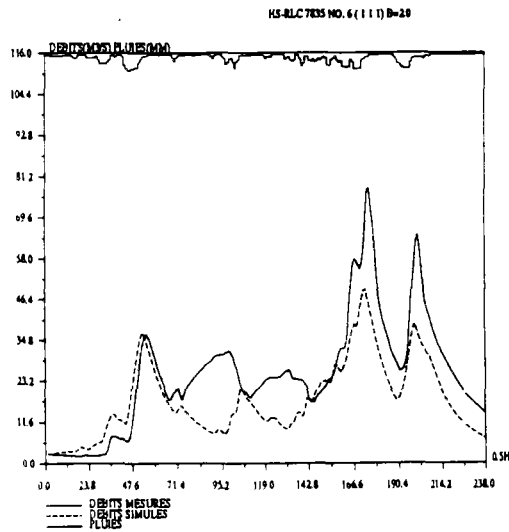
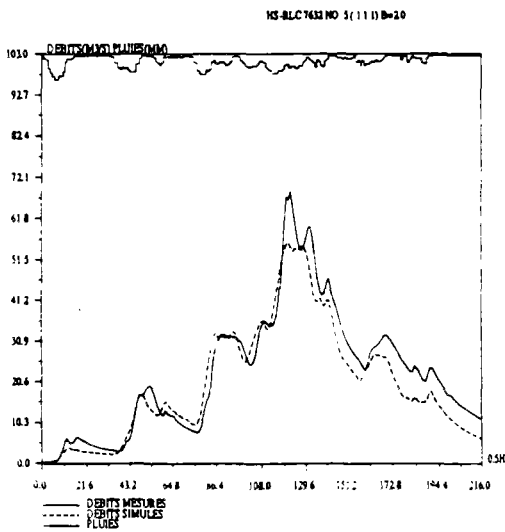
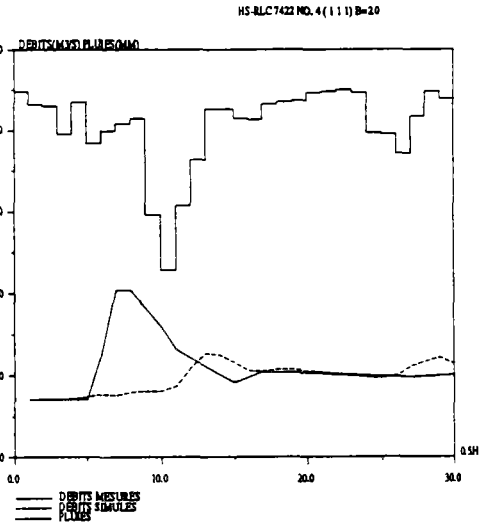
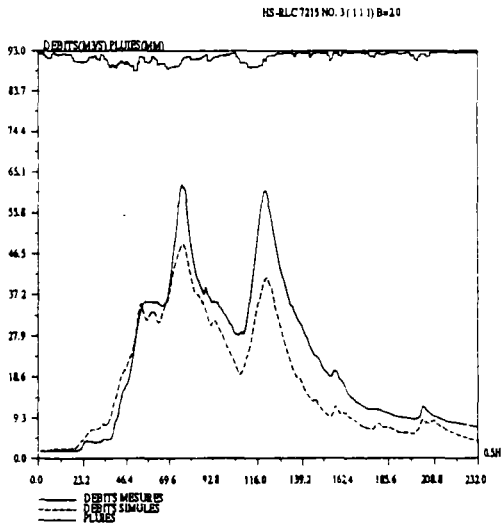
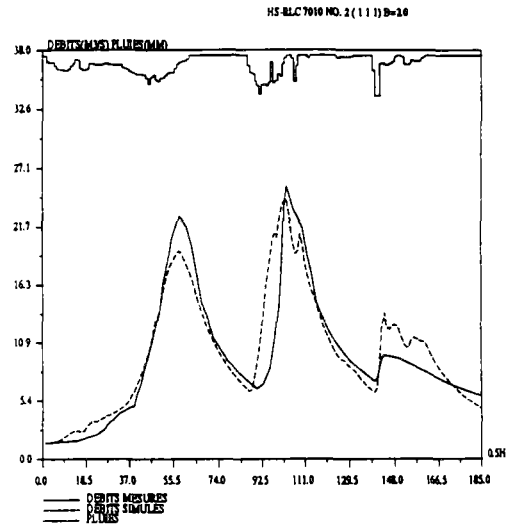
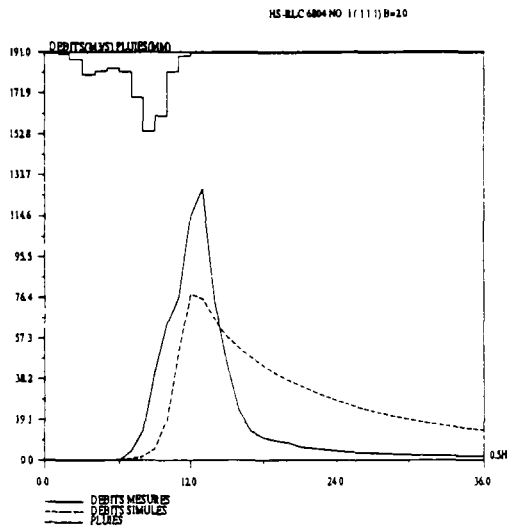
critere de Nash-Sutcliff (NS):	64.2 %
écart-type de NS:	46.75 %
erreur relative de bilan (EB):	6.3 %
écart-type de EB:	14.50 %
rapport des durees à mi-crue (RD):	81.7 %
écart-type de RD:	24.53 %
rapport des pointes de crues (EP):	87.5 %
écart-type de RD:	17.60 %
erreur de pointe de crue (ED):	0.1 pas de temps
écart-type de ED:	2.76 pas de temps

### 3. Valeurs des critères de chaque crue de l'échantillon-II

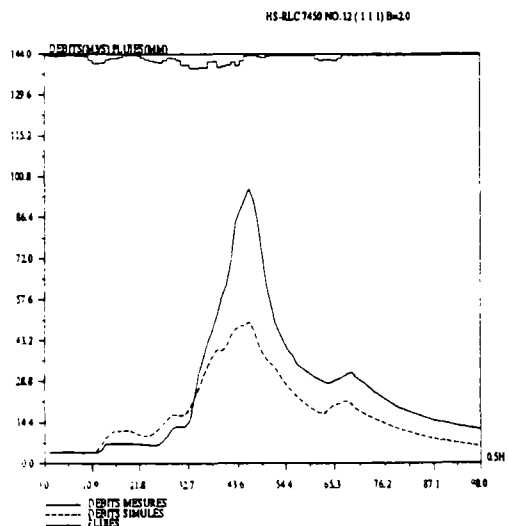
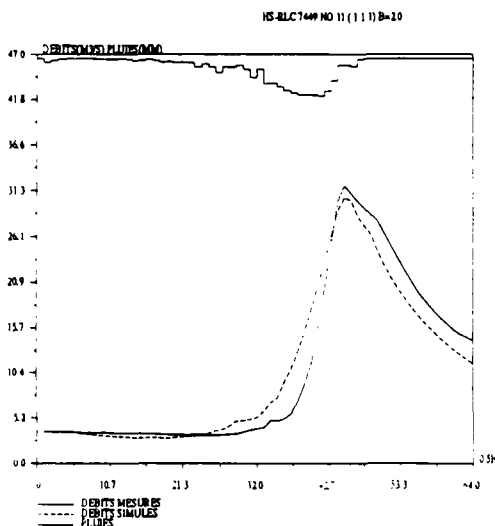
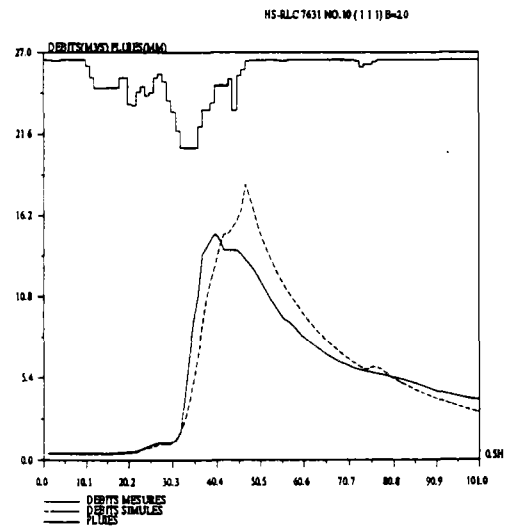
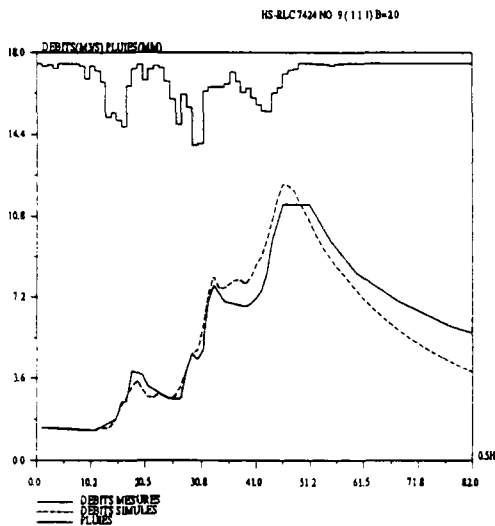
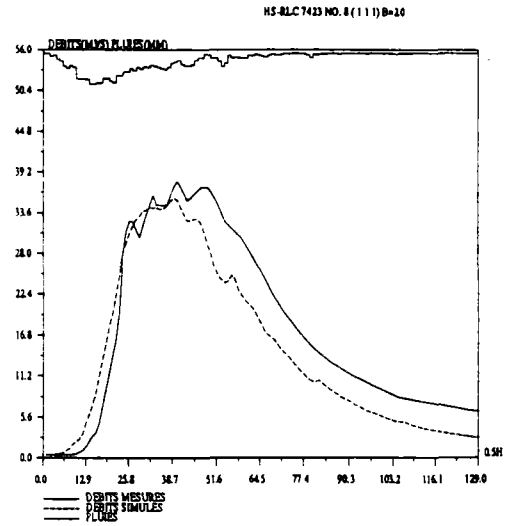
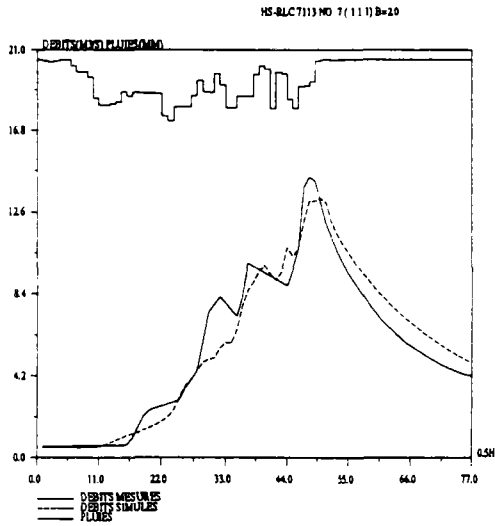
ordre	codage	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (pdt)
1	6804	47.5	-37.1	75.0	61.2	1.0
2	7010	83.0	-4.0	109.3	95.2	0.0
3	7215	80.8	21.0	67.1	78.1	-1.0
4	7422	-63.6	12.0	115.4	62.5	-6.0
5	7632	90.8	10.6	87.5	81.0	1.0
6	7835	48.5	28.4	32.3	63.4	1.0
7	7113	93.2	-2.0	93.5	92.5	-2.0
8	7423	85.7	16.3	86.3	93.8	1.0
9	7424	90.9	5.0	76.0	107.9	1.0
10	7631	87.3	-4.0	106.9	122.0	-7.0
11	7449	93.9	1.0	94.7	95.7	0.0
12	7450	61.7	31.0	14.3	51.4	0.0
13	7151	85.8	-2.6	95.0	91.8	4.0
14	7352	85.2	6.5	100.0	90.5	2.0
15	7253	81.7	6.6	79.2	90.7	2.0
16	6954	79.4	5.3	79.3	97.7	-1.0
17	7655	-61.7	12.6	71.9	98.5	4.0
18	7456	84.5	7.6	87.5	101.1	1.0

### 3. Figures du calage des crues de l'échantillon-II (6 figures par page sauf la dernière)

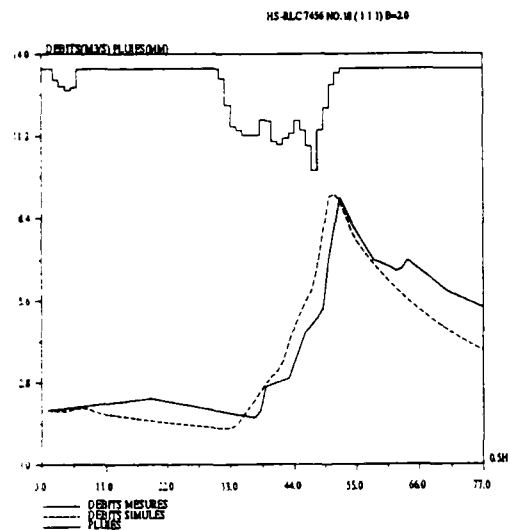
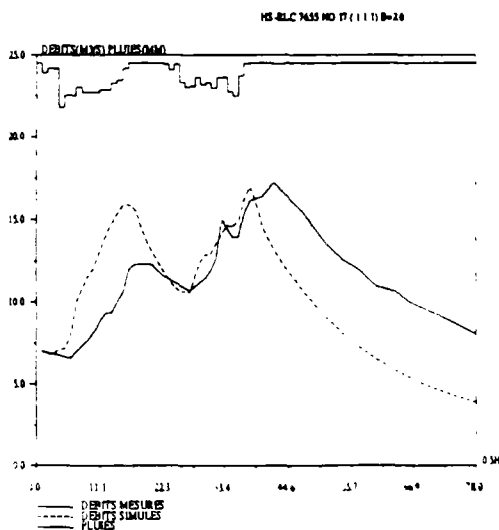
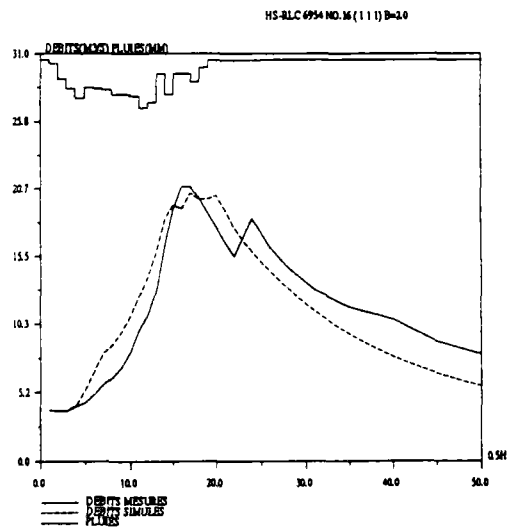
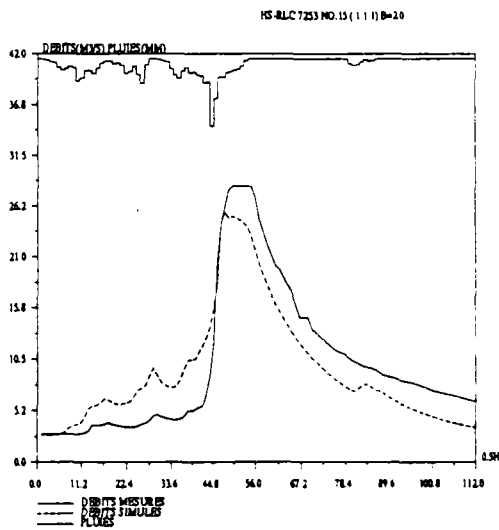
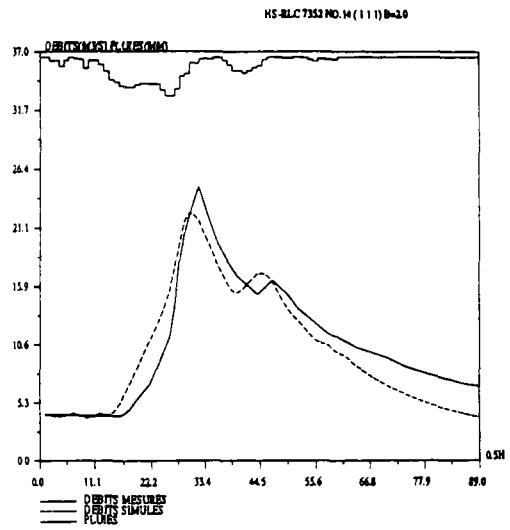
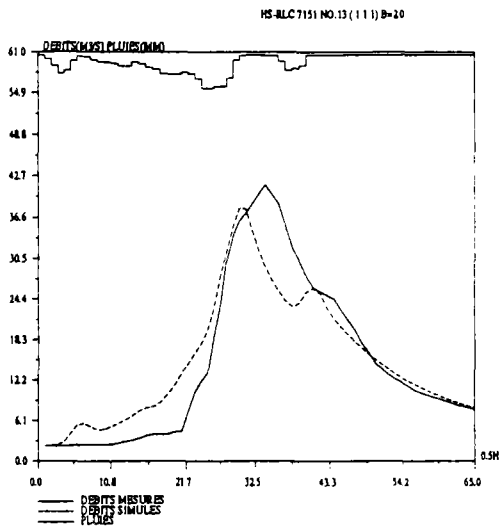
### Calage sur l'échantillon-II (N°1 - N°6)



### Calage sur l'échantillon-II (N°7 - N°12)



### Calage sur l'échantillon-II (N°13 - N°18)



## ANNEXE-III-B-2 validation sur l'échantillon-I

### 1. Valeurs des paramètres utilisées pour la validation sur l'échantillon-I

$$\ln A = 4.10; \ln B = 7.08; \ln(C-0.5) = 0.76$$

#### 1. Moyennes et écarts-types des critères sur 26 crues de l'échantillon-I

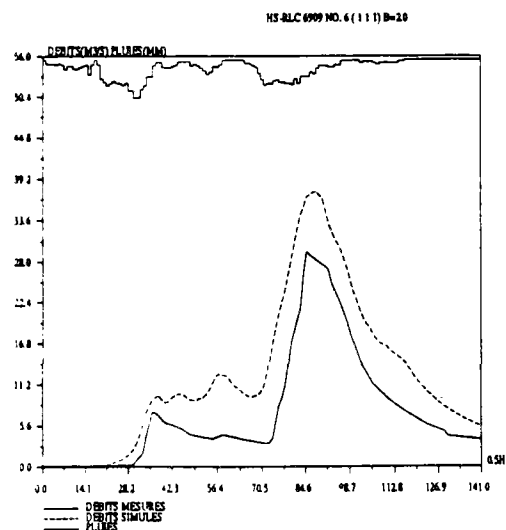
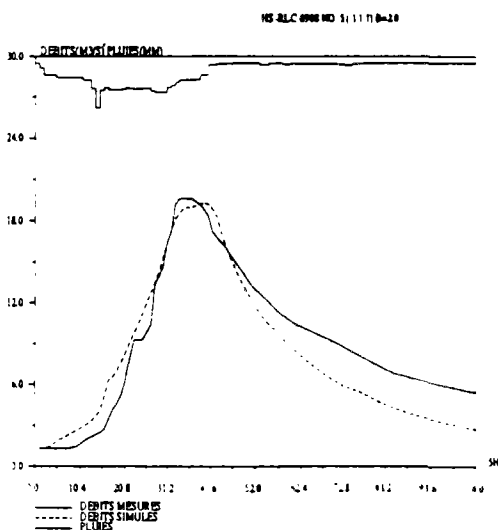
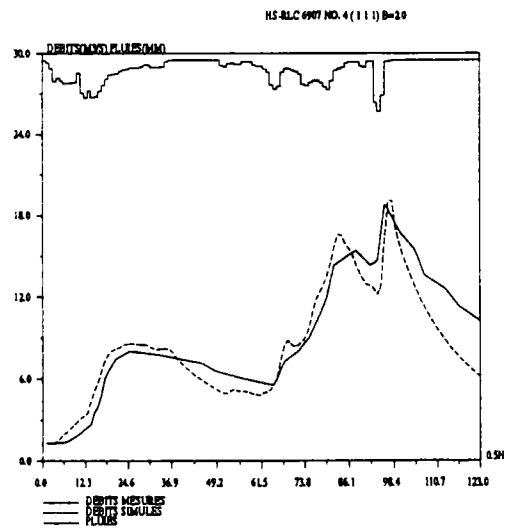
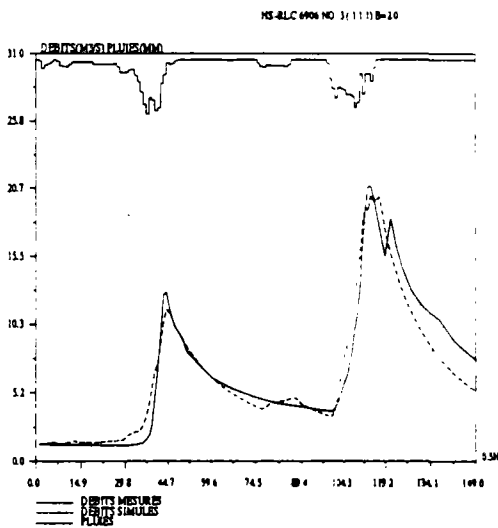
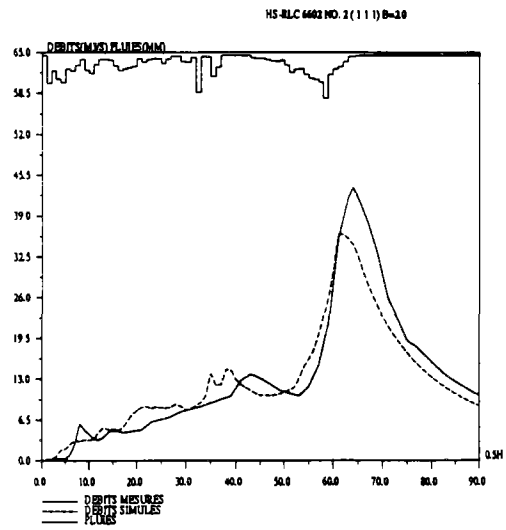
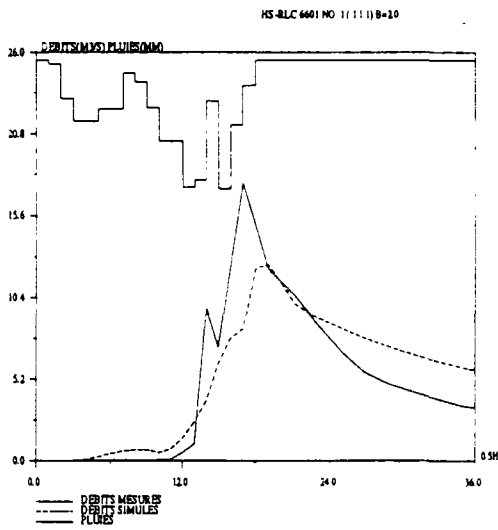
critere de Nash-Sutcliff (NS):	-47.3 %
écart-type de NS:	528.63 %
erreur relative de bilan (EB):	-37.1 %
écart-type de EB:	104.34 %
rapport des durees à mi-crue (RD):	143.5 %
écart-type de RD:	100.01 %
rapport des pointes de crues (EP):	108.9 %
écart-type de EP:	53.64 %
erreur de pointe de crue (ED):	-1.8 pas de temps
écart-type de ED:	10.58 pas de temps

#### 2. Valeurs des critères de chaque crue de l'échantillon-I pour la validation

ordre	codage	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (pdt)
1	6601	72.6	-5.8	75.0	70.6	-2.0
2	6602	89.0	4.2	86.7	82.9	3.0
3	6906	93.0	3.1	81.8	96.9	-1.0
4	6907	84.0	6.0	77.1	101.4	-1.0
5	6908	85.0	10.2	82.5	98.4	-6.0
6	6909	38.2	-68.0	186.4	127.7	-3.0
7	7011	-53.0	-89.1	253.3	158.9	0.0
8	7112	81.5	-0.9	91.3	81.6	-52.0
9	7216	86.6	9.3	81.5	97.4	0.0
10	7318	89.6	-7.9	111.1	69.6	1.0
11	7319	87.6	6.1	116.7	79.2	2.0
12	7320	65.4	-21.3	116.7	87.9	0.0
13	7422	87.3	9.3	91.7	89.8	2.0
14	7426	48.6	-44.3	33.3	65.2	0.0
15	7527	64.7	-31.7	250.0	118.6	-1.0
16	7630	92.3	-3.4	110.0	81.6	-1.0
17	7734	86.7	-3.3	112.5	108.9	2.0
18	7836	80.4	7.5	88.6	105.6	10.0
19	7837	90.3	4.1	87.5	100.2	0.0
20	7938	97.0	1.5	93.4	95.3	1.0
21	8040	57.6	12.3	84.6	100.2	4.0
22	8041	-2667.1	-519.9	400.0	347.0	3.0
23	8142	91.2	-8.7	126.7	87.4	2.0
24	8343	-1.9	-48.4	321.1	94.7	-9.0
25	8344	-252.4	-170.8	425.0	179.3	0.0
26	8345	76.8	-16.0	147.1	104.7	0.0

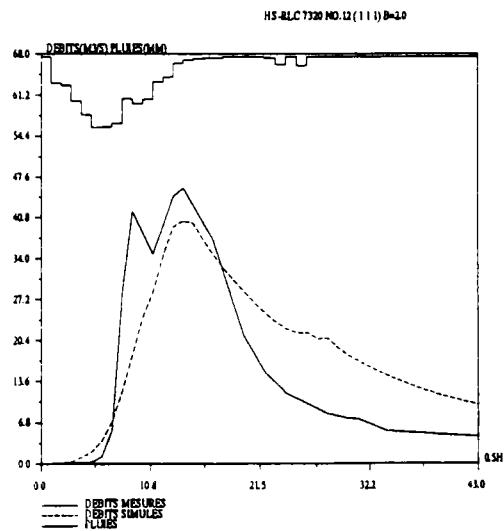
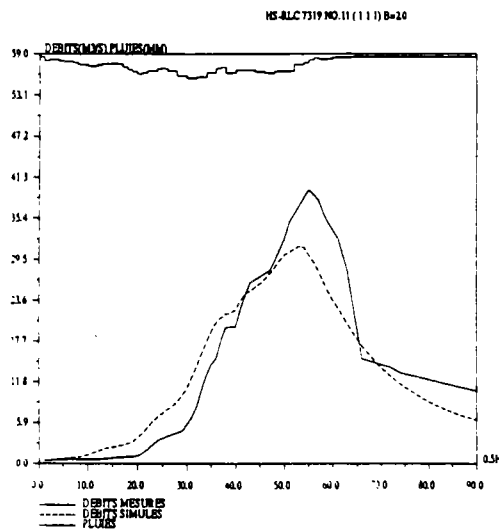
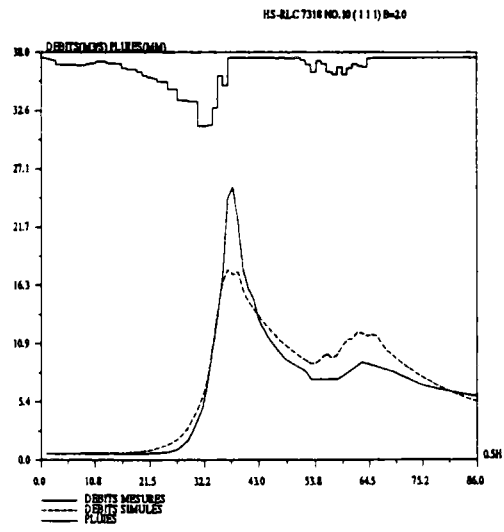
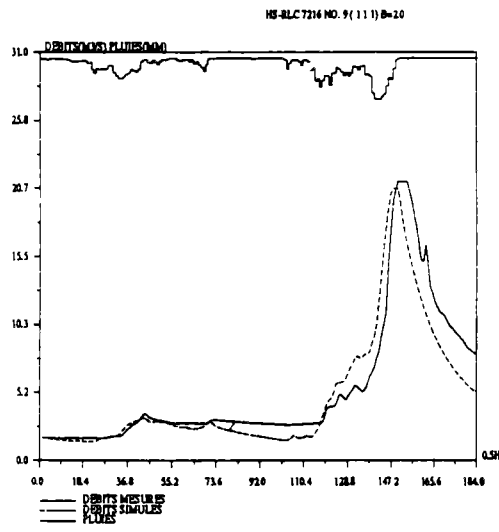
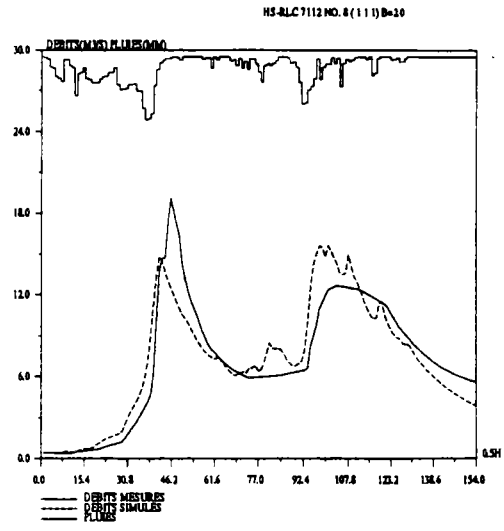
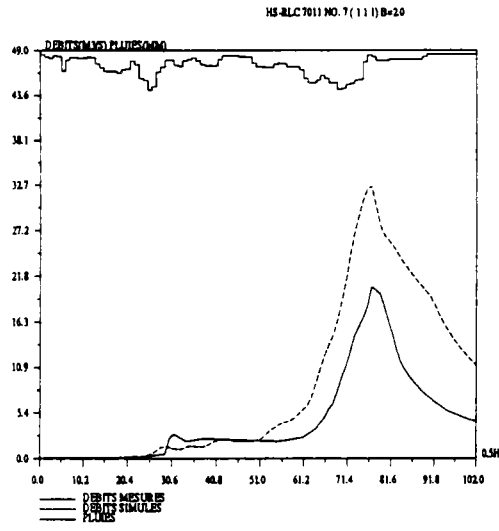
#### 3. Figures de la validation des crues de l'échantillon-I (6 figures par page sauf la dernière)

Validation sur l'échantillon-I (N°1 - N°6)

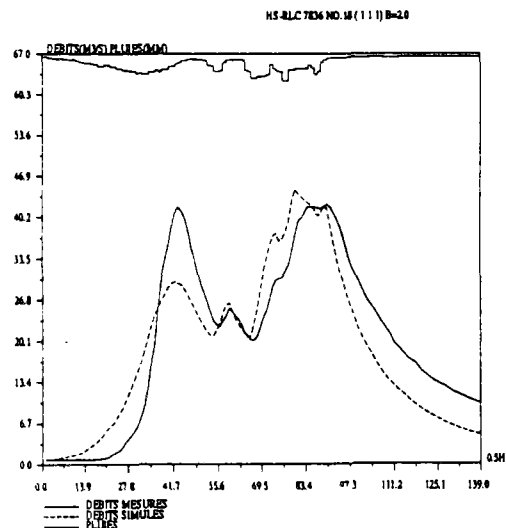
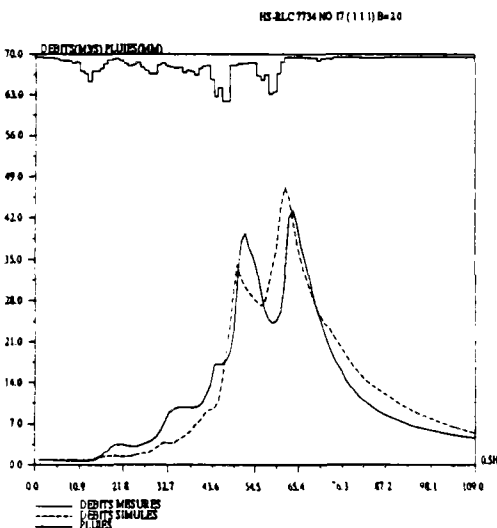
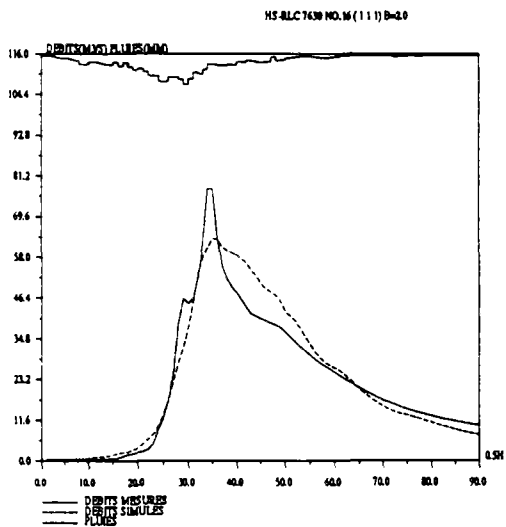
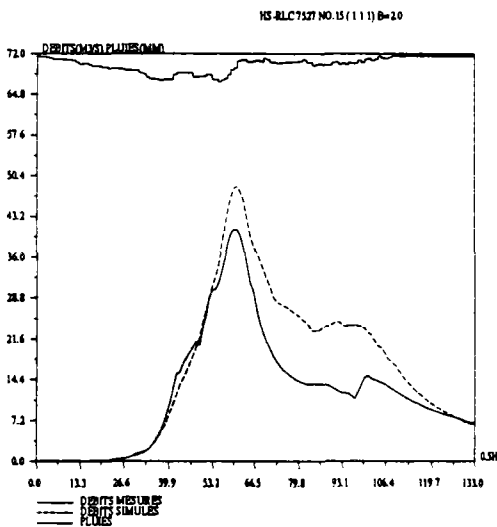
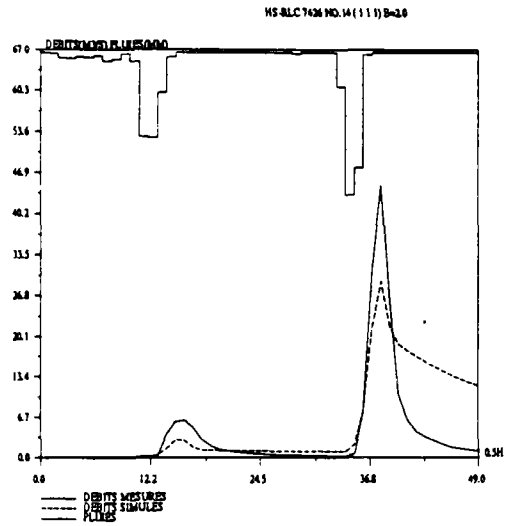
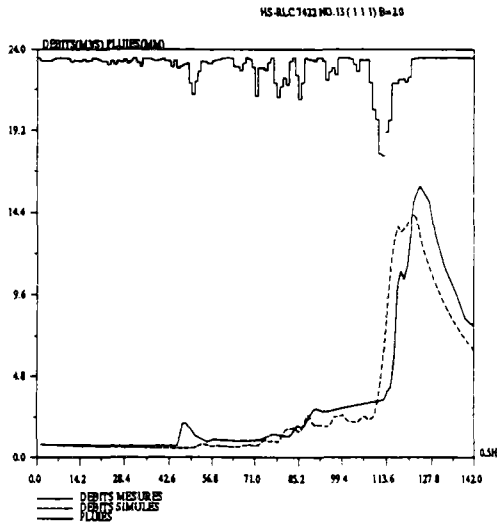




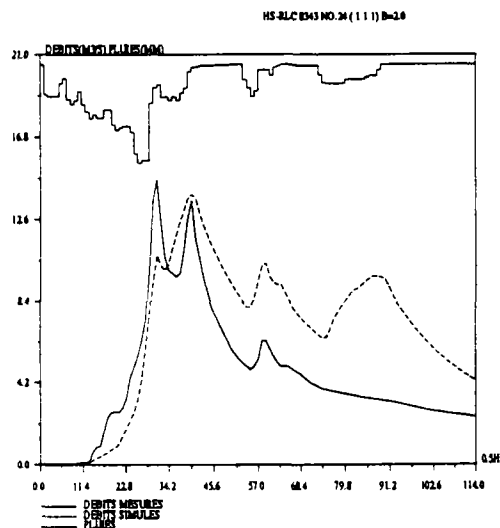
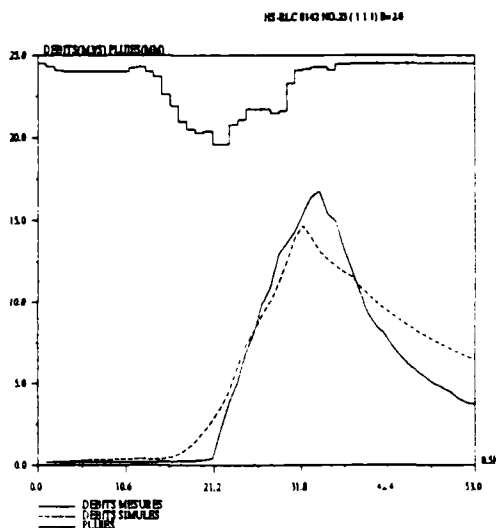
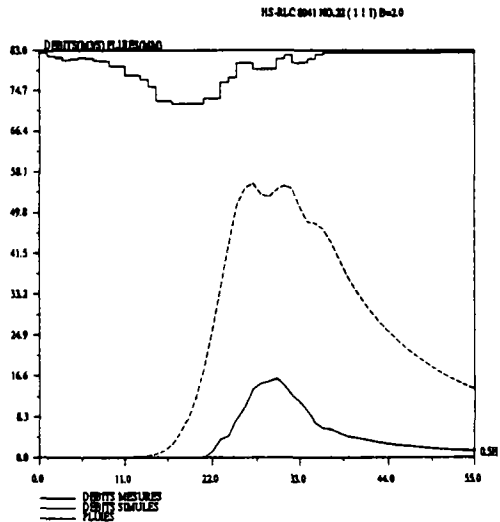
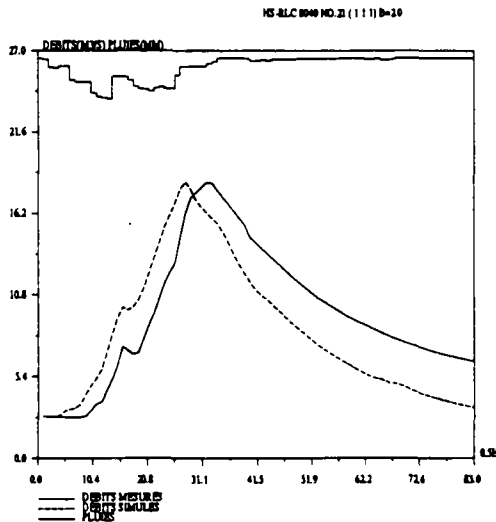
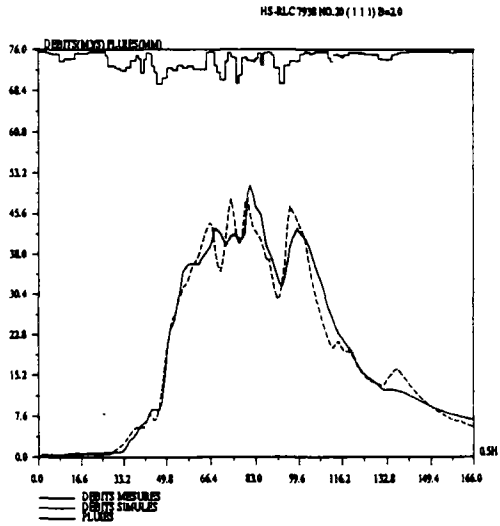
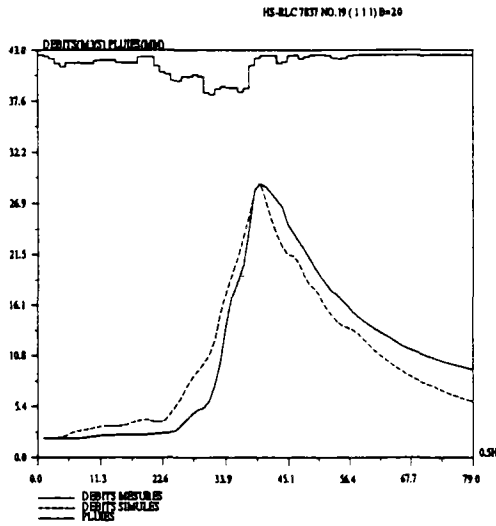
Validation sur l'échantillon-I (N°7 - N°12)



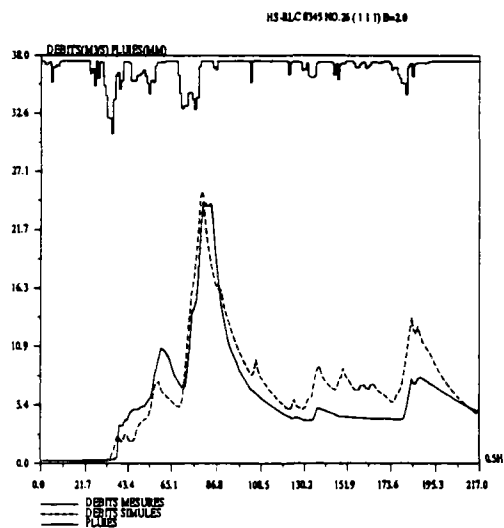
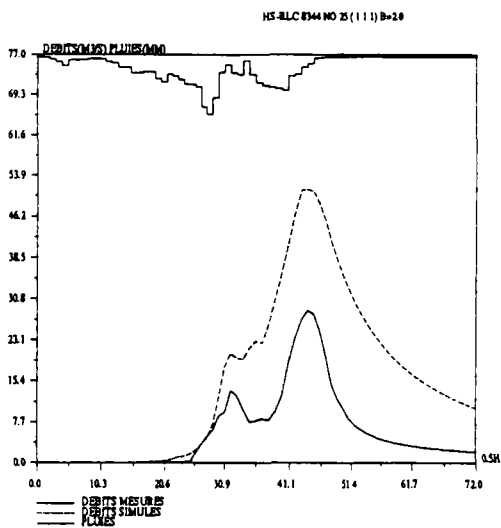
### Validation sur l'échantillon-I (N°13 - N°18)



Validation sur l'échantillon-I (N°19 - N°24)



### Validation sur l'échantillon-I (N°25 - N°26)







## **ANNEXE-IV**

### **Calage par épisode**

**IV-A calage par épisode sur l'échantillon-I**

**IV-B calage par épisode sur l'échantillon-II**

**ANNEXE-IV-A: calage par épisode sur l'échantillon-I****1. Valeurs moyennes et écarts-types des paramètres**

valeur moyenne de lnA	=	4.81	écart-type de lnA	=	2.75
valeur moyenne de lnB	=	4.45	écart-type de lnB	=	0.98
valeur moyenne de ln(C-0.5)	=	1.30	écart-type de ln(C-0.5)	=	0.93

**2. Moyennes et écarts-types des critères**

critere de Nash-Sutcliff (NS):	96.5 %
écart-type de NS:	2.84 %
erreur relative de bilan (EB):	0.0 %
écart-type de EB:	2.72 %
rapport des durees à mi-cruue (RD):	96.4 %
écart-type de RD:	10.47 %
rapport des pointes de cruues (EP):	97.6 %
écart-type de EP:	7.06 %
erreur de pointe de cruue (ED):	-0.8 pas de temps
écart-type de ED:	2.28 pas de temps

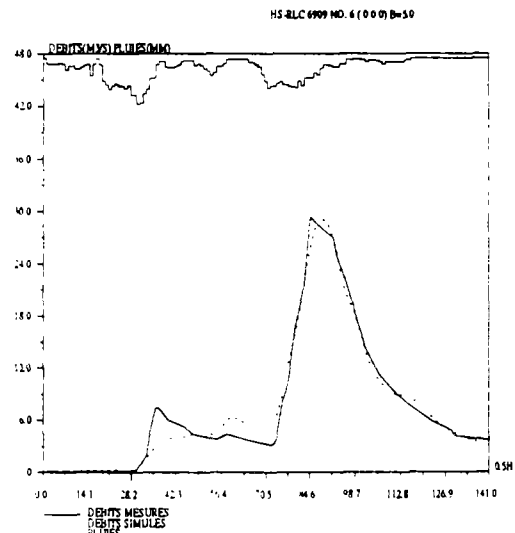
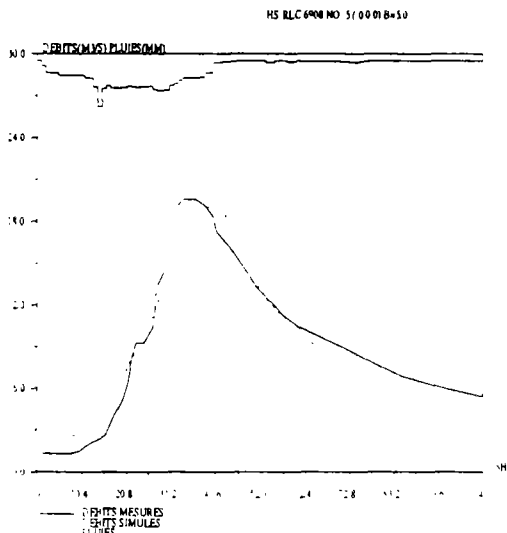
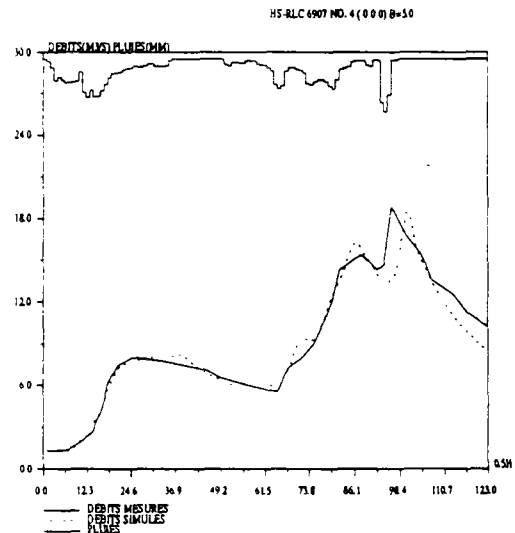
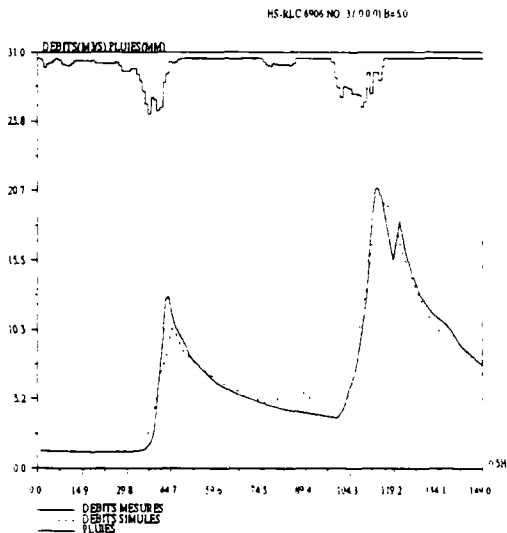
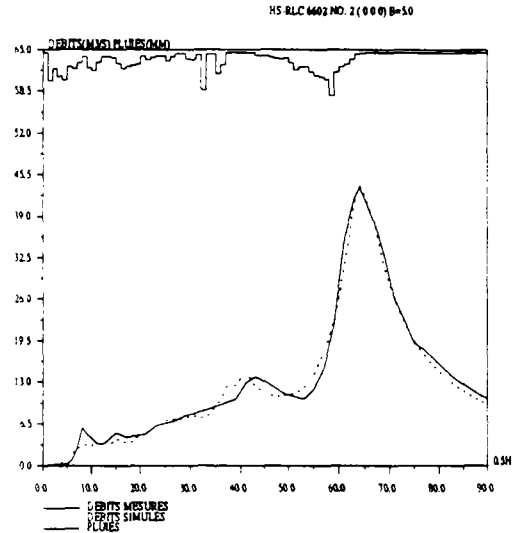
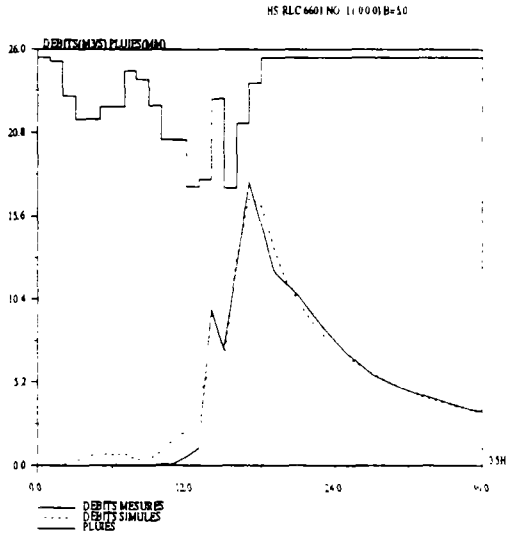
**3. Valeurs de paramètres et de critères de chaque épisode de cruue**

ordre	codage	lnA	lnB	lnC	NS(%)	EB(%)	RD(%)	EP(%)	ED(pdt)
1	6601	4.82	3.64	-2.57	95.9	-3.6	87.5	94.1	0.0
2	6602	3.22	5.08	1.54	98.4	1.7	100.0	100.9	0.0
3	6906	2.26	5.36	1.30	95.9	-1.3	78.8	95.3	-3.0
4	6907	1.81	5.45	1.72	94.7	2.1	91.7	97.7	-4.0
5	6908	1.02	5.39	1.19	95.5	2.4	92.5	97.9	-7.0
6	6909	5.12	4.22	1.62	97.6	-0.7	100.0	99.6	-3.0
7	7011	5.75	3.41	1.74	99.1	-0.1	100.0	99.0	-1.0
8	7112	4.83	4.84	1.87	93.8	-1.4	91.3	87.4	0.0
9	7216	3.45	5.26	1.93	98.1	1.9	96.3	101.9	-2.0
10	7318	4.51	4.28	0.86	96.6	-0.1	111.1	87.3	0.0
11	7319	1.84	4.93	1.98	97.3	2.9	116.7	90.5	-1.0
12	7320	11.16	4.27	0.30	90.7	-2.9	83.3	108.9	1.0
13	7422	4.36	4.94	1.98	98.9	0.1	95.8	95.1	-1.0
14	7426	5.75	1.74	0.80	98.6	-5.4	66.7	106.1	0.0
15	7527	6.20	4.56	1.34	97.5	-0.8	113.6	97.6	-1.0
16	7630	10.84	5.24	0.35	95.5	1.3	95.0	83.9	-1.0
17	7734	6.16	4.74	1.62	98.5	-0.6	91.7	95.7	-1.0
18	7836	-0.96	4.79	2.15	85.9	7.8	91.4	117.5	4.0
19	7837	1.97	5.28	1.45	98.2	1.2	100.0	103.3	-2.0
20	7938	6.64	5.42	1.49	98.1	-1.9	95.1	93.0	5.0
21	8040	1.82	5.32	2.10	96.8	4.7	94.9	98.9	-1.0
22	8041	7.00	1.96	2.10	98.6	-3.0	100.0	98.4	1.0
23	8142	6.38	3.80	1.54	99.3	-1.6	100.0	100.0	0.0
24	8343	7.71	4.08	0.70	95.9	-0.9	100.0	87.4	0.0
25	8344	5.87	3.19	1.09	95.9	1.3	112.5	96.6	0.0
26	8345	5.59	4.53	1.72	97.0	-2.7	100.0	102.5	-3.0

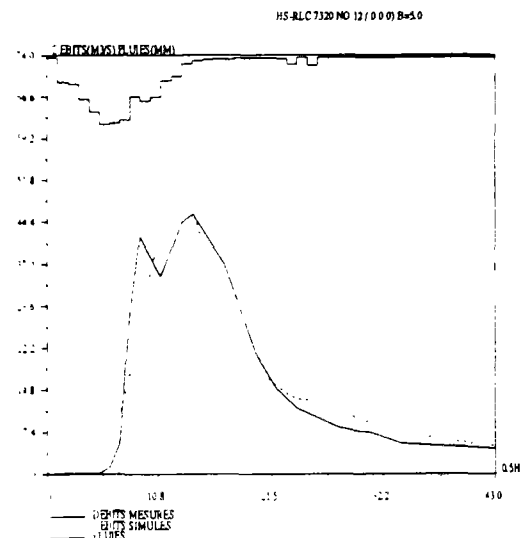
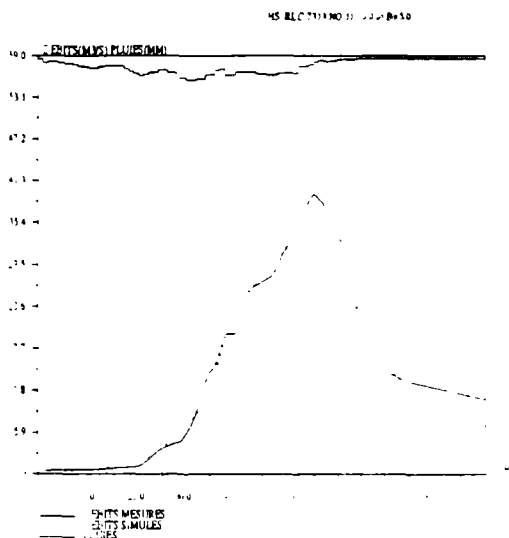
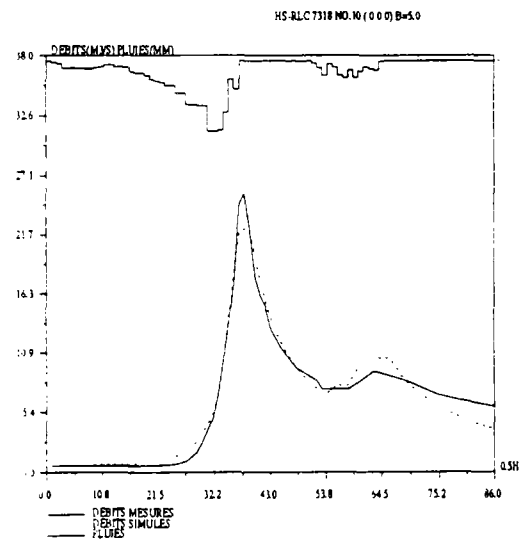
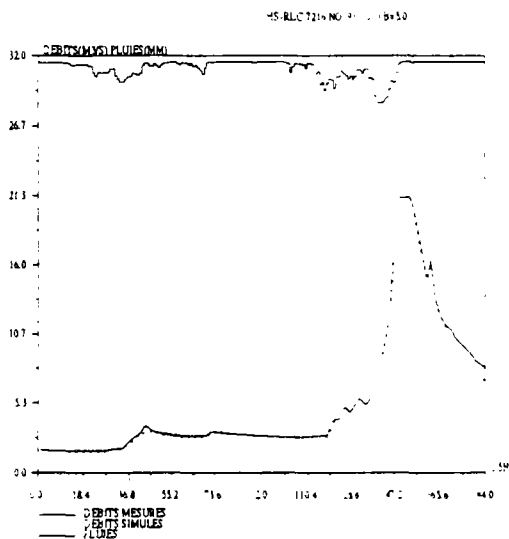
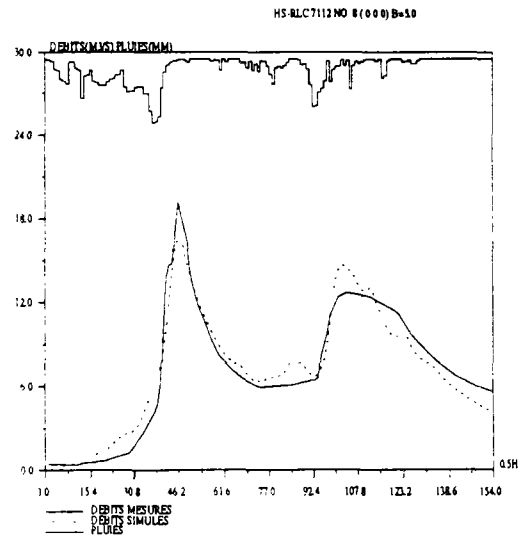
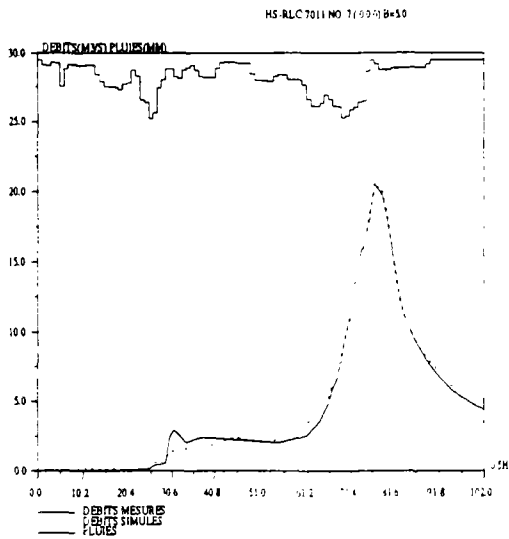
**4. Figures de la simulation par épisode (6 cruues par page sauf la dernière)**



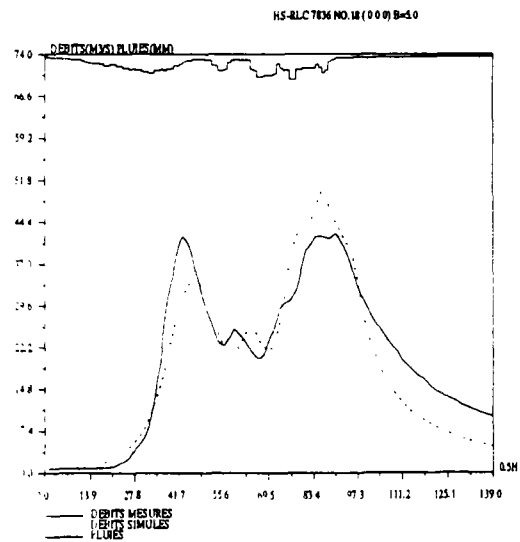
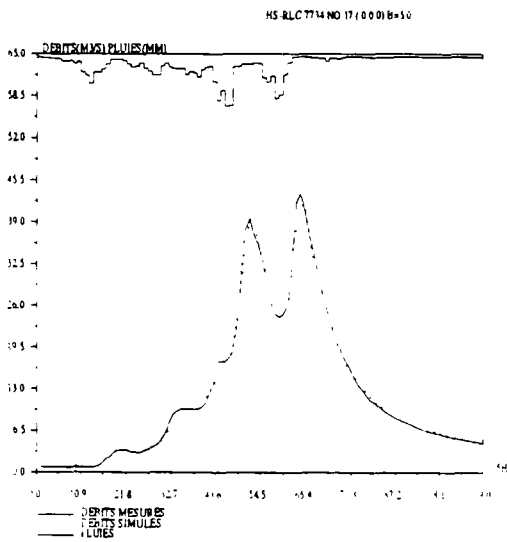
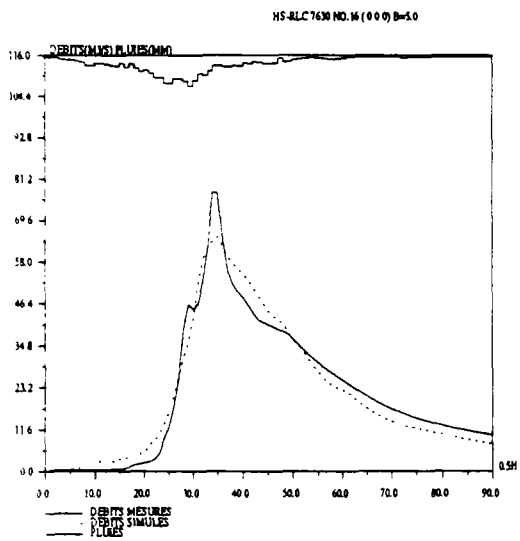
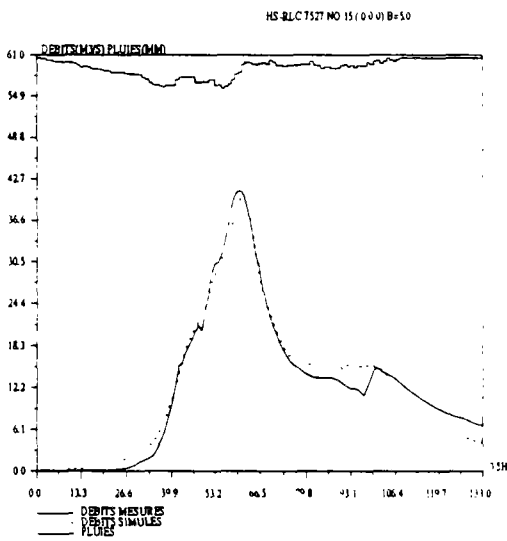
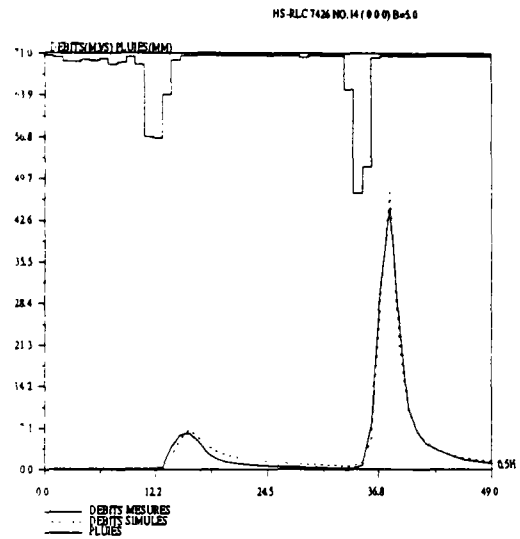
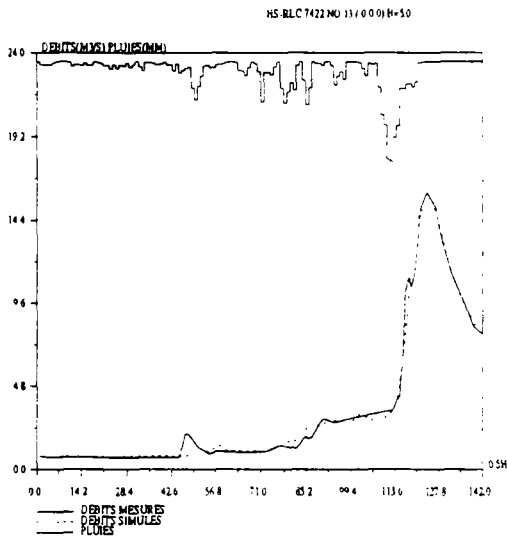
calage par épisode sur l'échantillon-I (N°1 - N°6)



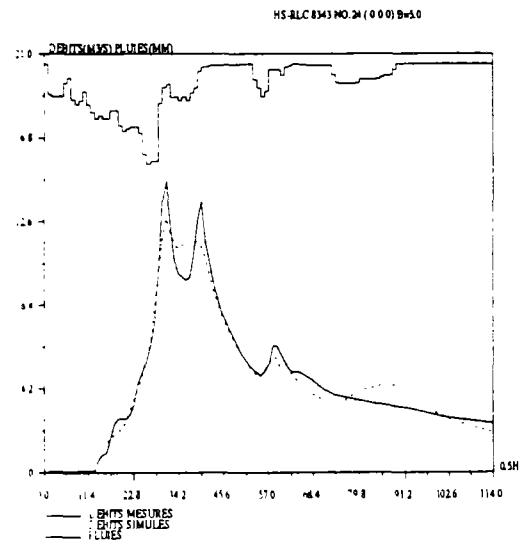
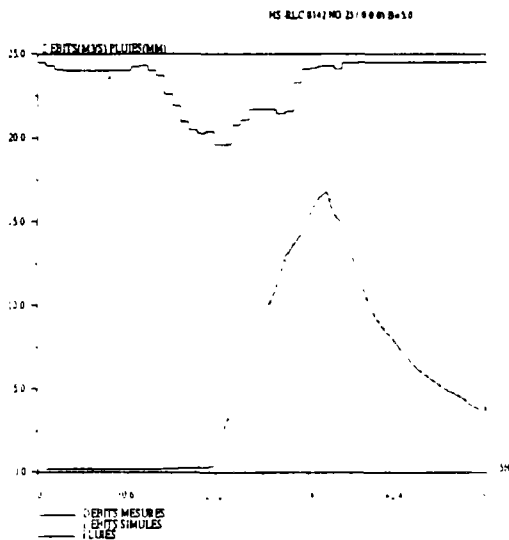
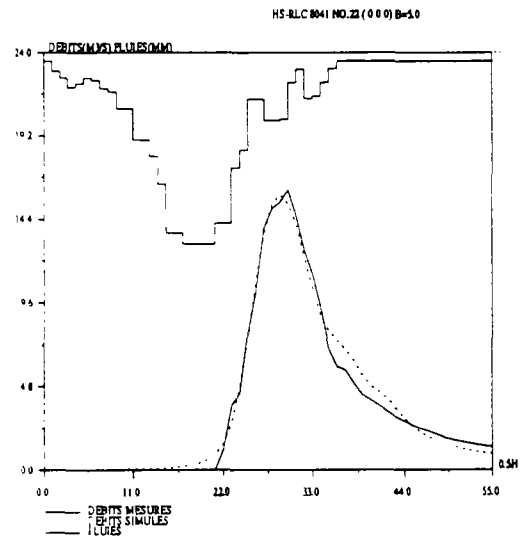
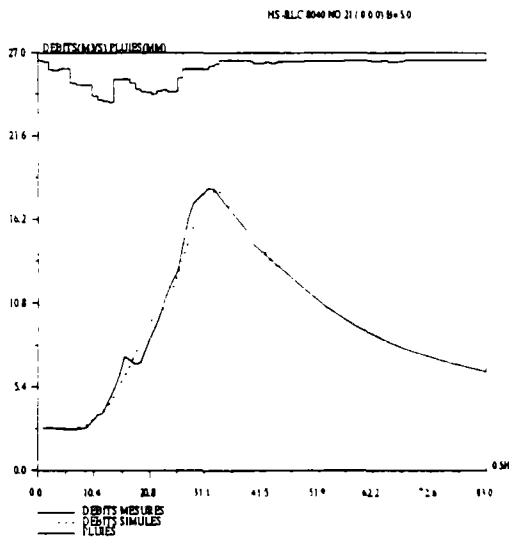
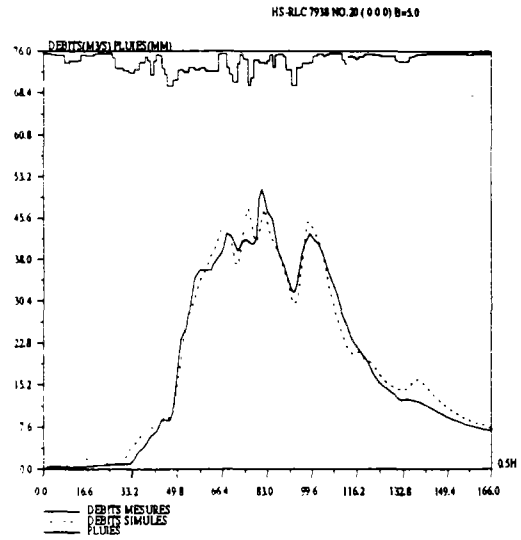
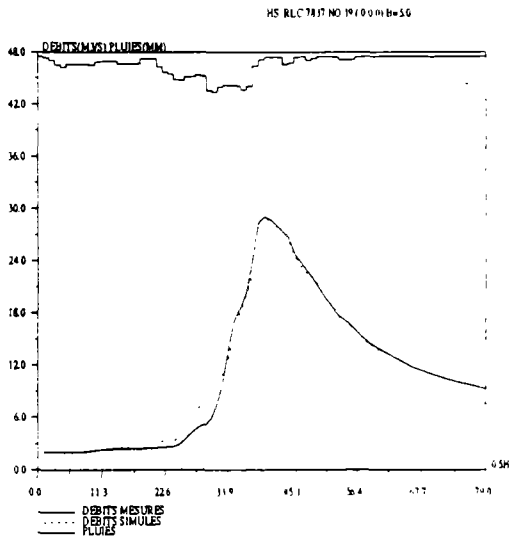
calage par épisode sur l'échantillon-I (N°7 - N°12)



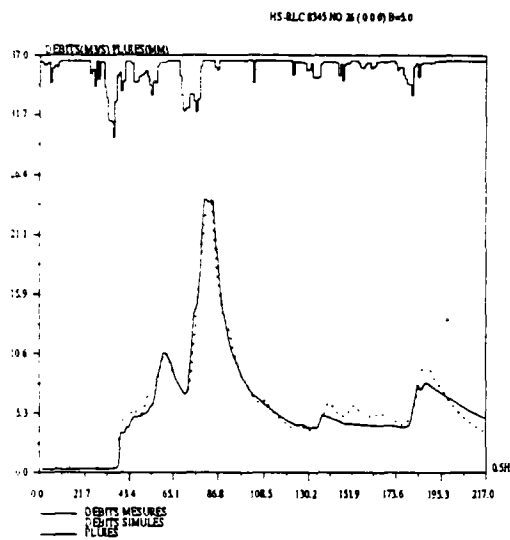
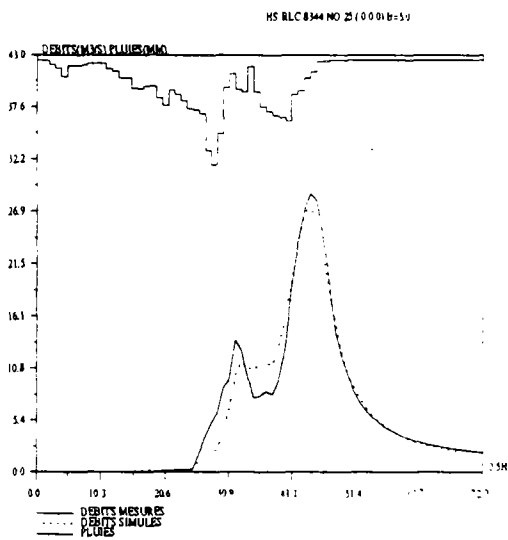
calage par épisode sur l'échantillon-I (N°13 - N°18)



calage par épisode sur l'échantillon-I (N°19 - N°24)



calage par épisode sur l'échantillon-I (N°25 - N°26)



## ANNEXE-IV-B: calage par épisode sur l'échantillon-II

### 1. Valeurs moyennes et écarts-types des paramètres

valeur moyenne de lnA	=	3.13	écart-type de lnA	=	3.21
valeur moyenne de lnB	=	5.06	écart-type de lnB	=	0.57
valeur moyenne de ln(C-0.5)	=	1.05	écart-type de ln(C-0.5)	=	1.37

### 2. Moyennes et écarts-types des critères

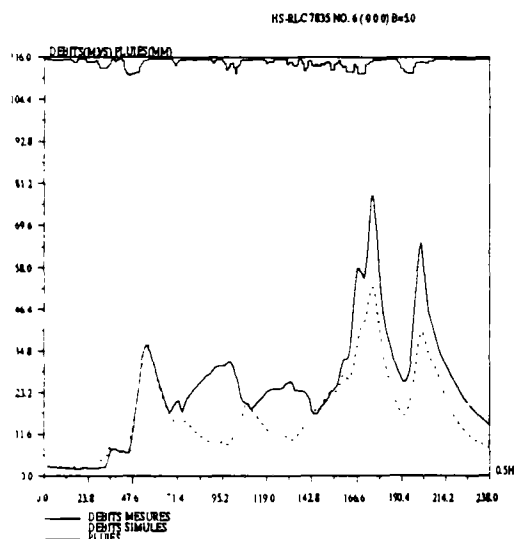
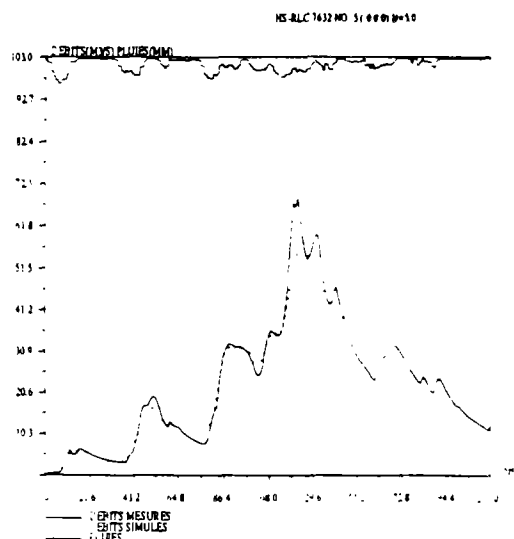
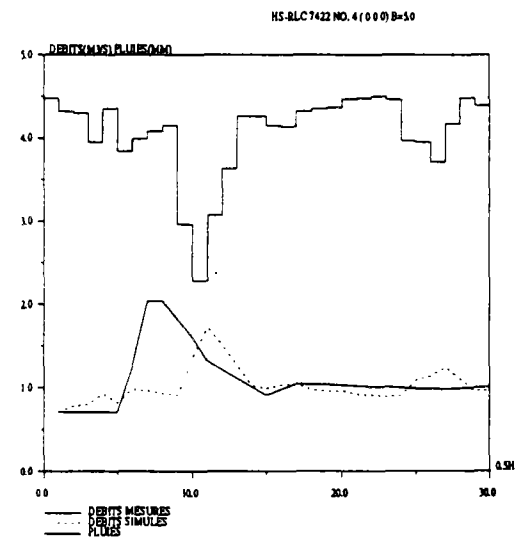
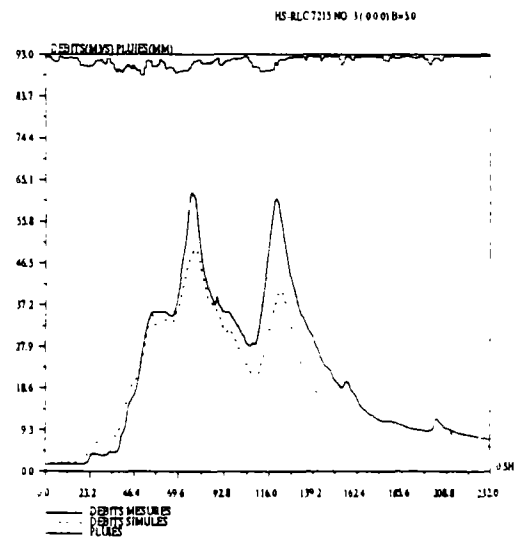
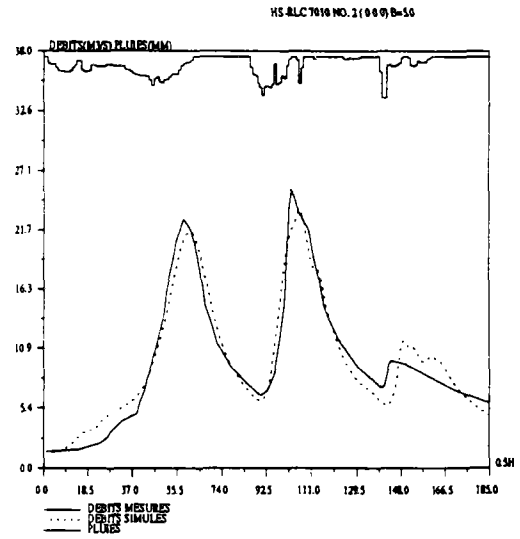
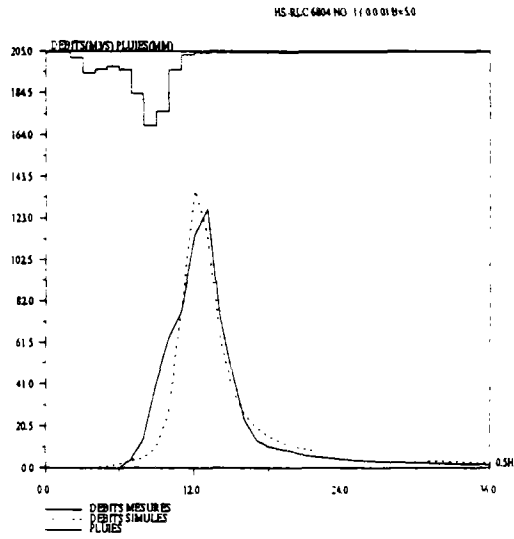
critere de Nash-Sutcliff (NS)	83.0 %
écart-type de NS:	26.95 %
erreur relative de bilan (EB):	7.4 %
écart-type de EB:	52 %
rapport des durees à mi-crue (RD):	88.2 %
écart-type de RD:	14.56 %
rapport des pointes de crues (EP):	92.6 %
écart-type de EP:	12.23 %
erreur de pointe de crue (ED):	-1.2 pas de temps
écart-type de ED:	1.78 pas de temps

### 3. Valeurs de paramètres et de critères de chaque crue dans l'échantillon-II

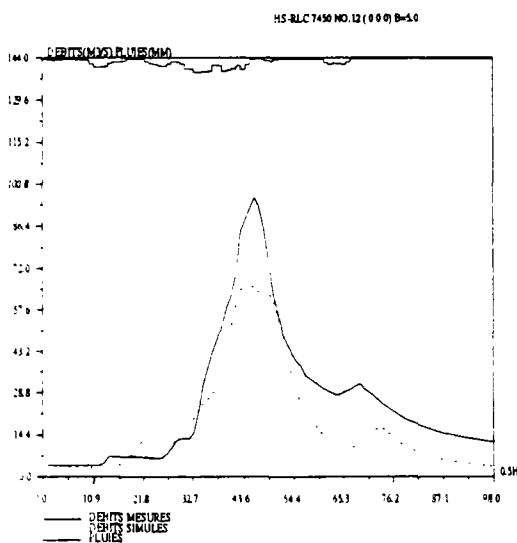
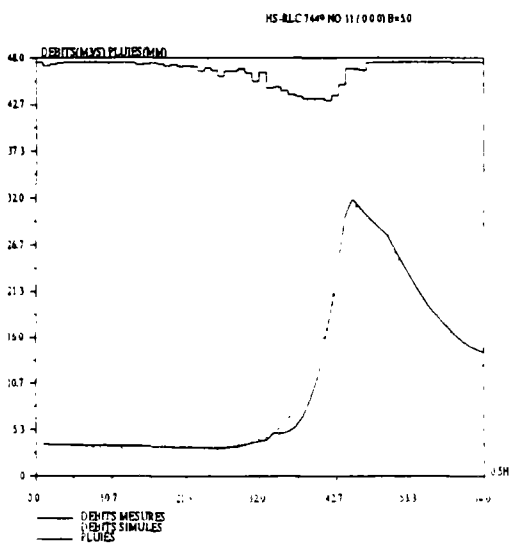
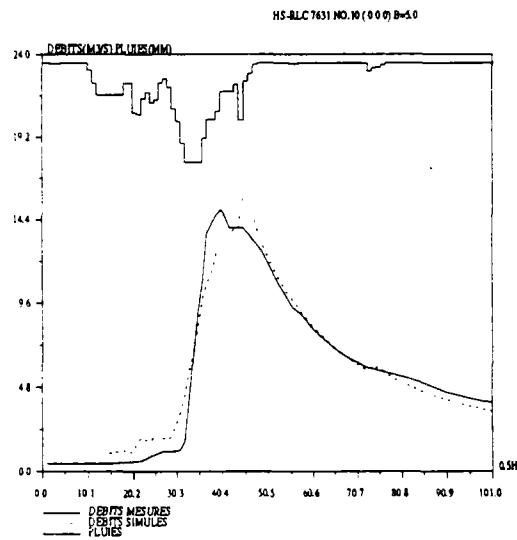
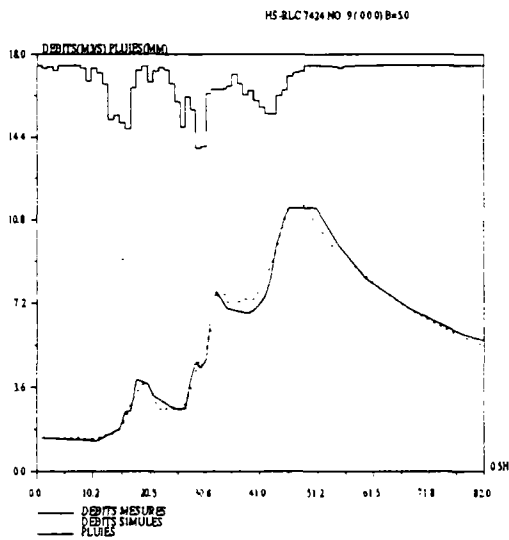
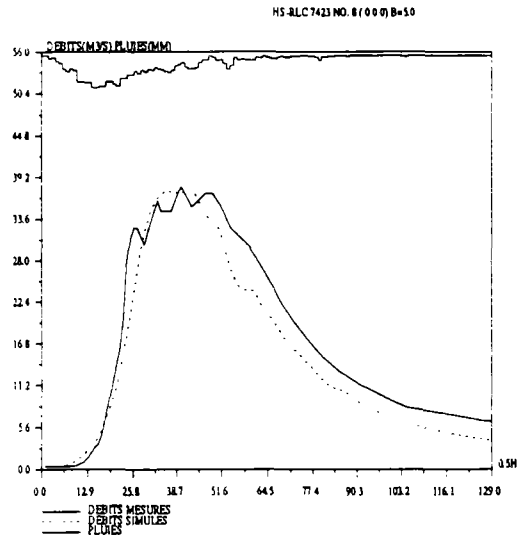
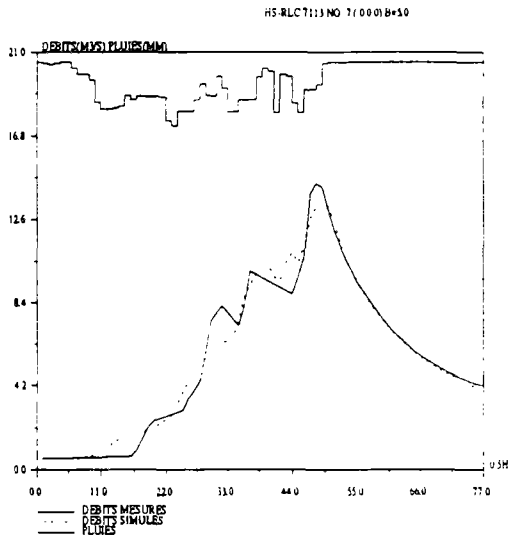
ordre	codage	lnA	lnB	lnC	NS(%)	EB(%)	RD(%)	EP(%)	ED(pdt)
1	6804	11.84	3.35	1.02	90.7	5.3	100.0	107.4	1.0
2	7010	5.00	4.76	1.99	94.2	-1.5	102.3	92.4	-3.0
3	7215	1.06	5.48	1.38	84.3	17.5	71.1	79.6	-2.0
4	7423	9.46	5.90	-2.88	-14.1	6.9	84.6	84.1	-4.0
5	7632	3.76	5.52	1.63	94.9	7.4	95.0	80.7	-1.0
6	7835	1.21	5.13	1.55	54.4	29.7	41.9	67.4	-1.0
7	7113	4.86	4.51	0.39	96.9	-0.6	83.9	92.0	0.0
8	7423	-0.75	5.16	1.90	92.6	13.1	84.3	98.8	-2.0
9	7424	3.11	5.47	1.20	99.0	0.3	96.0	103.3	0.0
10	7631	4.86	5.02	-2.37	96.2	-1.5	100.0	107.5	-5.0
11	7449	2.35	5.17	1.30	98.5	1.5	94.7	102.3	-2.0
12	7450	1.62	4.11	2.12	75.9	30.1	85.7	69.3	2.0
13	7151	1.79	4.93	1.68	96.6	-1.9	95.0	110.5	1.0
14	7352	2.24	5.28	1.40	96.8	1.3	106.9	91.5	0.0
15	7253	2.36	5.12	1.45	92.9	5.9	87.5	99.0	0.0
16	6954	-0.30	5.26	1.30	91.6	3.8	82.8	95.3	-3.0
17	7655	-1.16	5.42	2.23	55.8	12.1	76.6	86.2	-2.0
18	7456	3.10	5.45	1.69	97.2	3.4	100.0	98.5	-1.0

### 4. Figures de la simulation par épisode (6 crues par page sauf la dernière)

calage par épisode sur l'échantillon-II (N°1 - N°6)

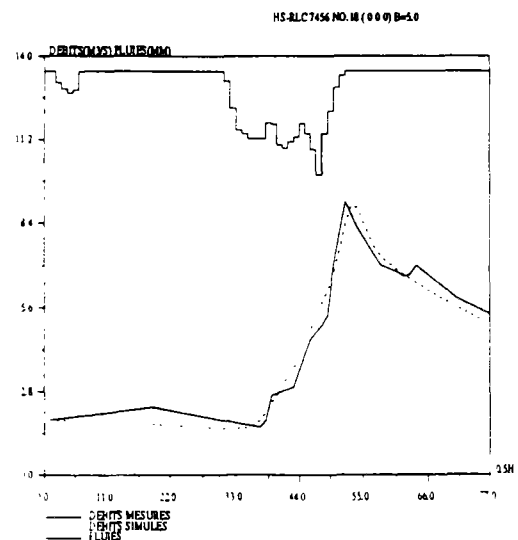
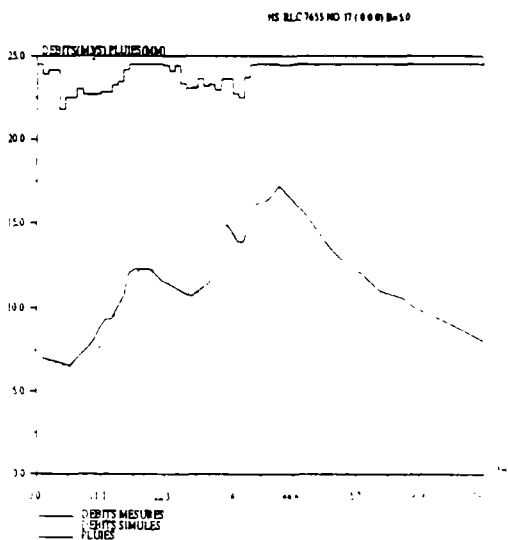
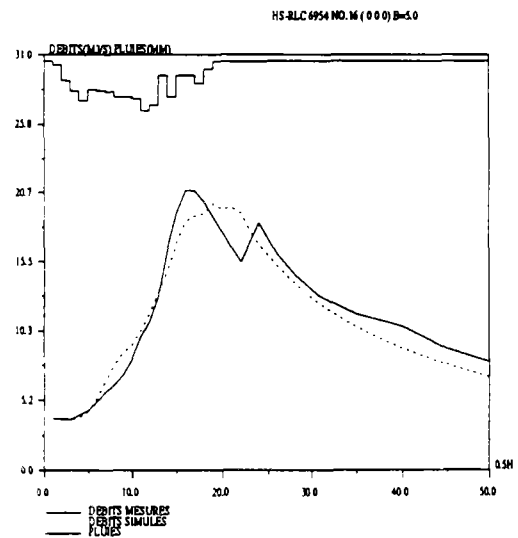
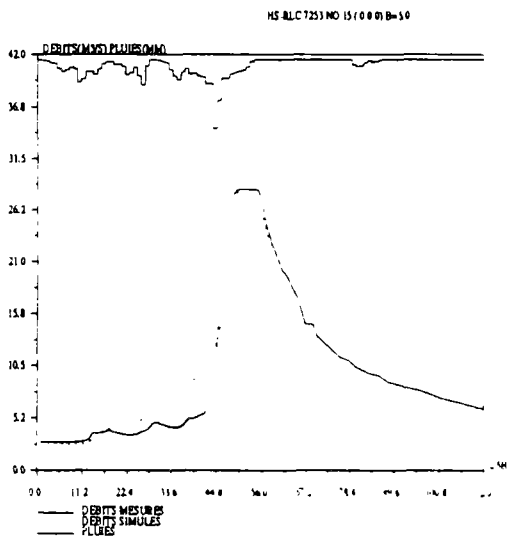
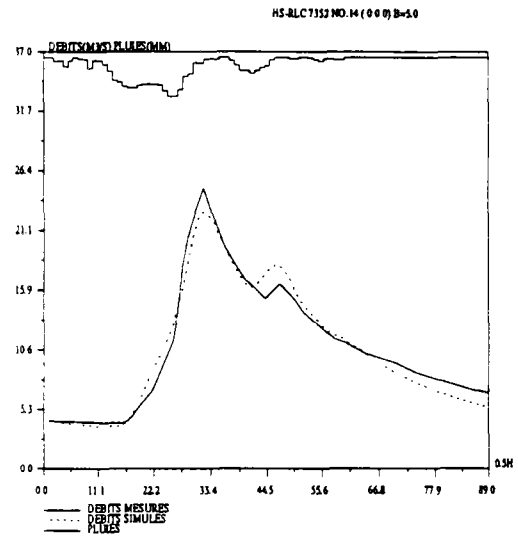
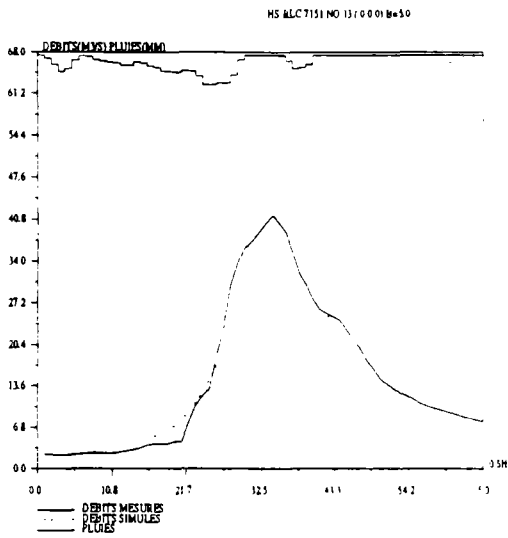


calage par épisode sur l'échantillon-II(N°7 - N°12)





calage par épisode sur l'échantillon-II(N°13 - N°18)









## ANNEXE-V

### Analyse de fiabilité du modèle GR3

V.1 ÉTUDES DES EFFETS DES INCERTITUDES DANS LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE.....	278
V.1.1 Études des effets des incertitudes des erreurs des pluies mesurées sur la reproduction des débits .....	280
V.1.2 Sensibilité des paramètres d'un modèle hydrologique.....	281
V.1.3 Études des effets des incertitudes sur la structure du modèle .....	282
V.1.4 Études sur l'incertitude globale du modèle.....	282
V.1.5 Considérations sur les méthodes existantes pour l'analyse des incertitudes.....	283
V.2 ANALYSE DE FIABILITÉ ET SON APPLICATION POUR UN MODÈLE HYDROLOGIQUE.....	283
V.2.1 Définition de la fiabilité et du risque d'un système.....	284
V.2.2 Méthode d'intégration directe.....	284
V.2.3 Méthode de simulation de Monte-Carlo .....	285
V.2.4 La méthode du premier ordre et des deux premiers moments (PODM) .....	286
V.2.4.1 Méthode du premier ordre et des deux premiers moments autour de la valeur moyenne (PODMM).....	289
V.2.4.2 Méthode du premier ordre et des deux premiers moments améliorée (PODMA) .....	290
V.2.4.3 Avantages des méthodes PODM.....	291
V.3 ANALYSE DE FIABILITÉ DU MODÈLE GR3.....	291
V.3.1 La fiabilité dans la simulation hydrologique .....	291
V.3.1.1 Qu'est ce que la fiabilité d'un modèle de simulation? .....	291
V.3.1.2 Définitions des fonctions de charge, de résistance et de sécurité du modèle de simulation .....	293
V.3.2 Distribution expérimentale des paramètres.....	295
V.3.3 Analyse des corrélations entre paramètres .....	296
V.3.3.1 Matrice des coefficients de corrélation .....	296
V.3.3.2 Test des corrélations entre les paramètres .....	296
V.3.4 Application au modèle GR3 .....	297
V.3.4.1 Choix de la méthode .....	298
V.3.4.2 Hypothèse.....	298
V.3.4.3 Test d'hypothèse .....	299
V.3.4.4 Calcul .....	299
V.3.4.5 Résultats.....	300
V.3.5. Analyse des contributions de chaque paramètre.....	301
V.4 CONCLUSION .....	303
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE L'ANNEXE-V .....	304

### Listes des figures et des tableaux

Figure V-1 Approximation du premier ordre .....	287
Figure V-2 Description de l'analyse de fiabilité pour un modèle de simulation .....	293
Figure V-3 Illustration de L et R .....	294
Figure V-4 Distribution expérimentale des paramètres A, B et C .....	296
Tableau V-1 Description qualitative des calages "global" et "par épisode" .....	293
Tableau V-2 Différentes significations des fonctions .....	295
Tableau V-3 Coefficients de corrélation .....	296
Tableau V-4 Valeurs de t pour chaque épisode de validation .....	300
Tableau V-5 Contributions des paramètres autour de $X_c$ .....	302
Tableau V-6 Contributions des paramètres autour de $X_g$ .....	302

## ANNEXE-V

## Analyse de fiabilité du modèle GR3

**Résumé:** Dans cette annexe, on va essayer d'étudier des incertitudes du modèle GR3 avec l'analyse de fiabilité - une méthode utilisée dans le domaine de la résistance des structures. On rappelle d'abord la méthode d'analyse des incertitudes d'un modèle hydrologique et ensuite on présente une utilisation de l'analyse de fiabilité pour le modèle GR3.

**NOTA:** Ce travail a été placé en annexe parce qu'il s'agit là d'un simple essai probablement à améliorer

### V.1 ÉTUDES DES EFFETS DES INCERTITUDES DANS LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

L'incertitude est la conséquence d'une connaissance incomplète. Les études sur les effets des incertitudes existent dans toutes les sciences naturelles et ont donné lieu à beaucoup d'efforts scientifiques. Dans le cas de la modélisation hydrologique, l'incertitude et l'erreur sont même considérés comme des signaux commodes du point de vue de l'évaluation des différences entre les prévisions et les mesures.

Le fait que l'incertitude existe dans un modèle est un problème courant et délicat. Les études sur les incertitudes ne sont pas très prisées probablement pour deux raisons. Premièrement, une telle étude manque de méthodes efficaces et convenant à la fois aux utilisateurs et aux fabricants de modèle. Deuxièmement, il est devenu une habitude d'apprécier un modèle en voyant "à quel niveau de précision le modèle est arrivé" et non pas en critiquant "à quel niveau de précision le modèle ne peut pas arriver". L'analyse des effets des incertitudes appartient surtout à la deuxième sorte d'étude qui consiste à révéler les insuffisances d'un modèle. On pense que l'existence et l'admission des incertitudes dans un modèle implique que ce modèle possède moins de validité et d'utilité. Il est vrai que les concepteurs de modèles prennent le risque de ternir leur oeuvre en faisant cette étude. Aujourd'hui, cette idée a bien changé. Les concepteurs de modèles reconnaissent l'importance de l'analyse des effets des incertitudes à la fois pour la recherche et pour l'application d'un modèle hydrologique parce que la réalité se révèle dialectiquement et qu'une application correcte des incertitudes associées au modèle peut nous aider à améliorer les résultats issus de ces modèles. Par

exemple, Kitanidis et Bras (1980a et b) ont appliqué la méthode du filtrage de Kalman pour traiter les incertitudes dans un modèle conceptuel et améliorer ainsi les prévisions de crue en temps réel. Il est reconnu aujourd'hui qu'un modèle ne sera considéré utilisable et fiable que lorsque ses incertitudes auront été analysées. L'importance de l'analyse des effets des incertitudes a été soulignée par Mack (1971) dans le domaine économique et social et cette analyse est intuitivement nécessaire pour les sciences naturelles:

"L'incertitude est un complément aux connaissances. Elle mesure lacune entre celles qui sont déjà connues et celles qui seraient nécessaires pour prendre une décision correcte. Une prise en compte raisonnable des incertitudes n'est pas le chemin le plus court pour arriver à une bonne décision, mais elle est indispensable pour y arriver."

La modélisation de la relation entre la pluie et le débit consiste à déterminer l'hydrogramme des débits issus des pluies, ce qui permet une application potentielle à la prévision des crues en temps réel et au génie hydraulique en général. Dans ces applications, les hydrologues sont, grosso modo, face à des incertitudes issues de trois sources: (1) l'incertitude sur les données mesurées, (2) l'incertitude des paramètres du modèle hydrologique et (3) l'incertitude sur la structure de modèle. Les incertitudes sur les données mesurées ont généralement trois origines à savoir: les erreurs aléatoires des mesures, les situations inadéquates des stations de mesure et les méthodes de traitement et de transmission des données mesurées. On peut dire que toutes ces incertitudes ont pour origine la nature incertaine intrinsèque du phénomène naturel. Grâce à l'existence des incertitudes, Plate (1986) a indiqué que même si un modèle parfait était disponible, les hydrologues seraient confrontés encore à une quantité non-négligeable de résidus aléatoires avec ce modèle.

L'étude des incertitudes des données mesurées concerne essentiellement la question suivante: comment les mesures humaines peuvent-elles refléter les variations réelles des événements hydrologiques? L'étude des incertitudes des paramètres d'un modèle consiste à montrer clairement l'influence des variations des paramètres sur les résultats de la modélisation. L'étude de l'incertitude de la structure d'un modèle consiste à vérifier le raisonnement logique supposé par le modèle. On rappelle brièvement les études des effets des incertitudes dans la modélisation hydrologique dans les paragraphes suivants.



### **V.1.1 Études des effets des incertitudes des erreurs des pluies mesurées sur la reproduction des débits**

Les études des effets des pluies se classent en principe en deux catégories: (1) l'approche des perturbations, dans laquelle les pluies mesurées sont perturbées avec des erreurs hypothétiques et (2) l'approche de la prise en compte de différents nombres de stations pluviométriques, dans laquelle les comparaisons portent sur les séries de débits générées avec les séries de pluies issues des différents nombres de stations pluviométriques.

Dans l'approche des perturbations, on suppose que les données mesurées (pluies, évaporations, ...), le modèle utilisé et les paramètres du modèle sont sans erreur et sont donc regardés respectivement comme les données "vraies", le modèle "vrai" et les paramètres "vrais". Il est naturel que l'hydrogramme "vrai" puisse résulter de ces éléments "vrais". On emploie une série d'erreurs aléatoires, suivant une loi normale  $N(0, \sigma_r)$  par exemple, pour perturber les pluies mesurées. Ces pluies perturbées sont ensuite transférées en hydrogrammes de débits avec le modèle "vrai", puis ces hydrogrammes perturbés sont comparés avec l'hydrogramme "vrai".

Ibbitt (1972) a utilisé cette approche pour examiner les effets des erreurs aléatoires issues des mesures de pluies, de débits et d'évaporations. Il a supposé premièrement que les données mesurées étaient les données "vraies" et deuxièmement que les écarts-types des erreurs aléatoires de ces données étaient égaux à dix pour-cent des données mesurées. Dans ces conditions, les erreurs ont été générées et utilisées à perturber les données mesurées. Diverses combinaisons entre les erreurs et les données "vraies" ont été prises en compte dans son étude. Les séries de données erronées ont été utilisées séparément pour caler le modèle hydrologique et les paramètres issus de ces calages ont été comparés. Il a été trouvé que les erreurs aléatoires ne provoquaient pas de changement significatif des valeurs des paramètres du modèle.

L'approche avec prise en compte de différents nombres de stations pluviométriques suppose que les prévisions des débits issues des pluies d'un grand nombre de stations pluviométriques soient les simulations "vraies". Les comparaisons se déroulent entre ces "vraies" simulations et celles issues des pluies d'un nombre faible de stations pluviométriques.

Bras et Rodriguez-Iturbe (1976) ont appliqué cette approche pour étudier la variation des résultats d'une simulation pluie-débit avec un modèle non-linéaire et distribué. Cette étude a été effectuée dans un bassin versant hypothétique en supposant que le nombre, les emplacements des stations pluviométriques et les erreurs mesurées ne sont pas définis. Ils ont trouvé deux conclusions très intéressantes pour la recherche sur la prévision des crues. Premièrement, la montée de crue est influencée fortement par les pluies tombées sur la région proche de l'exutoire du bassin versant considéré, et l'ampleur et le temps d'apparition du pic de crue sont influencés principalement par les pluies tombées en amont dans le bassin versant. Deuxièmement, pour la plupart des alternatives de couverture pluviométrique, l'incertitude des pluies affecte spécialement les pics et les montées des crues.

### **V.1.2 Sensibilité des paramètres d'un modèle hydrologique**

On répète ici ce qui a déjà été dit dans le §4.2.1. L'analyse de sensibilité est une méthode qui a été utilisée assez largement dans la recherche en modélisation. La méthode de l'analyse de sensibilité numérique consiste à perturber faiblement les paramètres du modèle, usuellement un paramètre à la fois, autour de sa valeur obtenue lors de l'optimisation afin de mesurer la variation dans la sortie du modèle engendrée par la variation du paramètre étudié.

L'un des buts de l'analyse de sensibilité consiste à identifier les différentes sensibilités des paramètres afin que des soins spéciaux puissent être pris pendant leur estimation. Dawdy et O'Donnell (1965) ont été parmi les premiers à analyser les sensibilités des paramètres d'un modèle hydrologique. Ils ont fait varier chaque paramètre dans le modèle USGS avec 1, 5 et 10 pour-cent de leurs valeurs optimisées, et examiné les changements sur la somme des carrés des différences entre les débits mesurés et calculés. L'objectif de cette analyse est d'identifier le paramètre le plus sensible pour chercher une procédure efficace d'optimisation.

L'analyse de sensibilité n'est pas le seul moyen pour étudier les effets des incertitudes des paramètres. Wood (1976) a analysé les incertitudes du paramètre d'infiltration dans un modèle pluie-débit simple. En supposant que les autres paramètres dans le modèle étaient bien connus, il a analysé

l'influence du paramètre d'infiltration sur la sortie du modèle du point de vue probabiliste. Bien que cette méthode soit discutable quant à son application à un modèle complexe ou au cas de plus d'un paramètre, cette étude nous a fourni un aperçu intéressant à savoir que même une faible incertitude sur les paramètres a une influence sur la simulation et l'estimation de la fréquence des crues dans le cas où les débits sont générés avec un modèle pluie-débit.

### **V.1.3 Études des effets des incertitudes sur la structure du modèle**

Très peu de chercheurs se sont engagés dans des études pour examiner l'influence des incertitudes causées par la structure du modèle sur la reproduction des débits. La raison principale de cette absence de recherche est probablement la difficulté à séparer les incertitudes sur la structure du modèle des autres incertitudes. De plus, une structure de modèle parfaite ou approuvée par tous n'existe pas; cela rend impossible une comparaison entre les structures de modèles et une structure "vraie".

### **V.1.4 Études sur l'incertitude globale du modèle**

Schilling et Fuchs (1986) ont comparé les hydrogrammes issus de différents modèles pluie-débit selon les pics et les volumes de crues. Ils ont divisé un bassin versant en 81 sous-bassins selon leurs caractéristiques physiques. Les mesures de pluies sont supposées capables de refléter les variations spatiales. Un modèle complexe a été pris en compte comme modèle "vrai" avec lequel on peut considérer des variations spatiales des pluies d'une façon assez précise en utilisant un taux de perte variant dans le temps, différents mécanismes de concentration des eaux superficielles pour les sous-bassins versants et une propagation en canal entièrement dynamique. Avec les paramètres corrects, ce modèle "vrai" est supposé plus proche de la réalité. Dans un bassin versant hypothétique, ce modèle "vrai" a été appliqué pour générer les hydrogrammes "exacts" afin de les comparer avec ceux calculés avec des modèles relativement simples. Schilling et Fuchs (1986) ont indiqué que la variation spatiale des pluies doit être bien prise en compte dans une modélisation pluie-débit en raison du fait que l'utilisation de pluies homogènes au lieu des pluies réelles peut entraîner de façon surprenante des

erreurs de simulation allant jusqu'à 30% pour les pics de crue et les volumes de crue.

### **V.1.5 Considérations sur les méthodes existantes pour l'analyse des incertitudes**

La littérature montre que la majorité des recherches concernent les études des effets des incertitudes d'une seule source, soit les données, soit les paramètres du modèle. Il y a eu très peu d'études pour envisager les effets globaux issus en même temps des données, des paramètres du modèle et de la structure du modèle. Cela est peut-être dû à la complexité et la difficulté de la prise en compte des interrelations entre différentes sources d'incertitudes (Schilling et Fuchs, 1986).

Selon l'état actuel de la connaissance des effets des incertitudes dans un modèle hydrologique, la méthode utilisée usuellement est une certaine comparaison entre le "vrai" et le "faux". Cette logique a été utilisée dans les analyses sur toutes sortes d'incertitudes. Notons que l'existence d'une modélisation hydrologique diversifiée tient au fait qu'un "vrai modèle" n'existe pas. En tout cas, il faut reconnaître que l'analyse des effets des incertitudes est nécessaire et indispensable pour développer et pour appliquer proprement un modèle hydrologique, mais on doit noter les limites des méthodes comparatives.

## **V.2 ANALYSE DE FIABILITÉ ET SON APPLICATION POUR UN MODÈLE HYDROLOGIQUE**

Depuis plus de 30 ans, les méthodes de l'analyse de fiabilité sont développées par les ingénieurs en recherchant une base scientifique pour la sécurité des structures. Yen (1987) a présenté l'état actuel des applications de l'analyse de fiabilité dans le domaine du génie hydraulique. Depuis une vingtaine d'années, on a réfléchi à son application pour un modèle hydrologique (Voir par exemple Melching et al., 1990, 1991). Trois sortes de méthodes d'analyse de fiabilité apparaissent potentiellement utilisables pour la modélisation hydrologique. Ces méthodes sont: la méthode d'intégration directe, la méthode de simulation de Monte-Carlo, la méthode du premier ordre et des deux premiers moments.

### V.2.1 Définition de la fiabilité et du risque d'un système

La défaillance d'un système peut être vue comme l'événement où la charge (L), qui agit sur le système, dépasse la capacité ou la résistance (R) du système avant que le système n'atteigne l'objectif voulu. Le risque peut être défini comme la probabilité de défaillance du système  $P_r$ :

$$\text{Risque} = P_r = P(L \geq R) \quad (\text{V-1})$$

$$\text{Fiabilité} = P_f = 1 - P_r = P(L < R) \quad (\text{V-2})$$

où P dénote la fonction de probabilité. En introduisant la fonction de sécurité, Z, par exemple  $Z=R-L$  ou  $Z = \ln(R/L)$ , on peut réécrire l'équation (V-1) sous la forme:

$$P_r = P(Z < 0) \quad (\text{V-3})$$

où  $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = g(\underline{x})$ , dans laquelle  $\underline{x}$  représente le vecteur des variables fondamentales du système et n est le nombre de ces variables. Alors, la fiabilité du système est:  $P_f = P(Z \geq 0)$ .

### V.2.2 Méthode d'intégration directe

La probabilité de défaillance ou risque du système peut être exprimée comme suit:

$$P_r = \int_a^b \int_c^l f_{R,L}(r,l) dr dl \quad (\text{V-4})$$

dont  $f_{R,L}(r,l)$  est la fonction de densité de probabilité conjointe de R et de L; c est la borne inférieure de R; a et b sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de L. Usuellement,  $a=c=0$  et  $b=\infty$  pour un problème de génie hydraulique. Sous la condition que la fonction de résistance, R, et la fonction de charge, L, soient statistiquement indépendantes l'une à l'autre. L'éq. V-4 peut être réécrite comme suit:

$$P_r = \int_0^{\infty} f_L(l) \left[ \int_0^l f_R(r) dr \right] dl = \int_0^{\infty} f_R(r) \left[ \int_r^{\infty} f_L(l) dl \right] dr \quad (\text{V-5})$$

Où  $f_R(\cdot)$  et  $f_L(\cdot)$  sont respectivement les fonctions de densité de probabilité de R et de L.

Wood (1976) a appliqué la méthode d'intégration directe à l'analyse des effets des incertitudes d'un paramètre dans un modèle pluie-débit assez simple sur les fréquences des crues générées par des pluies mesurées et ce modèle pluie-débit.

Davis et Nnaji (1982) a étudié la fiabilité des prévisions de crue issues d'un modèle pluie-débit dans un petit bassin versant de 33 km<sup>2</sup>. Ils ont déterminé a priori une fonction de distribution des probabilités conditionnelles des débits à l'exutoire du bassin versant en fonction des pluies mesurées en se fondant sur le modèle pluie-débit de Purdue. Cette distribution de probabilité a été utilisée pour déterminer la probabilité que les niveaux d'eau correspondant aux pluies données dépassent le niveau critique pour la protection contre les crues.

Tung et Mays (1980, 1981) ont proposé une démarche innovante. Ils ont exploité dans leur étude les relations entre les variables fondamentales du système et les fonctions L et R en employant une approximation du premier ordre et ont pu trouver les fonctions de distribution de L et R. Ce faisant, ils ont rencontré des obstacles dans la sélection des fonctions de distribution appropriées et dans la méthode d'intégration numérique.

La clé pour utiliser la méthode d'intégrale directe est de trouver la fonction de densité de probabilité pour chaque  $x_i$  dans  $\underline{x}$  ou pour L et R ou pour Z. A condition que les fonctions de distribution appropriées soient bien connues, le risque du système évalué par la méthode d'intégration directe est théoriquement exact, ce qui représente le grand avantage de cette méthode. Malheureusement, ces fonctions de distribution sont rarement connues en réalité. Même si les fonctions de distribution sont connues ou peuvent être supposées, on se retrouve encore face à des problèmes provenant de l'intégration numérique. Un traitement impropre de la fonction de distribution et/ou de la méthode d'intégration numérique peut réduire à néant l'avantage de la méthode d'intégrale directe. On ne peut donc utiliser la méthode d'intégration directe que sur les systèmes simples ou des parties d'un système complexe.

### **V.2.3 Méthode de simulation de Monte-Carlo**

L'idée de la méthode de simulation de Monte-Carlo consiste à faire fonctionner un modèle de simulation de nombreuses fois. Avant chaque

simulation, on tire au hasard les valeurs des paramètres du modèle. On estime la probabilité de risque du système avec le taux de défaillances du système sur le nombre de simulations. Comme condition nécessaire, les distributions de probabilité des paramètres doivent être connues ou déterminées a priori.

La méthode de Monte-Carlo est une méthode assez souple, c'est-à-dire qu'elle peut être utilisée pour divers problèmes, et elle est souvent vue comme une méthode passe-partout. On considère aussi qu'elle est la seule méthode disponible pour estimer le risque d'un système complexe et/ou à haute non-linéarité. En dépit de sa souplesse, la méthode de Monte-Carlo n'a pourtant pas toujours été très recommandée pour l'analyse du risque d'un système car le risque estimé par cette méthode n'est pas unique à savoir qu'il dépend de la taille de l'échantillon et du nombre d'essais, et cela est surtout vrai pour un système complexe dont le risque est assez petit. Autrement, de nombreux d'essais sont nécessaires pour obtenir des résultats convenables avec cette méthode alors qu'une grande quantité de temps de calcul est demandée, peut-être hors de la capacité des moyens de calcul disponibles.

Les conclusions précédentes sont confirmées par l'étude de Garen et Burges (1981) qui ont analysé les incertitudes existant dans un système de prévision des crues. Ils ont utilisé la méthode de Monte-Carlo pour estimer les limites des erreurs des hydrogrammes issus des variations des paramètres du modèle de Stanford simplifié.

#### **V.2.4 La méthode du premier ordre et des deux premiers moments (PODM)**

Benjamin et Cornell (1970) ont proposé la méthode du premier ordre pour évaluer les modèles hydrologiques. Considérons une relation simple entre  $Z$  et  $x$ :

$$Z = G(x) \quad (V-6)$$

On développe  $G(x)$  avec la série de Taylor autour de  $x_0$ :

$$Z = G(x_0) + \frac{dG}{dx_0}(x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2G}{dx_0^2} (x - x_0)^2 + \dots \quad (V-7)$$

où  $dG/dx_0$  et  $d^2G/dx_0^2$  sont respectivement les valeurs de  $dG/dx$  et  $d^2G/dx^2$  évaluées en  $x_0$ . Si l'on prend en compte une approximation linéaire ou du premier ordre, l'éq. V-7 devient donc plus simple:

$$Z = G(x_0) + \frac{dG}{dx_0}(x - x_0) \quad (V-8)$$

L'approximation du premier ordre est illustrée dans la figure V-1. Il paraît nécessaire de souligner que cette méthode n'est acceptée que pour les fonctions faiblement non-linéaires afin que l'erreur d'extrapolation n'affecte pas trop les analyses qui se basent sur l'éq. V-8.

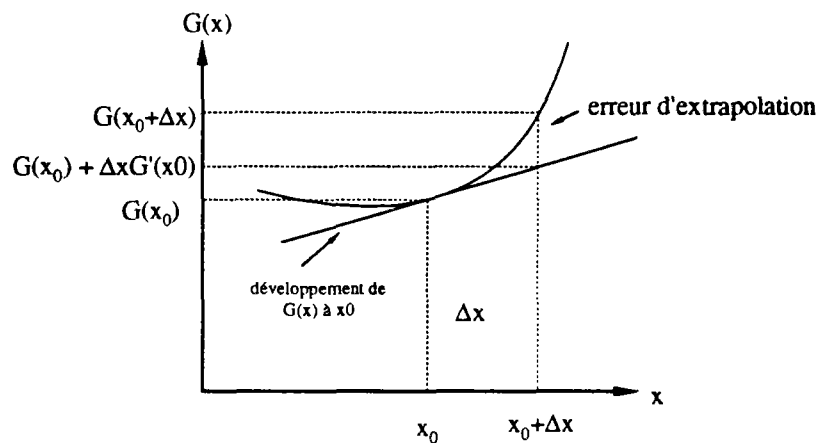


Figure V-1. Approximation du premier ordre

Selon l'équation V-8, on peut obtenir de plus les estimations de l'espérance et de la variance de Z:

$$E(Z) = G(x_0) + \frac{dG}{dx_0}(\bar{x} - x_0) \quad (V-9)$$

$$\text{VAR}(Z) = \left(\frac{dG}{dx_0}\right)^2 \text{VAR}(x) \quad (V-10)$$

où  $E(\cdot)$  et  $\text{VAR}(\cdot)$  sont respectivement les opérateurs d'espérance et de variance. Dans un cas multivariable, on a une extension directe de l'équation V-8:

$$Z = G(\underline{x}_0) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial G}{\partial x_{i0}}(x_i - x_{i0}) \quad (V-11)$$

ou

$$Z = G(\underline{x}_0) + \sum_{i=1}^n C_i(x_i - x_{i0}) \quad (V-12)$$



où  $C_i$  représente la dérivée partielle  $\partial G/\partial x_i$  évaluée à  $x_{i0}$ . On peut obtenir les estimations de l'espérance et de la variance de  $Z$ :

$$E(Z) \approx G(\underline{x}_0) + \sum_{i=1}^n C_i (\bar{x}_i - x_{i0}) \quad (V-13)$$

$$\text{VAR}(Z) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_i C_j \text{COV}(x_i, x_j) \quad (V-14)$$

où COV est l'opérateur de covariance, y compris les variances de  $x_i$  lorsque  $i=j$ .

Concernant les "deux premiers moments", il s'agit d'appliquer les estimations de l'espérance et de l'écart-type de  $Z$  pour analyser la fiabilité du système définie comme étant:

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{s_z} \quad (V-15)$$

où  $\bar{Z}$  et  $s_z$  sont respectivement les estimation de l'espérance et de l'écart-type de  $Z$ . Selon les équations V-13 et V-14, on a donc:

$$\beta = \frac{G(\underline{x}_0) + \sum_{i=1}^n C_i (\bar{x}_i - x_{i0})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_i C_j \text{COV}(x_i, x_j)} \quad (V-16)$$

où  $\beta$  est défini comme l'indice de fiabilité de système. Il est en fait l'inverse du coefficient de variation de  $Z$  et un rapport de Student pour la variable  $Z$ . Cet indice sert à mesurer  $E(Z)$  par rapport à l'origine de  $Z$  avec  $\sigma_z$  (Yen, 1987) (noter que  $Z=0$  est le point critique de défaillance de système). D'après l'éq. V-16, la fiabilité d'un système peut être regardée comme une fonction des variations des variables fondamentales  $\text{VAR}(x_i)$  et des facteurs de sensibilité ( $C_i$ ). Pour un modèle hydrologique, l'indice de fiabilité fournit un aperçu sur les effets des incertitudes issues de l'ensemble des paramètres du modèle et éventuellement des entrées. La méthode du premier ordre et des deux premiers moments a été développée en principe sous deux aspects comme décrit dans les sous-sections suivantes. Plutôt que de se donner a priori des lois de distribution sur les paramètres du modèle, on peut le faire sur la fonction de sécurité  $Z$  et si supposer que  $Z$  suit une loi normale, la fiabilité du système devient:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (\text{V-17})$$

où  $\Phi(\cdot)$  est la fonction de la loi normale centrée réduite.

#### V.2.4.1 Méthode du premier ordre et des deux premiers moments autour de la valeur moyenne (PODMM)

Dans la méthode de PODMM, la valeur moyenne du vecteur des variables fondamentales,  $\underline{x}$ , est choisie comme le point de développement. Dans ce cas, l'équation (V-11) devient:

$$Z \approx G(\underline{\bar{x}}) + \sum_{i=1}^n C_i (x_i - \bar{x}_i) \quad (\text{V-18})$$

dans laquelle  $C_i$  est évaluée en  $\bar{x}_i$ . Les estimations de l'espérance et de l'écart-type de  $Z$  sont donc:

$$E(Z) \approx G(\underline{\bar{x}}) \quad (\text{V-19})$$

$$\text{VAR}(Z) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_i C_j \text{COV}(x_i, x_j) \quad (\text{V-20})$$

où  $C_i$  et  $C_j$  sont respectivement les dérivées partielles,  $\partial G/\partial x_i$  et  $\partial G/\partial x_j$ , évaluées en  $\bar{x}$ . Si les variables ( $x_i$ ,  $i=1, \dots, n$ ) sont statistiquement indépendantes les unes des autres, les termes de covariance dans l'équation (V-20) disparaissent et alors:

$$\text{VAR}(Z) = \sigma_z^2 \approx \sum_{i=1}^n C_i^2 \text{VAR}(x_i) \quad (\text{V-21})$$

Cela est une approximation raisonnable seulement à condition que  $Z$  soit approximativement linéaire par rapport aux  $x_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . Dans ce cas, le risque du système peut être mesuré par  $\beta$ :

$$\beta = \frac{G(\underline{\bar{x}})}{\left[ \sum_{i=1}^n C_i^2 \text{VAR}(x_i) \right]^{0.5}} \quad (\text{V-22})$$

Yen et Tang (1977) ont appliqué la méthode PODMM à une analyse des incertitudes dans un modèle de propagation de crue en vue d'évaluer la fiabilité de ce modèle pour la prévision des crues. Ils ont séparé les incertitudes selon leurs origines et les ont utilisées dans la méthode PODMM.

Comme conclusion, ils ont proposé d'utiliser différents facteurs de correction correspondant aux incertitudes issues de différentes origines pour corriger les prévisions. Bien que la méthode proposée semble peu utilisable dans la pratique à cause d'une identification impossible des origines d'incertitude en temps réel, ils ont pour la première fois fait un essai pour introduire la méthode de l'analyse de fiabilité dans la recherche en prévision des crues.

#### V.2.4.2 Méthode du premier ordre et des deux premiers moments améliorée (PODMA)

La différence entre les méthodes PODMM et PODMA, ou disons l'amélioration introduite dans cette dernière, est d'effectuer le développement de Taylor de la fonction de performance autour d'un point quelconque  $\underline{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  et non plus de la valeur moyenne:

$$Z \approx G(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^n C_i (x_i - x_i^*) \quad (V-23)$$

A condition que les variables fondamentales soient statistiquement indépendantes les unes des autres, les estimations de l'espérance et de l'écart-type de la fonction de performance peuvent être données par:

$$E(Z) \approx G(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^n C_i (\bar{x}_i - x_i^*) \quad (V-24)$$

$$\text{VAR}(Z) = \sigma_z^2 \approx \sum_{i=1}^n C_i^2 \text{VAR}(x_i) \quad (V-25)$$

où  $C_i$ , dans ce cas, est évaluée au point  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ . L'indice de fiabilité peut être exprimé comme suit:

$$\beta = \frac{G(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^n C_i (\bar{x}_i - x_i^*)}{\left[ \sum_{i=1}^n C_i^2 \text{VAR}(x_i) \right]^{0.5}} \quad (V-26)$$

Melching et Yen (1986) ont utilisé la méthode PODMA pour analyser la fiabilité d'un réseau de collecte des eaux pluviales. Melching et al. (1990) ont exposé une application de la méthode PODMA à la fiabilité de la prédétermination des crues. Melching et al. (1991) ont appliqué cette méthode pour la sélection des modèles hydrologiques. La difficulté de cette

approche réside dans le choix du point  $x^*$  pour obtenir les conclusions les plus pertinentes qu'il est possible.

#### **V.2.4.3 Avantages des méthodes PODM**

Les avantages des méthodes PODM ont été présentés dans le cadre des applications dans le génie hydraulique. En ce qui concerne la modélisation hydrologique, on pense que: 1) cette méthode est relativement simple dans sa formulation; 2) elle permet de considérer des paramètres aussi nombreux que l'on veut; 3) le besoin en données est assez modéré. Elle nécessite seulement des estimations de l'espérance et de l'écart-type des paramètres, mais pas de leur distributions. Cependant, elle peut utiliser les informations sur la distribution s'ils sont disponibles; et 4) elle peut fournir un aperçu sur les contributions relatives de chaque paramètre, à la variation du risque.

Yen et al. (1987) ont comparé les méthodes PODMM et PODMA dans un cas simple où le modèle n'a que deux paramètres. Ils ont indiqué que la dernière possède un plus grand potentiel de précision que la première.

### **V.3 ANALYSE DE FIABILITÉ DU MODÈLE GR3**

On va proposer dans ce paragraphe une étude de fiabilité du modèle GR3 sur les différences entre le calage global sur un échantillon de crues et le calage sur une crue distincte des précédentes en utilisant la méthode PODMA. D'abord, on décrit le problème de fiabilité pour un modèle hydrologique, qui apparaît très différent de celui dans le domaine des structures. Ensuite, on présente successivement la distribution expérimentale de chaque paramètre, l'analyse des corrélations entre les paramètres, l'analyse de fiabilité et l'analyse des contributions de chaque paramètre.

#### **V.3.1 La fiabilité dans la simulation hydrologique**

##### **V.3.1.1 Qu'est ce que la fiabilité d'un modèle de simulation?**

La fiabilité d'un modèle hydrologique dépend fortement de ce qu'on attend du modèle. On envisage notre analyse sur l'échantillon de calage et sur l'échantillon de validation. La fiabilité d'un modèle est exprimée ici en fonction des différences existant entre le calage global sur un échantillon et le calage par épisode sur un deuxième échantillon. Par définition, plus ces différences sont faibles, plus la fiabilité est grande. Pour faciliter la

description, on laisse  $X_g$  représenter les paramètres issus du calage global et  $X_c$  représenter les paramètres sur un épisode distinct de ceux utilisés pour  $X_g$ . Cette analyse concerne essentiellement le test de deux capacités importantes d'un modèle de simulation: 1) la capacité à prendre en compte le caractère universel et le caractère spécifique des événements de crues (les calages "global" et "par épisode") et 2) la capacité d'extrapolation au delà (de l'échantillon de calage). ATTENTION: Dans ce qui suit l'échantillon de calage sera l'échantillon-I (cf. §2.3) que celui utilisé dans le chapitre 4 et l'épisode retenu pour le calage par épisode sera choisi dans l'échantillon de validation étant l'échantillon-II (cf. §2.3).

On a remarqué que l'analyse de fiabilité est en fait un prolongement de l'analyse des incertitudes d'un modèle de simulation. On peut ainsi analyser l'ensemble des incertitudes issues du modèle, en prenant en compte les caractéristiques statistiques des paramètres du modèle, leur différentes sensibilités et les incertitudes sur les données mesurées.

On a remarqué aussi que l'analyse de fiabilité est différente de l'analyse de précision comme elle a été présentée dans la première partie de cette thèse. Par exemple, si on décrit qualitativement les résultats issus de  $X_g$  et de  $X_c$  avec les mentions "bon" et "mauvais" pour la simulation d'un épisode de crue dans l'échantillon de validation (dans notre cas l'échantillon-II par exemple) on peut juger de la fiabilité du modèle comme le montre le tableau V-1. Pour une analyse de précision, on retient les bons résultats (1) et (3), mais pour une analyse de fiabilité le modèle est considéré fiable dans les cas (1) et (4). On juge que le cas (3) est rare du fait que le calage par épisode est toujours meilleur qu'un calage global sauf optimum secondaire. Quant au cas (4), qui n'est pas accepté par l'analyse de précision probablement relève d'un problème d'extrapolation, il est reconnu acceptable par l'analyse de fiabilité du fait que les résultats issus de  $X_g$  possèdent la même précision que ceux issus de  $X_c$ , c'est-à-dire qu'avec  $X_g$  on peut arriver au "bout" de la capacité du modèle pour cet épisode de crue. En réalité, le cas (3) est provoqué par la non-efficacité de la méthode d'optimisation utilisée pour le calage, mais pas par un problème d'extrapolation du modèle et le cas (4) est dû probablement à des raisons hors modèle. Pour ces deux cas, il nous semble qu'il n'est pas raisonnable de rejeter le modèle dans le cas (4) et de confirmer le modèle dans le cas (3). En dernier lieu, et cela est important, le fait que le modèle soit fiable implique que  $X_g$  n'est pas très loin de  $X_c$ . Cela démontre la faisabilité

d'une recherche concernant la méthode d'ajustement des paramètres pour la prévision des crues en temps réel. On peut dire que l'analyse de fiabilité est un complément de l'analyse de précision et, en quelque sorte, elle est plus objective que cette dernière.

Tableau V-1 description qualitative des calages "global" et "par épisode"

simulation avec $X_c$	simulation avec $X_g$	
	<i>bons</i>	<i>mauvais</i>
<i>bons</i>	fiable (1)	non-fiable (2)
<i>mauvais</i>	non-fiable (3)	fiable (4)

### V.3.1.2 Définitions des fonctions de charge, de résistance et de sécurité du modèle de simulation

Pour un modèle avec un paramètre  $x$ , la figure V-2 montre deux courbes correspondant respectivement à la surface de réponse du calage global sur l'échantillon de calage, la courbe E, et à la surface de réponse du calage sur un épisode quelconque de l'échantillon de validation, la courbe F. Ce sont les surfaces étudiées par l'analyse de fiabilité.  $X_g$  et  $X_c$  ont les mêmes définitions que précédemment.  $X_g$  est optimisé sur la courbe E et représenté par le point A,  $X_c$  est optimisé sur la courbe F et représenté par le point C; B est obtenu à partir de  $X_g$  sur la courbe F. Notre analyse concerne surtout le point B et le point C.

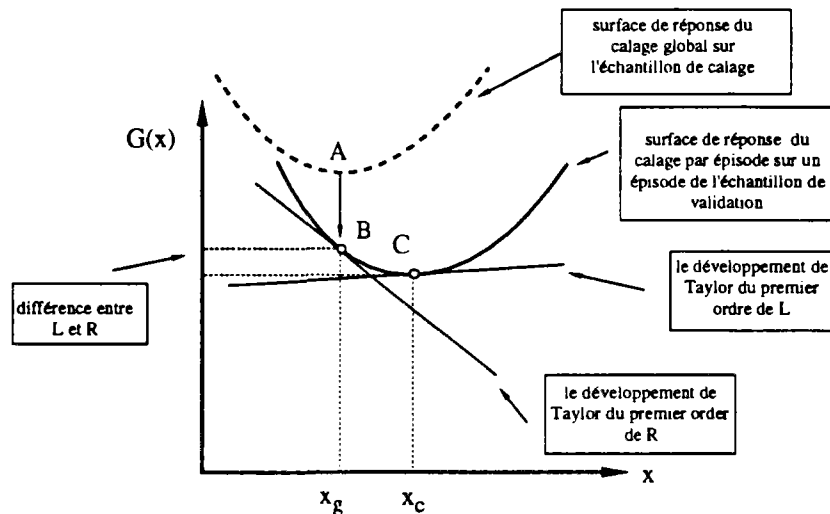


Figure V-2 description de l'analyse de fiabilité pour un modèle de simulation

En comparant avec les définitions de la méthode de l'analyse de fiabilité présentée précédemment, on peut considérer le point B comme la charge du système et le point C comme la résistance du système, dans ce cas la fonction de charge, L, est le développement de G(x) en B et la fonction de résistance est le développement de G(x) en C. Bien que les contenus de L et R soient tout à fait différents de leur contenus originaux, on gardera ces terminologies dans cette étude.

Ici, L et R sont regardés comme des variables aléatoires possédant des distributions propres comme illustré dans la figure V-3.

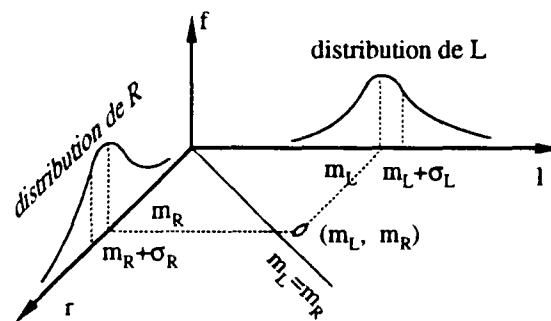


Figure V-3 Illustration de L et R

On peut définir la fonction de sécurité,  $Z=L-R$ . Alors, la fiabilité du modèle et le risque du modèle peuvent être exprimés comme suit:

$$\text{fiabilité} = P_f = P(|L-R| \leq \epsilon) = P(|Z| \leq \epsilon) \quad (\text{V-27})$$

$$\text{risque} = 1 - P_f = P(|L-R| > \epsilon) = P(|Z| > \epsilon) \quad (\text{V-28})$$

où  $\epsilon$  représente le domaine de fiabilité. étant donné  $f_{R,L}(r,l)$  la fonction de distribution de probabilité conjointe de L et R, et le domaine de fiabilité,  $\epsilon$ , correspondant à L et R,  $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{12}$ ,  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ , ou la fonction de distribution de probabilité de Z et le domaine de fiabilité,  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ , la fiabilité du modèle peut être calculée théoriquement par

$$P_f = \int_{\epsilon_{11}}^{\epsilon_{12}} \int_{\epsilon_{r1}}^{\epsilon_{r2}} f_{R,L}(r,l) dr dl = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} f_Z(z) dz \quad (\text{V-29})$$

Supposons que  $L \sim N(m_l, \sigma_l)$  et  $R \sim N(m_r, \sigma_r)$ , que L et R soient indépendantes et que les domaines de fiabilité soient  $\pm \epsilon_1$  et  $\pm \epsilon_r$  pour L et R, on a alors pour  $Z=L-R$ :

$$E(Z) = m_l - m_r \quad (\text{V-30})$$

$$\text{VAR}(Z) = \text{VAR}(L) + \text{VAR}(R) \quad (\text{V-31})$$

$$Z \sim N(m_l - m_r, \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_r^2}) \quad (\text{V-32})$$

En particulier, si  $m_l = m_r = 0$ , on peut avoir l'expression:

$$\int_{-\varepsilon_l}^{\varepsilon_l} \int_{-\varepsilon_r}^{\varepsilon_r} f_{R,L}(r,l) dr dl = 4 \left[ \int_0^{\varepsilon_l} f_L(l) dl \right] \left[ \int_0^{\varepsilon_r} f_R(r) dr \right] = 2 \int_0^{\sqrt{\varepsilon_l^2 + \varepsilon_r^2}} f_Z(z) dz \quad (\text{V-33})$$

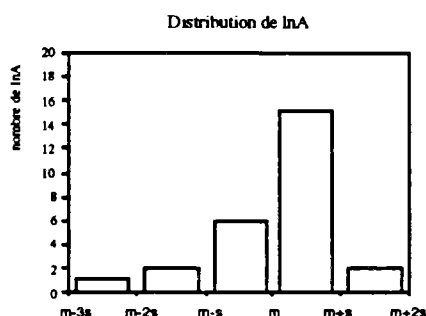
Il faut noter les différences entre les définitions utilisées ici et celles utilisées pour l'analyse de fiabilité en génie hydraulique. Elles apparaissent principalement dans le tableau V-2.

Tableau V-2 Différentes significations des fonctions

pour l'analyse d'une structure	pour l'analyse d'un modèle
$Z=L-R$ , $Z=0$ est le point de défaillance	$Z=L-R$ , $Z=0$ est le point de réussite
$P_f(L < R) = P(Z > 0)$ la probabilité de fiabilité de système	$P_f( L-R  \leq e) = P( Z  \leq e)$ : la probabilité de fiabilité de modèle
$P_f(L > R) = P(Z < 0)$ la probabilité de risque de système	$P_f( L-R  > e) = P( Z  > e)$ : la probabilité de risque de modèle

### V.3.2 Distribution expérimentale des paramètres

Comme dit dans le chapitre 4, le modèle a été calé sur 26 crues (l'échantillon-I est pris comme échantillon de calage), ce qui nous donne 26 vecteurs de paramètres qui présentent des différences assez grandes. Les distributions de ces paramètres (A, B et C) apparaissent dans la figure V-4; on constate que les valeurs de ces paramètres sont assez dispersées. Ils présentent une certaine asymétrie autour de la valeur moyenne.





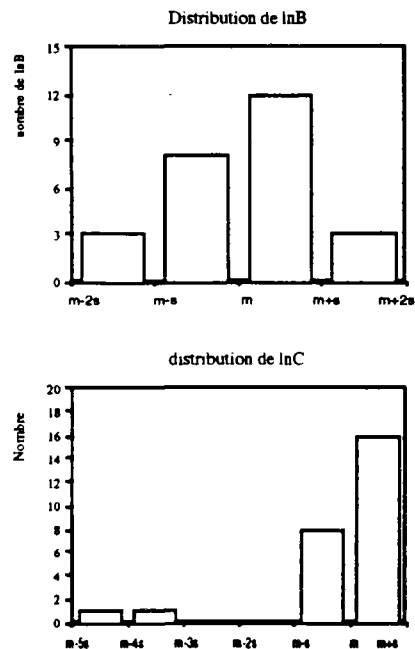


Figure V-4 Distribution expérimentale des paramètres A, B et C

### V.3.3 Analyse des corrélations entre paramètres

#### V.3.3.1 Matrice des coefficients de corrélation

L'analyse sur les corrélations entre les paramètres du modèle GR3 se base sur les paramètres provenant du calage par épisode sur l'échantillon de calage. On a testé les corrélations entre les paramètres.

Tableau V-3 Coefficients de corrélation

	A	B	C
A	1.000	-0.372	-0.335
B	-0.372	1.000	0.215
C	-0.355	0.215	1.000

#### V.3.3.2 Test des corrélations entre les paramètres

I. Définition de l'hypothèse nulle,  $H_0: r=0$ .

II. Choix de la variable statistique: Yevjevich (1971) a suggéré plusieurs méthodes simples pour tester la corrélation entre les séries temporelles. L'une d'entre elles est d'employer la variable statistique  $t$  définie par

$$t = \frac{\sqrt{N-3}}{2} \ln \left[ \left( \frac{1+r}{1-r} \right) \left( \frac{1-\rho}{1+\rho} \right) \right] \quad (\text{V-34})$$

où  $r$  et  $\rho$  sont respectivement les coefficients de corrélation de l'échantillon et de la population, et  $N$  est la taille de l'échantillon.

III. La variable statistique,  $t$ , suit approximativement la loi normale réduite,  $N(0,1)$ .

IV. Choisissons un intervalle de confiance à 95%. c'est-à-dire que la probabilité de rejeter  $H_0$  est  $\alpha=0.05$ .

V. Réorganisons l'équation V-34 pour obtenir la valeur d'une borne correspondant à l'intervalle de confiance,  $r_b$  en fonction de  $\rho$  et de  $t$ . On a alors:

$$r_b = \frac{(1+\rho)\exp\left(\frac{2t}{\sqrt{N-3}}\right) - (1-\rho)}{(1+\rho)\exp\left(\frac{2t}{\sqrt{N-3}}\right) + (1-\rho)} \quad (\text{V-35})$$

$r_b(t_{\alpha/2})$  et  $r_b(t_{1-\alpha/2})$  sont des valeurs les bornes correspondant à l'intervalle de confiance à  $1-\alpha$ . Correspondant à  $\alpha=0.05$ , on a  $|t_{1-\alpha/2}| = 1.96$ . On prend  $\rho=0$  (relatif à  $H_0$ ) et  $N=26$  étant le nombre des événements dans notre cas. On obtient donc  $r_b = \pm 0.387$  pour  $r$  non significativement différent de zéro.

V. Résultats: Le tableau V-3 nous montre les coefficients de corrélation entre les paramètres du modèle. On peut trouver que toutes les valeurs absolues des coefficients de corrélation sont dans l'intervalle précédent. On peut dire alors que les coefficients de corrélation théoriques entre les paramètres A, B et C ne sont pas différents de zéro du point de vue statistique.

Il est intéressant que ces paramètres soient non-corrélés linéairement. Cette caractéristique confère à GR3 un avantage: l'optimisation en est facilitée. On rappelle que cette analyse s'appuie sur les transformées logarithmiques des paramètres. On doit noter que la valeur initiale du niveau de  $S_0$  n'est pas prise en compte dans cette analyse, bien qu'elle soit un facteur non négligeable pour le calcul épisode par épisode.

### V.3.4 Application au modèle GR3

Une brève description de la méthode du premier ordre et des deux premiers moments (PODMA) a été présentée dans le §V.2.3.2. Une formulation de

l'analyse de fiabilité sur un modèle hydrologique a été présentée dans le §V.3.1.2. Cette section a contribué à l'analyse de fiabilité du modèle GR3.

#### V.3.4.1 Choix de la méthode

La méthode d'intégration directe selon l'équation V-29 est difficile à appliquer parce que l'on ne connaît habituellement ni les fonctions de charge et de résistance ni les domaines de fiabilité. On a alors recouru à la méthode du premier ordre et des deux premiers moments améliorée (PODMA). On a choisi les fonctions de charge et de résistance comme montré dans §V.3.1.2 et défini la fonction de sécurité  $Z=L-R$ . On a testé ensuite si  $Z$  a une valeur moyenne nulle avec la méthode du test d'hypothèse, c'est-à-dire si  $E(L)=E(R)$  selon la définition de  $Z$ . Les estimations de  $E(Z)$  et  $VAR(Z)$  ont été calculées respectivement avec  $E(L)$ ,  $E(R)$  et avec  $VAR(L)$ ,  $VAR(R)$  qui sont estimées avec la méthode du premier ordre. Les détails ont été montrés dans les sous-sections suivantes.

#### V.3.4.2 Hypothèse

Hypothèse 1: Les fonctions de charge,  $L$ , et de résistance,  $R$ , peuvent être approchées par leurs développements du premier ordre de la série de Taylor. Alors:

$$L \approx G(\underline{x}_g) + \sum_{i=1}^n C_i^g (x_i - x_{ig}) \quad (V-36)$$

$$R \approx G(\underline{x}_c) + \sum_{i=1}^n C_i^c (x_i - x_{ic}) \quad (V-37)$$

$$E(L) \approx G(\underline{x}_g) + \sum_{i=1}^n C_i^g (\bar{x}_i - x_{ig}) \quad (V-38)$$

$$VAR(L) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_i^g C_j^g COV(x_i, x_j) \quad (V-39)$$

$$E(R) \approx G(\underline{x}_c) + \sum_{i=1}^n C_i^c (\bar{x}_i - x_{ic}) \quad (V-40)$$

$$VAR(R) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_i^c C_j^c COV(x_i, x_j) \quad (V-41)$$

où  $\underline{x}_g$  et  $\underline{x}_c$  sont respectivement les vecteurs des paramètres calés globalement sur l'échantillon de calage et sur un épisode de l'échantillon de validation. En principe, les dérivées dans l'équation V-37 sont nulles.

**Hypothèse 2:** L et R sont indépendants car  $X_g$  et  $X_c$  n'ont pas la même origine:  $X_g$  est issu de l'échantillon de calage et  $X_c$  est issu d'un épisode de crues de l'échantillon de validation. On a alors pour estimer les valeurs caractéristiques:

$$E(Z) = E(L) - E(R) \quad (V-42)$$

$$\text{Var}(Z) = \text{VAR}(L) + \text{VAR}(R) \quad (V-43)$$

**Hypothèse 3:** Les paramètres suivent la loi normale et par suite, L et R suivent une loi normale, ainsi que Z.

#### V.3.4.3 Test d'hypothèse

On teste si  $E(Z) = 0$ . On prend donc  $H_0: E(Z)=0$ . Concernant le test de la moyenne comme:  $\mu = \mu_1$  on peut utiliser un test d'hypothèse utilisée très répandu à condition Z suive une loi normale. Dans ce cas, considérons la variable statistique,  $\beta$ , définie comme (Haan, 1977):

$$\beta = \frac{\sqrt{n}(\bar{Z} - \mu_1)}{S_Z} \quad (V-44)$$

où  $\bar{Z}$  est l'estimation de l'espérance de Z,  $S_Z$  est l'estimation de l'écart-type de Z et n est le nombre de degrés de liberté. La variable statistique  $\beta$  suit la loi de Student,  $t(n-1)$ . On prend  $\mu_1=0$  selon l'hypothèse nulle et  $\alpha=0.05$  comme probabilité associée à l'intervalle de confiance et  $n=3$  en notant que Z est une fonction de trois paramètres A, B et C. On obtient donc  $|t_{1-\alpha/2, n-1}| = |t_{0.975, 2}| = 4.30$ . C'est-à-dire que l'on doit rejeter l'hypothèse nulle si  $|\beta| > 4.3$ .

#### V.3.4.4 Calcul

Pour les équations V-39 et V-40, les estimation de  $E(x_i)$  et de  $\text{COV}(x_i, x_j)$  dépendent des calages par épisode sur l'échantillon de calage. Pour les équations V-40 et V-41  $E(x_i)$  les estimations de  $E(x_i)$  et  $\text{COV}(x_i, x_j)$  se basent sur valeurs des paramètres calés par épisode sur l'échantillon de validation.

Les dérivées partielles sont calculées numériquement. On perturbe faiblement chaque paramètre l'un après l'autre autour de  $\underline{x}_0$  et on enregistre son effet. Puis,  $\frac{\Delta G}{\Delta x_i}$  est utilisé comme approximation de  $\frac{\partial G}{\partial x_i}$ . Pour plus de précision, on a utilisé la dérivation numérique centrée en prenant  $\Delta x_i = 0.05 x_{i0}$ ,

$$\left. \frac{\partial G}{\partial x_i} \right|_{\underline{x} = \underline{x}_0} \approx \frac{G(x_{i0} + \Delta x_i) - G(x_{i0} - \Delta x_i)}{2\Delta x_i} \quad (V-45)$$

On a voulu étudier la fiabilité du modèle sous trois aspects: la racine de la moyenne des carrés des erreurs, le volume de crue et la pointe de crue. On a alors trois sortes de fonctions  $G(x)$ :

$$G_1(\underline{x}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_m(i) - Q_c(i)]^2} \quad (V-46)$$

$$G_2(\underline{x}) = \sum_{i=1}^n [Q_m(i) - Q_c(i)] \quad (V-47)$$

$$G_3(\underline{x}) = Q_{mx} - Q_{cx} \quad (V-48)$$

#### V.3.4.5 Résultats

Le tableau V-4 nous donne les valeurs de  $\beta$  pour les 18 crues de l'échantillon de validation avec les trois variantes pour  $G(x)$ .

Tableau V-4 Valeurs de  $\beta$  pour chaque épisode de validation

N° d'épisode	$\beta$ selon $G_1$	$\beta$ selon $G_2$	$\beta$ selon $G_3$
6804	0.91	-1.76	-1.41
7010	0.16	0.75	0.80
7215	-0.20	0.41	0.45
7422	2.47	0.93	2.14
7632	-0.38	0.22	0.16
7835	0.37	-0.27	0.02
7113	0.94	0.62	0.89
7423	-1.55	2.88	1.03
7424	-0.14	0.14	0.41
7631	-0.52	0.66	0.70
7449	-0.43	0.26	1.16
7450	0.51	-1.35	-1.72
7151	-0.76	0.78	0.06
7352	0.01	0.37	0.88
7253	-0.37	0.29	1.59
6954	-1.34	7.42	2.02
7655	-0.30	6.05	3.48
7456	-0.22	0.20	0.44

Il y a 2 épisodes pour lesquels  $|\beta|$  dépasse 4.30: 6954 et 7655 du point de vue du volume de crue. Ils correspondent à une mauvaise simulation avec les paramètres globaux issus de l'échantillon de calage. Sur ces deux crues,  $E(L)$  n'est pas égal à  $E(R)$  statistiquement, c'est-à-dire que les paramètres calés globalement sur l'ensemble de l'échantillon de calage ne sont pas acceptés par ces deux épisodes selon le volume simulé. Généralement, on peut dire que ce modèle est fiable parce que presque tous les épisodes de l'échantillon de validation ont passé ce test.

Selon ces résultats, on peut dire que le modèle GR3 est robuste. Les paramètres globaux provenant de l'échantillon de calage sont fiables pour une prévision, car, généralement, ils ne sont pas très loin des meilleures valeurs. On peut penser qu'une méthode ayant la capacité de corriger faiblement les paramètres peut nous aider dans une prévision en temps réel avec le modèle GR3.

La démarche suivie ici est une nouvelle méthode pour apprécier la réaction d'un modèle de simulation à l'ensemble des paramètres du point de vue statistique (un outil statistique) et dynamique (passage de l'échantillon de calage à l'échantillon de validation). Cette analyse peut être vue comme un jugement relatif à un état du modèle différent de l'état optimal. On pense qu'elle est objective, car elle se place hors de l'état optimal qu'il est impossible d'atteindre pour le modèle. Il est très instructif de voir que les paramètres obtenus à partir de l'échantillon de calage ne sont pas très éloignés de leurs valeurs optimales calées sur les crues de l'échantillon test. Cela étant, pour la prévision, on pourra toujours partir des paramètres globaux et il serait déraisonnable de les corriger trop fortement. Les points faibles de cette analyse ont origine les hypothèses adoptées.

### **V.3.5. Analyse des contributions de chaque paramètre**

Il est intéressant d'apprécier l'importance de chaque paramètre. Comme sous-produit de la méthode précédente, les contributions de chaque paramètre permettent d'estimer leur rôle dans le modèle. Ce sont des informations importantes à la fois pour la simulation et pour la prévision.

Les équations V-39 et V-41 donnent justement les sommes des variances partielles et des covariances de L et de R comme égales aux variances des

paramètres avec un poids tenant compte de l'influence de chaque paramètre. L et R correspondent aux deux états intéressants: 1) le jeu des paramètres optimisés globalement et 2) les jeux des paramètres optimisés sur un épisode. On voit ici la contribution de chaque paramètre aux deux états et pour trois fonctions:  $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$  (cf. équations V-46, V-47 et V-48).

Bien évidemment, sur l'échantillon de calage, le jeu des paramètres globaux fournit de meilleurs résultats que les moyennes des jeux des paramètres calés sur les épisodes et ces derniers sont encore meilleurs que les paramètres globaux. Ces trois groupes de paramètres donnent trois simulations différentes.

Les coefficients de contribution des paramètres, CB, se déduisent des équations V-39 et V-41 comme suit:

$$CB_{i,j} = \frac{|C_i C_j \text{COV}(x_i, x_j)|}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |C_i C_j \text{COV}(x_i, x_j)|} \quad (\text{V-49})$$

Les tableaux V-5 et V-6 montrent la valeur de CB de chaque paramètre et de leurs combinaisons relativement à  $x_c$  et  $x_g$ .

Tableau V-5 Contributions des paramètres autour de  $X_c$ 

	$G_1$			$G_2$			$G_3$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
A	0.34			0.77			0.33		
B	0.09	0.34		0.06	0.15		0.06	0.32	
C	0.01	0.01	0.21	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.27

Tableau V-6 Contributions des paramètres autour de  $X_g$ 

	$G_1$			$G_2$			$G_3$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
A	0.12			0.80			0.47		
B	0.05	0.36		0.04	0.09		0.07	0.12	
C	0.04	0.07	0.36	0.02	0.01	0.04	0.06	0.02	0.26

Selon le tableau V-5, on peut constater: 1) les contributions mixtes sont relativement petites, cela concorde avec le test de corrélation; 2) les contributions des paramètres selon  $G_2$  sont différentes de celles selon  $G_1$  et  $G_3$ , c'est-à-dire que les paramètres jouent des rôles différents pour la simulation; 3) selon  $G_2$ , la simulation du volume de crue dépend beaucoup du paramètre A et ne dépend presque pas du paramètre C; 4) les paramètres A et

B jouent le même rôle pour  $G_1$  (racine de la moyenne des carrés des erreurs) et  $G_3$  (pointe de crue) et dans ces deux cas, ils sont un peu plus importants que C.

Selon le tableau V-6, qui présente le cas où les paramètres n'arrivent pas à leur valeurs optimales, on obtient la même conclusion sur  $G_2$ . Selon  $G_1$  et  $G_3$ , on peut dire dans ce cas que B et C sont plus importants que A pour la somme des carrés des erreurs et que A est le plus important pour la pointe de crue .

On peut conclure de cette analyse que les paramètres du modèle GR3 ont chacun leur rôle.

#### V.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté principalement l'analyse de fiabilité du modèle GR3 dans le cas où l'on vise les simulations sur un épisode de crue en utilisant d'une part les paramètres issus du calage global sur un échantillon de crues indépendant et d'autre part ceux issus du calage sur cet épisode. Globalement, les résultats de cette analyse nous ont confirmé de la pertinence d'une recherche sur l'ajustement des paramètres du modèle GR3 pour la prévision des crues en temps réel parce que l'on a constaté que les paramètres issus de ces deux types de calages sont assez voisins.

L'analyse de la contribution de chaque paramètre à différents critères de qualité nous a apporté une connaissance intéressante: chaque paramètre du modèle GR3 a son rôle propre. Il est logique de trouver que le paramètre lié au traitement de la pluie nette joue un rôle important pour la simulation du volume de crue. D'autre part, on constate une similarité entre la somme des carrés des erreurs et l'erreur sur la pointe de crue du point de vue de l'importance du rôle de chaque paramètre.

L'analyse des corrélations entre paramètres nous amène à conclure que les paramètres sont linéairement peu corrélés. C'est vraiment une caractéristique favorable pour le modèle GR3. Car cela facilite l'optimisation des paramètres, surtout en temps réel.



**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE L'ANNEXE-V**

Benjamin, J. R., and Cornell, C. A. (1970). *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, New York, N.Y.

Bras, R. L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1976). "Rainfall network design for runoff prediction." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 6, 1197-1208.

Davis, D. R., and Nnaji, S. (1982). "The information needed to evaluate the worth of uncertain information, predictions and forecasts." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 21, 461-470.

Dawdy, D.R., and O'Donnell, T. (1965). "Mathematical models of catchment behavior." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 91, No. HY4, 123-137.

Garen, D. C., and Burges S. J. (1981). "Approximate error bounds for simulated hydrographs." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. HY11, 1519-1534.

Haan, C.T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Ames, Iowa, Iowa State University Press.

Ibbitt, R. P., (1972). "Effects of random data errors on the parameter values for a conceptual model." *Water Resources Research*; Vol. 8, No. 1, 70-78.

Kuczera, G. (1988). "On the validity of first-order prediction limits for conceptual hydrologic models." *Journal of Hydrology*, vol. 103, 229-247.

Mack, R. (1971). "Planning on uncertainty." *Decision Making in Business and Industry*. Wiley-intersciences, New York.

McCuen, R.H., and Snyder, M.S., (1986). *Hydrological Modeling: Stochastic Methods and Applications*. Prentice-Hall, Englewood.

Melching, C. S., and Yen, B. C. (1986). "Slope Influence on storm sewer risk." *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*, B. C. Yen, ed., Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 79-89.

Melching, C. S., Yen, B. C., and Wenzel, H.G. Jr. (1991). "Output reliability as guide for selection of rainfall-runoff models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 3, 383-398.

Melching, C. S., Yen, B. C., and Wenzel, H.G.Jr., (1990). "A reliability estimation in modeling watershed runoff with uncertainties." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, 2275-2286.

Plate, E. J. (1986). "Reliability analysis in hydraulic Design." *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*, Yen B. C., ed., Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 37-47.

Schilling, W. and Fuchs, L. (1986). "Errors in stormwater modelling - A quantitative assessment." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 2, 111-123.

Tung, Y.-K., and Mays, L. W. (1981). "Risk models for flood levee design." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 4, 833-841.

Tung, Y.-K., and Mays, L.W. (1980). "Risk analysis for hydraulic design." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106, No. HY5, 893-913.

Wood, E. F. (1976). "An analysis of the effects of parameter uncertainty in deterministic hydrologic models." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 5, 925-932.

Yen, B. C., (1987). "Reliability of hydraulic structures possessing random loading and resistance." *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*, in *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*, L. Duckstein and E. Plate, eds., NATO ASI Series, E. M. Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, 95-113.

Yen, B. C., and Tang, W. H. (1977). "Reliability of flood warning. Stochastic Processes in Water Resources Engineering." *Proceedings of the 2nd International Symposium on Stochastic Hydraulics*, Lund, Sweden, Water Resources Publications Littleton, Colorado, 333-337.

Yen, B. C., Chang, S.-T. and Melching, C. S. (1986). "First-order reliability analysis." *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*, B. C. Yen, ed., Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 1-34.

Yevjevich, V. (1971). *Probability and Statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.





## **ANNEXE-VI**

### **Vérification de la méthodologie de la prévision des crues en temps réel sur l'Orgeval**

**VI-A Vérification sous la condition de pluies connues**

**VI-B Vérification sous la condition de pluies nulles**



## ANNEXE-VI-A

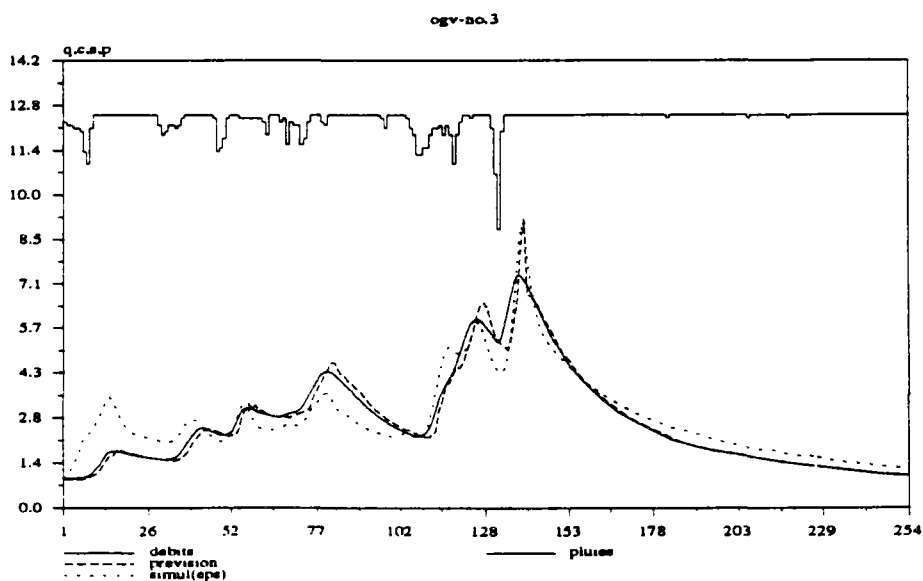
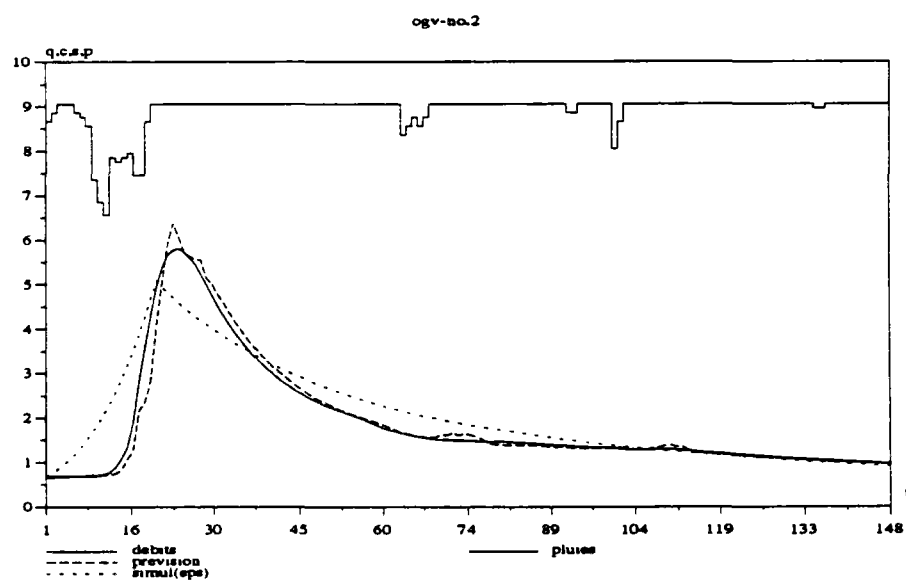
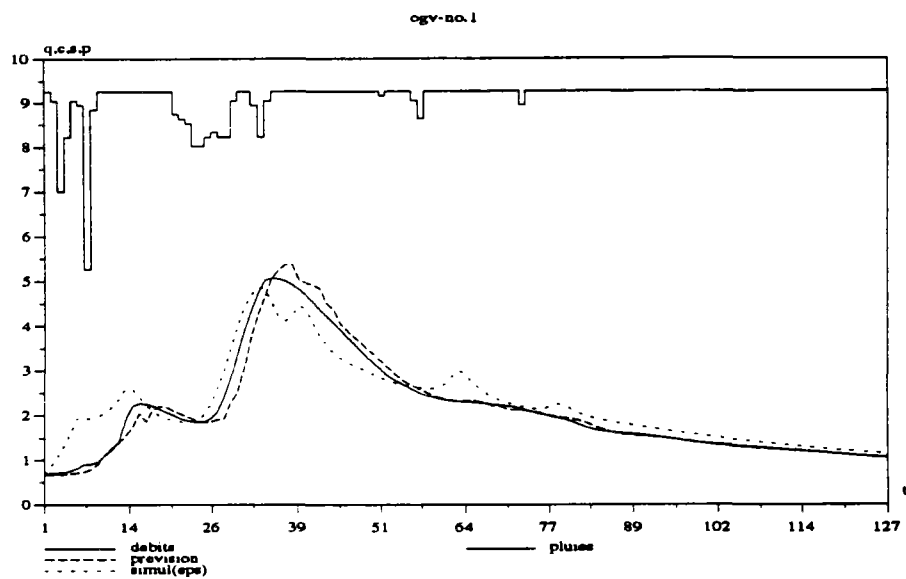
### Vérification sous la condition de pluies connues sur l'Orgeval

**Délais de prévision = 3 pas de temps ( $\Delta t=1$  heure)  
24 épisodes de crue (1973-1981)**

Valeurs d'indice de corrélation (IC) et de coefficient d'efficacité (CE)

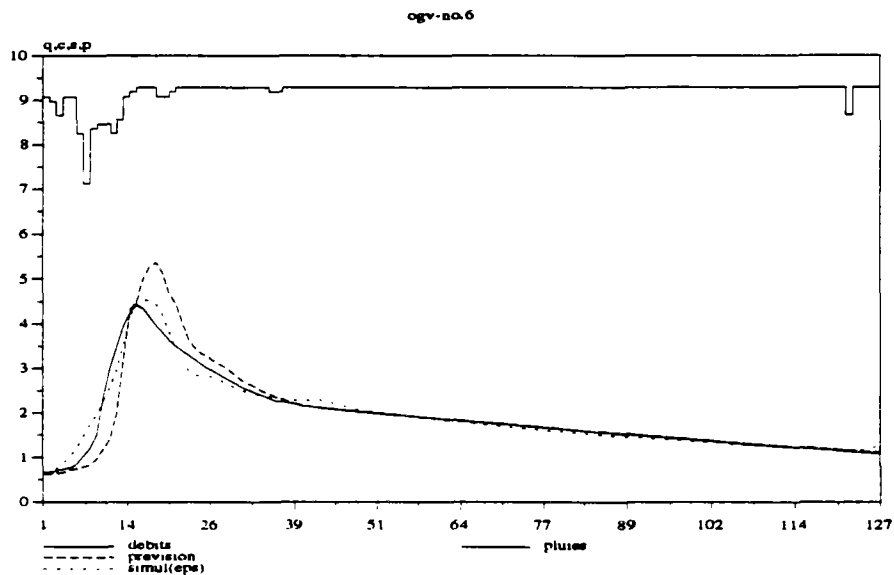
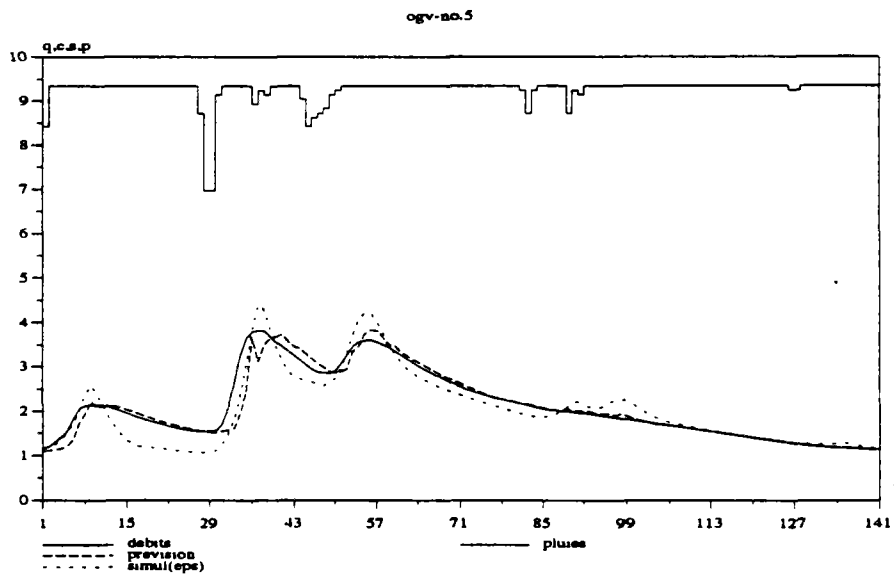
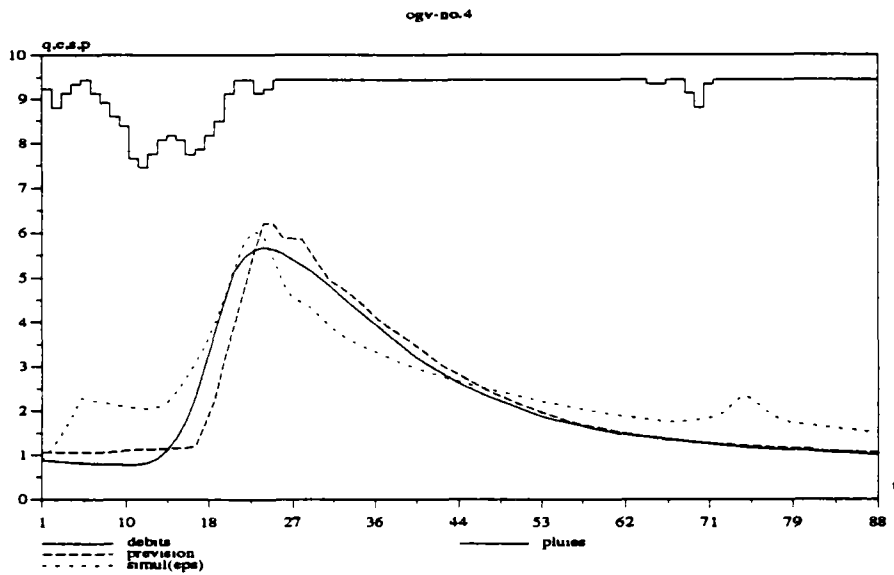
ordre	nom d'épisode	IC	CE
1	7401081	0.968	0.720
2	7401281	0.970	0.774
3	7403151	0.970	0.400
4	7410221	0.939	0.560
5	7412251	0.920	0.473
6	7501071	0.811	0.089
7	7501251	0.970	0.583
8	7505061	0.976	0.738
9	7512251	0.926	0.671
10	7601111	0.961	0.574
11	7702161	0.978	0.730
12	7704011	0.862	-0.006
13	7801241	0.966	0.604
14	7802021	0.966	0.507
15	7803211	0.958	0.527
16	7902021	0.935	0.291
17	7903111	0.958	0.670
18	7903251	0.898	0.475
19	8002041	0.939	0.291
20	8003141	0.965	0.376
21	8006131	0.889	0.225
22	8012181	0.923	0.436
23	8110151	0.885	0.192
24	8112161	0.942	0.577

### Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval (N°1 - N°3)

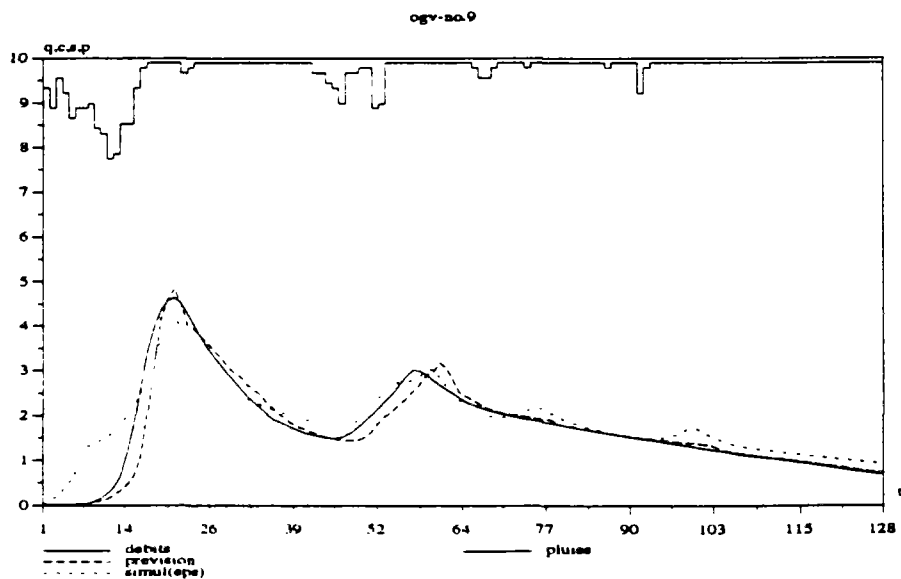
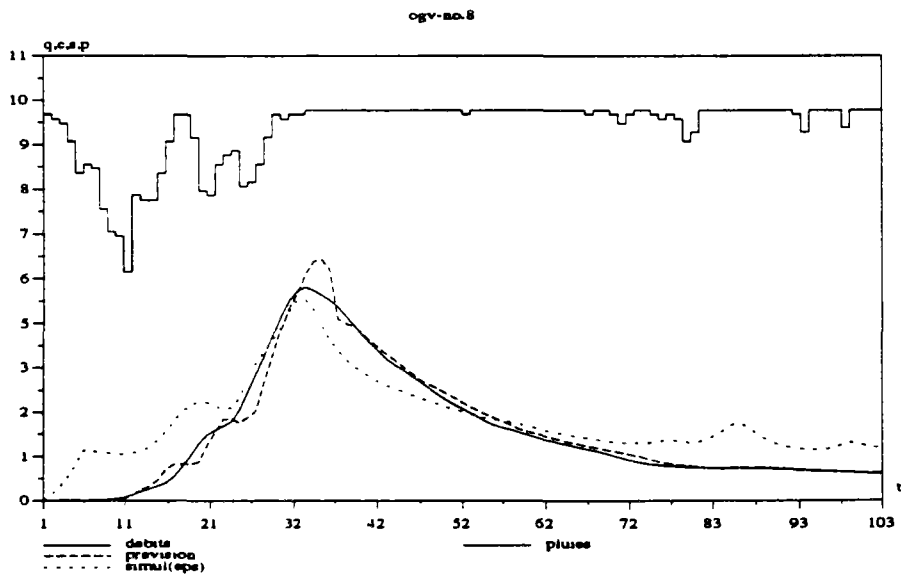
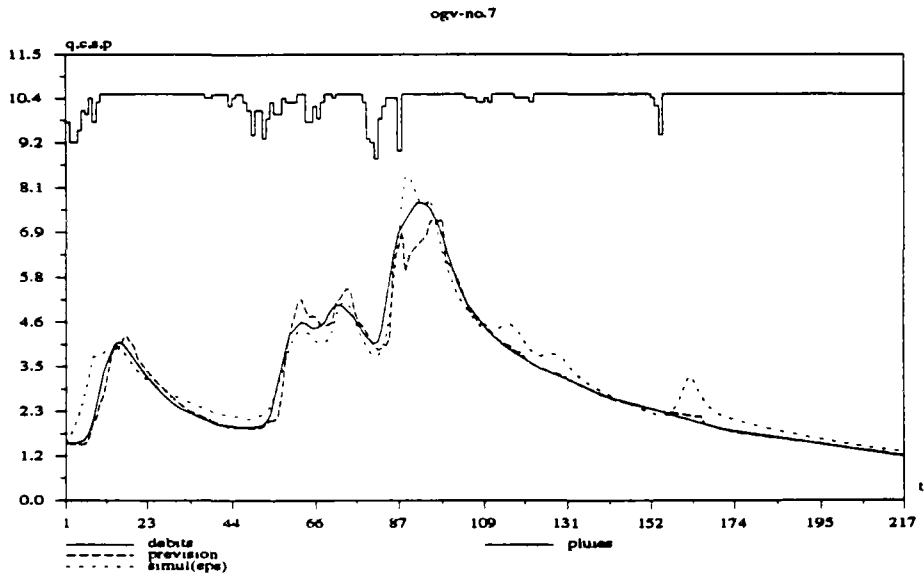




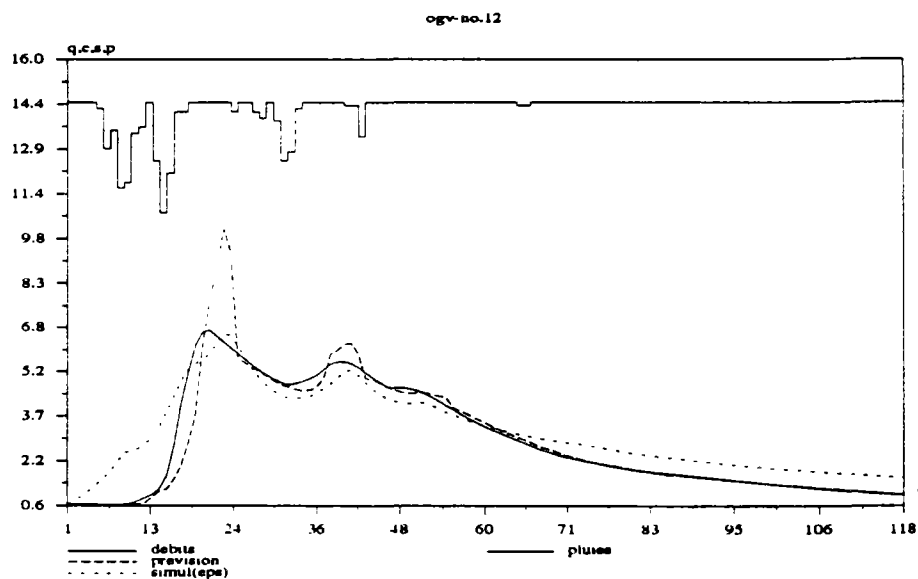
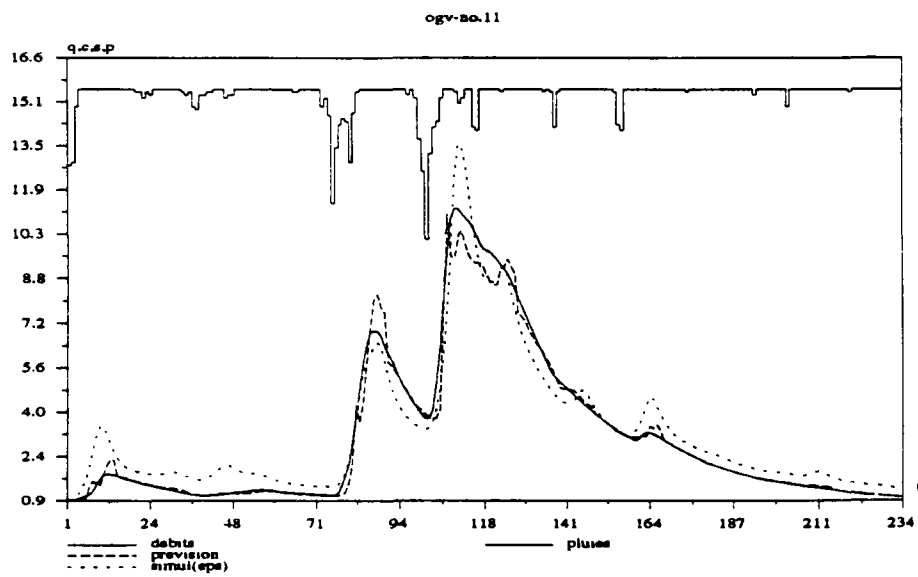
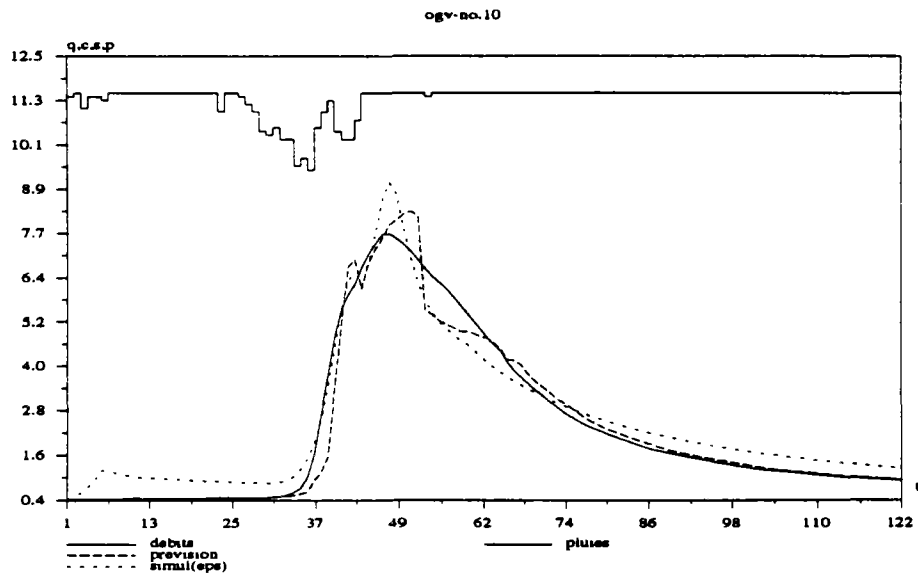
Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval  
(N°4 - N°6)



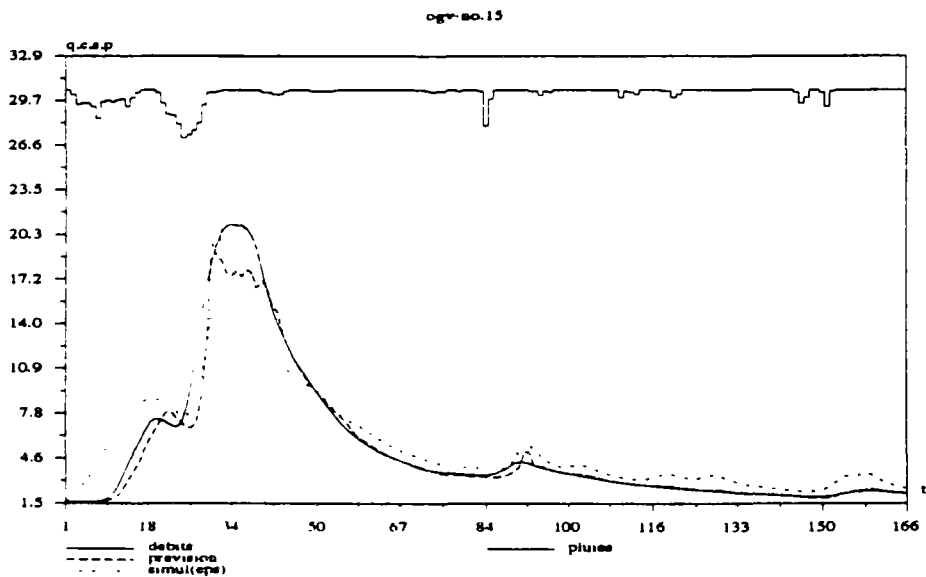
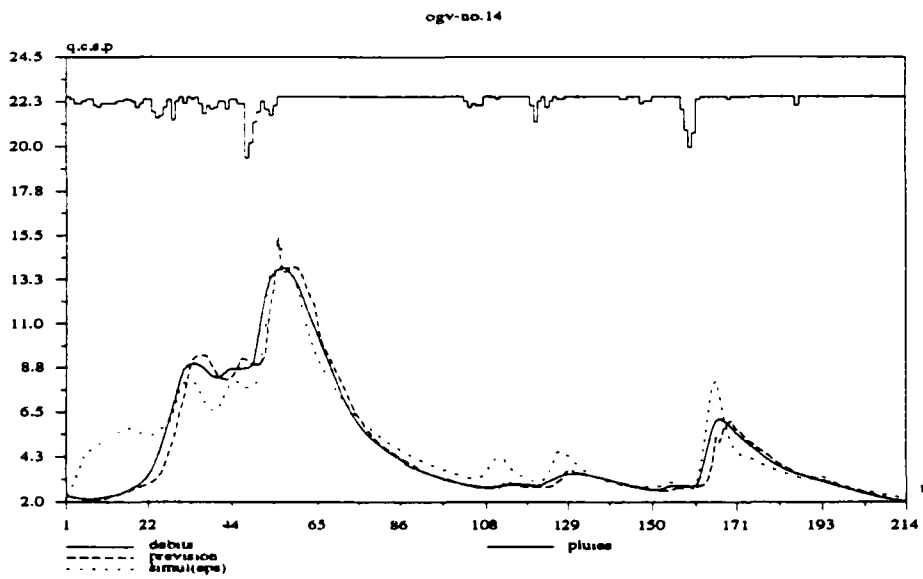
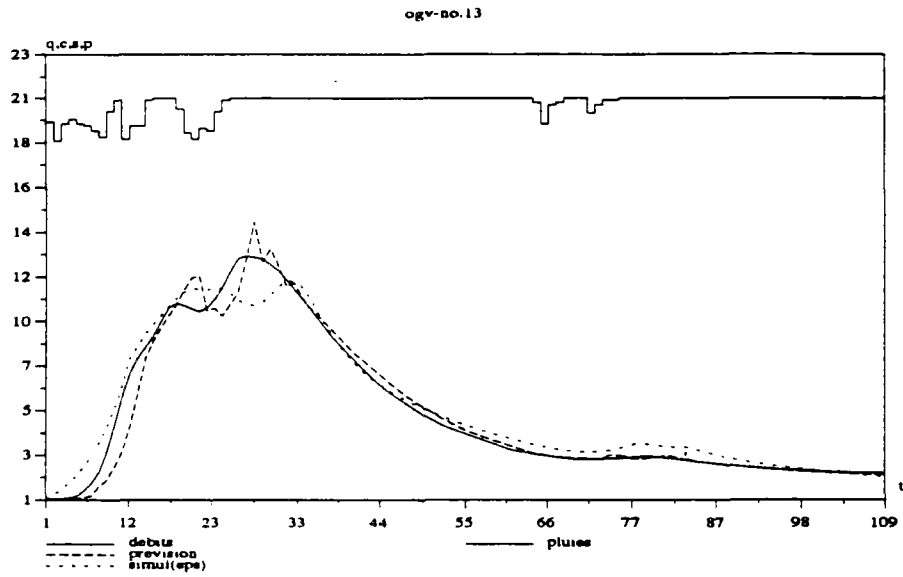
Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval  
(N°7 - N°9)



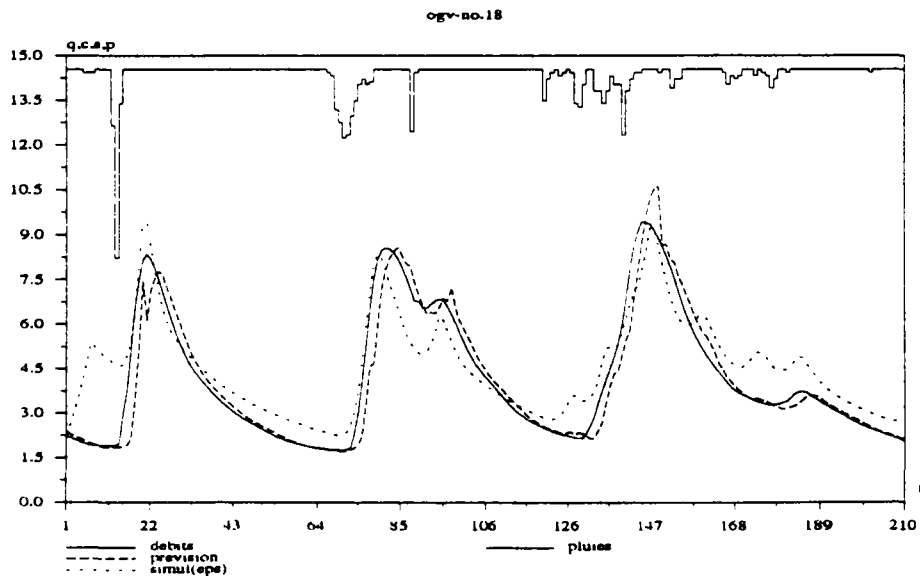
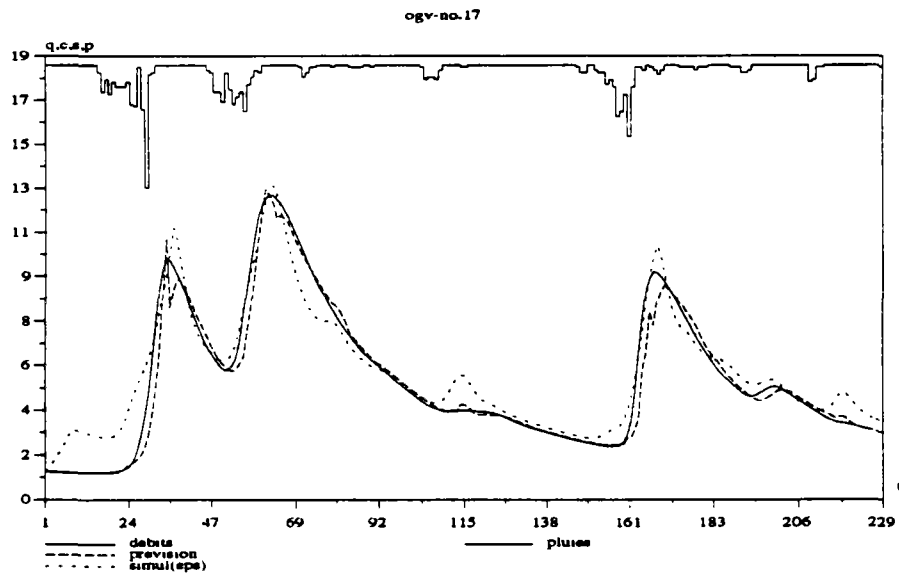
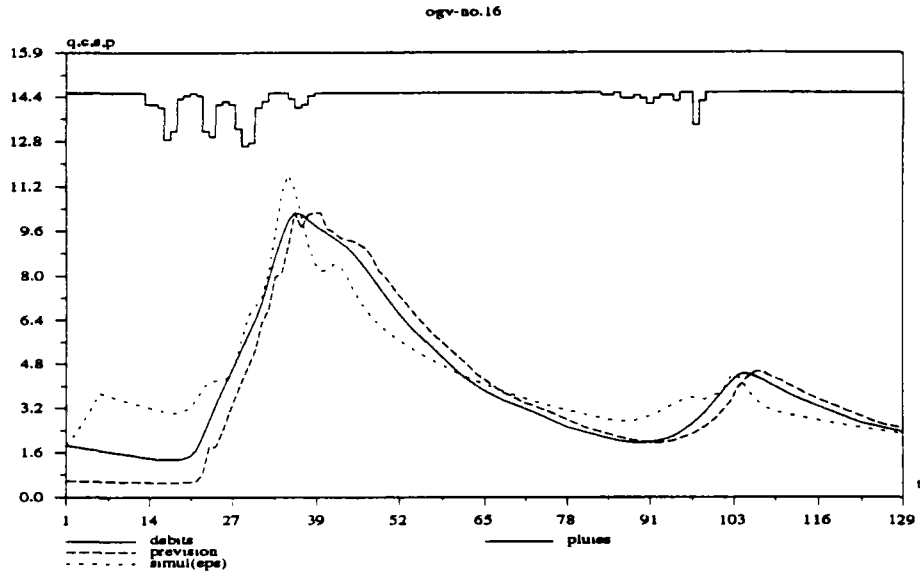
Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval  
(N°10 - N°12)



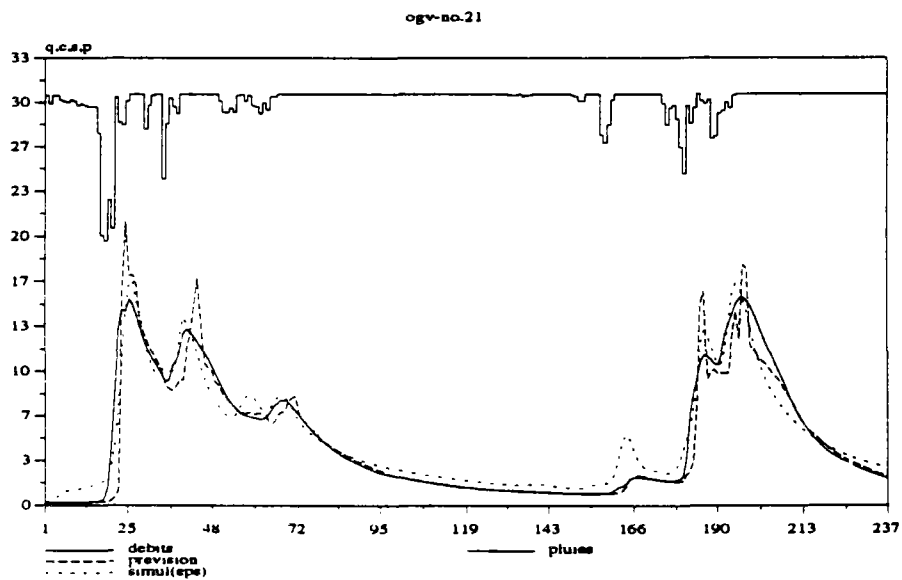
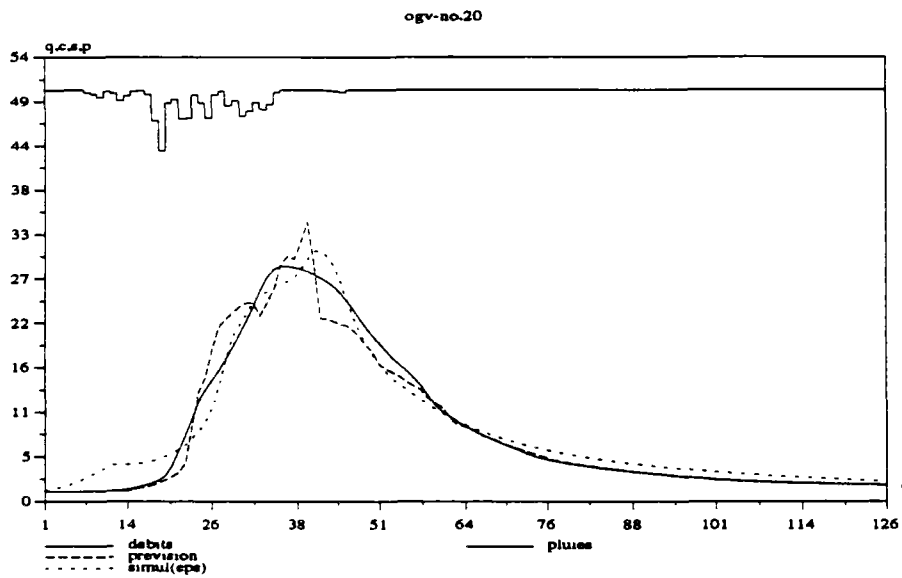
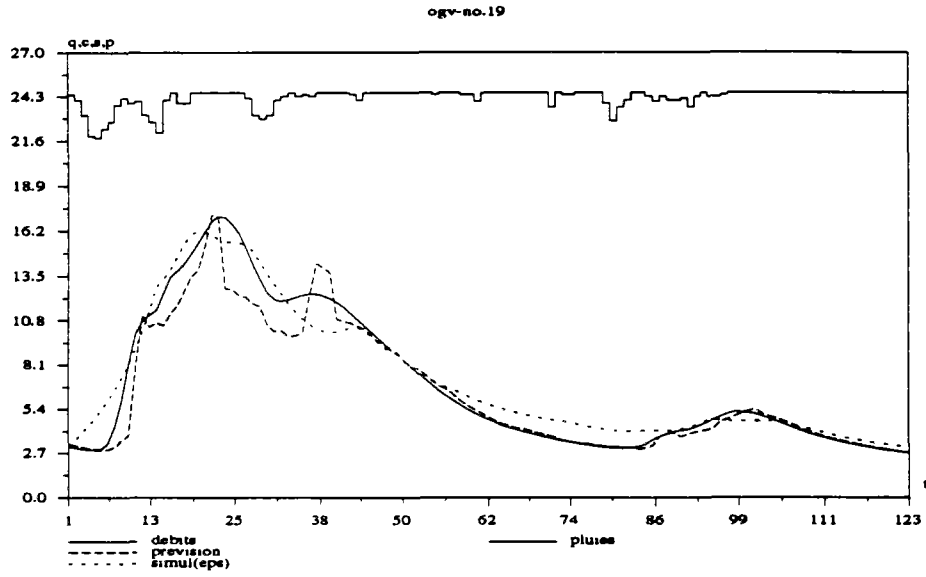
Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval  
(N°13 - N°15)



### Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval (N°16 - N°18)

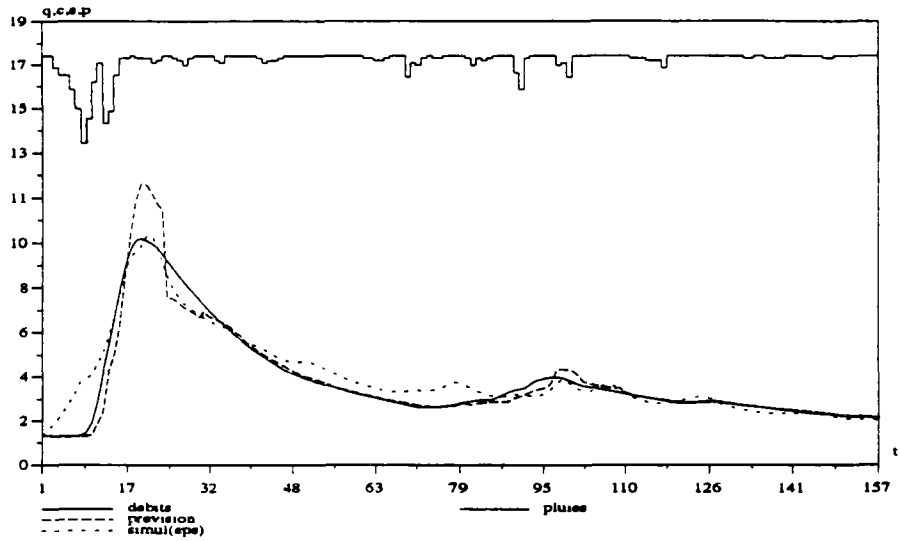


### Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval (N°19 - N°21)

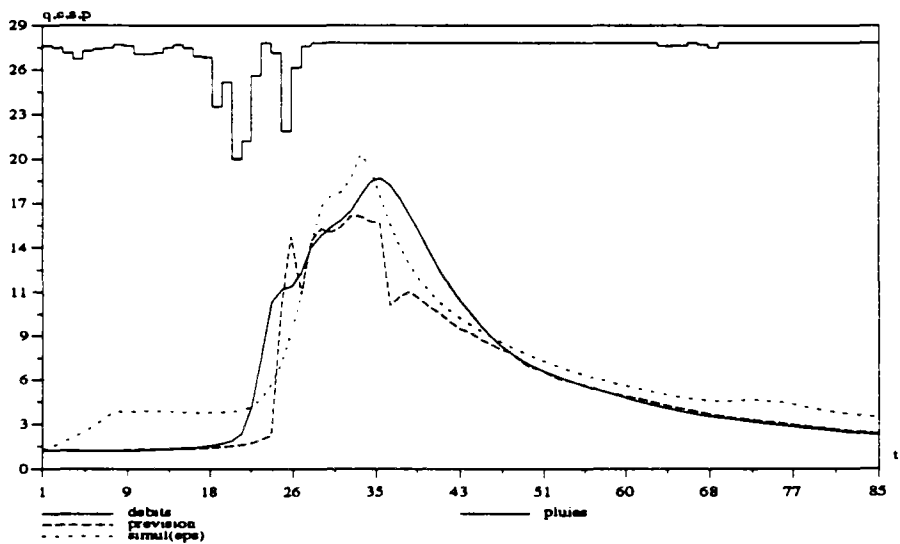


Prévision sous la condition de pluies connues à l'Orgeval  
(N°22 - N°24)

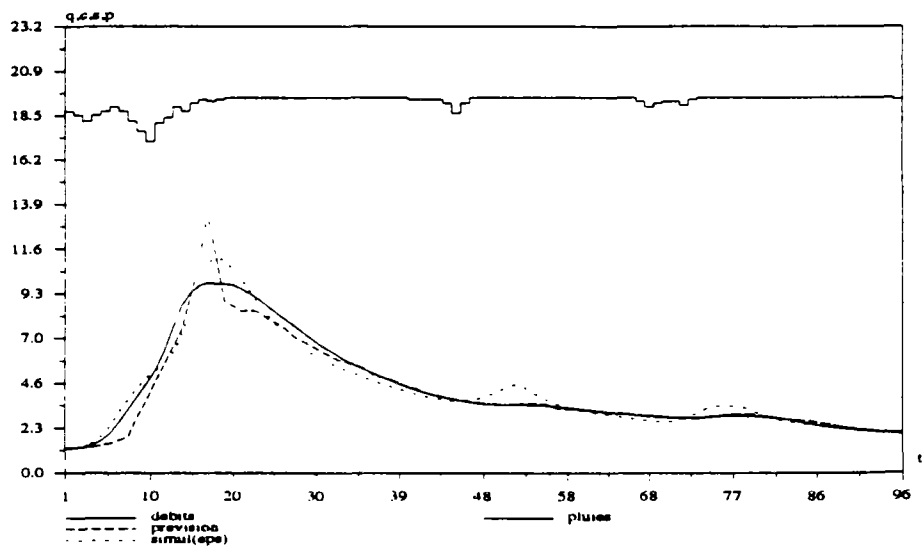
ogv-no.22



ogv-no.23



ogv-no.24



## ANNEXE-VI-B

### Vérification sous la condition de pluies nulles sur l'Orgeval

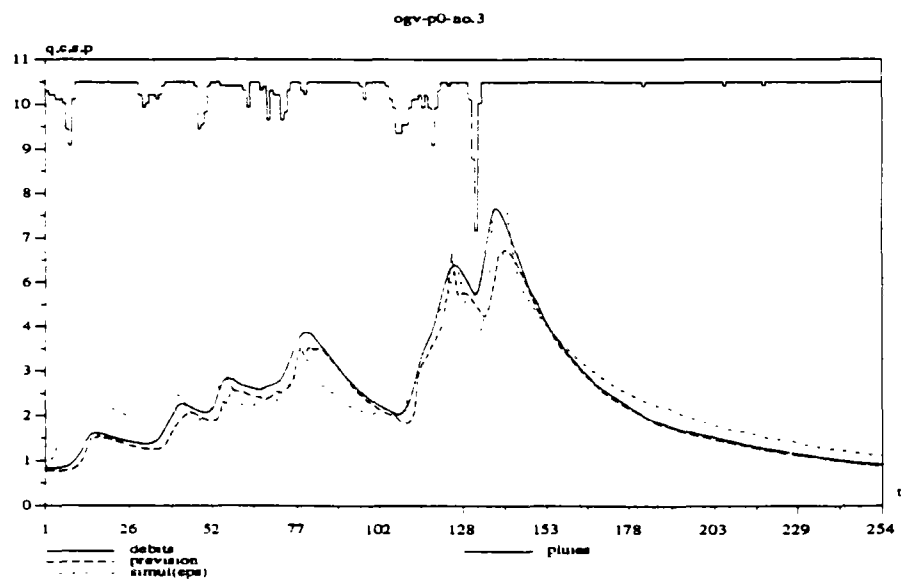
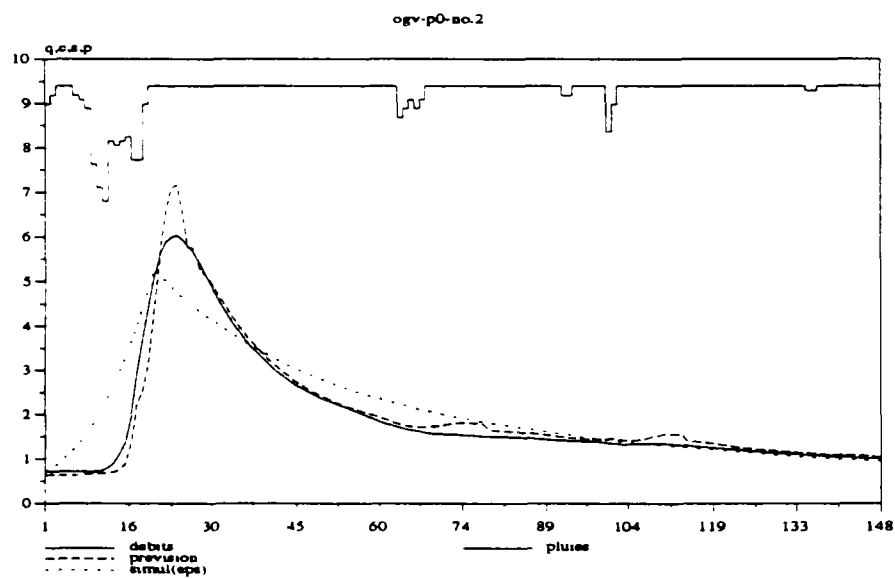
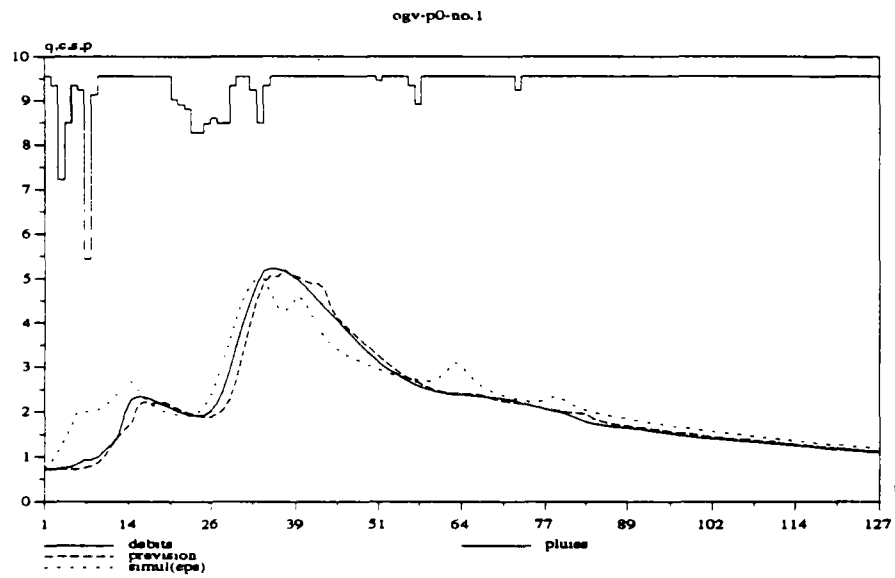
Délais de prévision = 3 pas de temps ( $\Delta t = 1$  heure)  
24 épisodes de crue (1973 - 1981)

Valeurs d'indice de corrélation (IC) et de coefficient d'efficacité (CE)

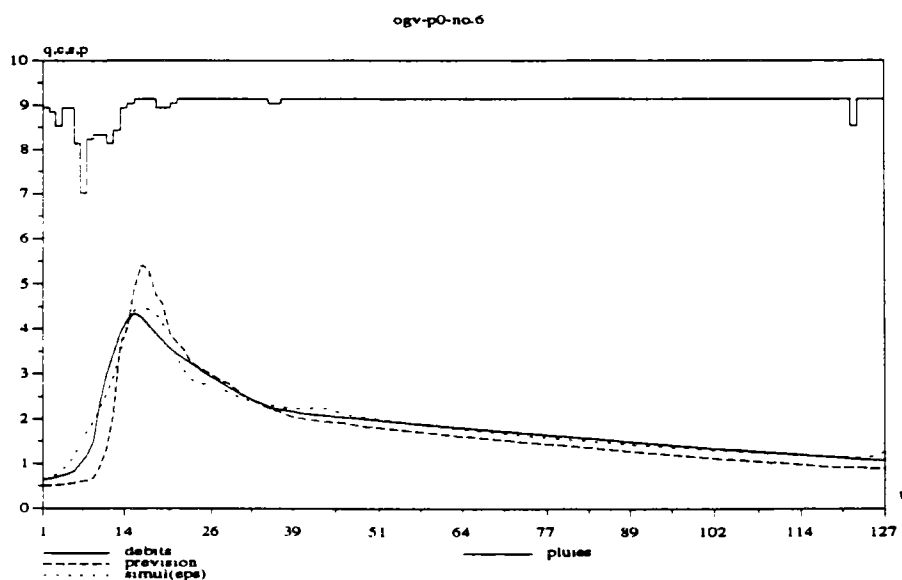
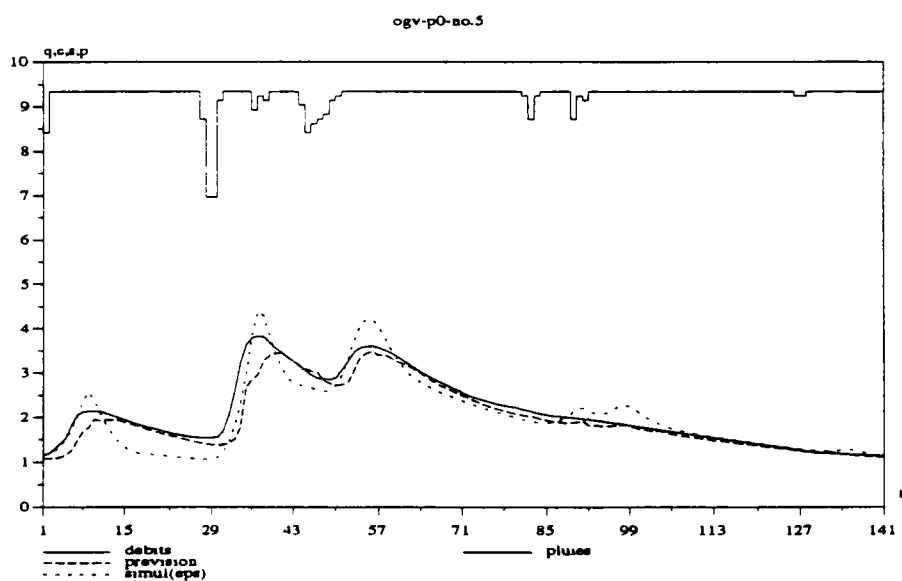
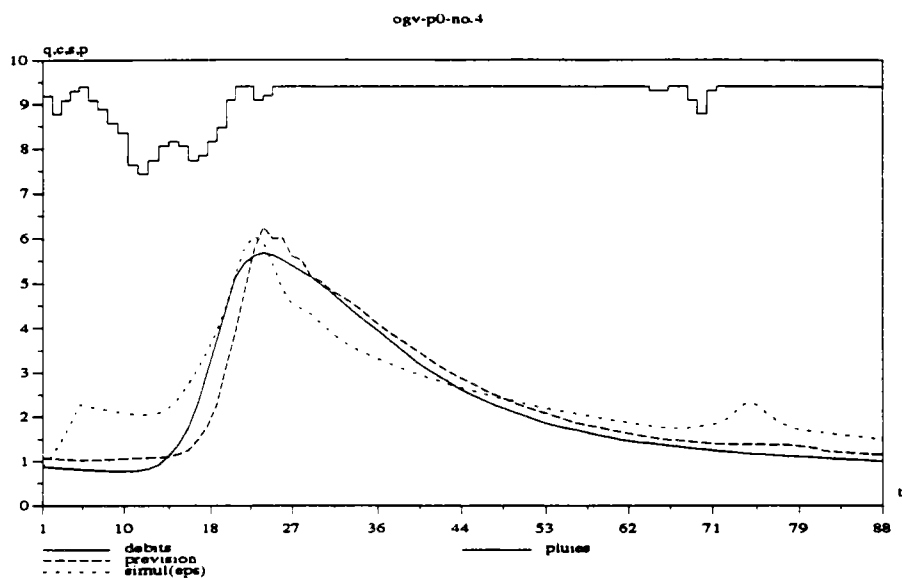
ordre	nom d'épisode	IC	CE
1	7401081	0.979	0.810
2	7401281	0.964	0.722
3	7403151	0.967	0.326
4	7410221	0.944	0.599
5	7412251	0.917	0.451
6	7501071	0.834	0.196
7	7501251	0.960	0.449
8	7505061	0.977	0.755
9	7512251	0.908	0.597
10	7601111	0.969	0.654
11	7702161	0.975	0.696
12	7704011	0.929	0.488
13	7801241	0.926	0.146
14	7802021	0.961	0.427
15	7803211	0.951	0.438
16	7902021	0.885	-0.354
17	7903111	0.861	-0.099
18	7903251	0.878	0.375
19	8002041	0.930	0.192
20	8003141	0.967	0.404
21	8006131	0.860	0.026
22	8012181	0.887	0.173
23	8110151	0.879	0.149
24	8112161	0.939	0.561



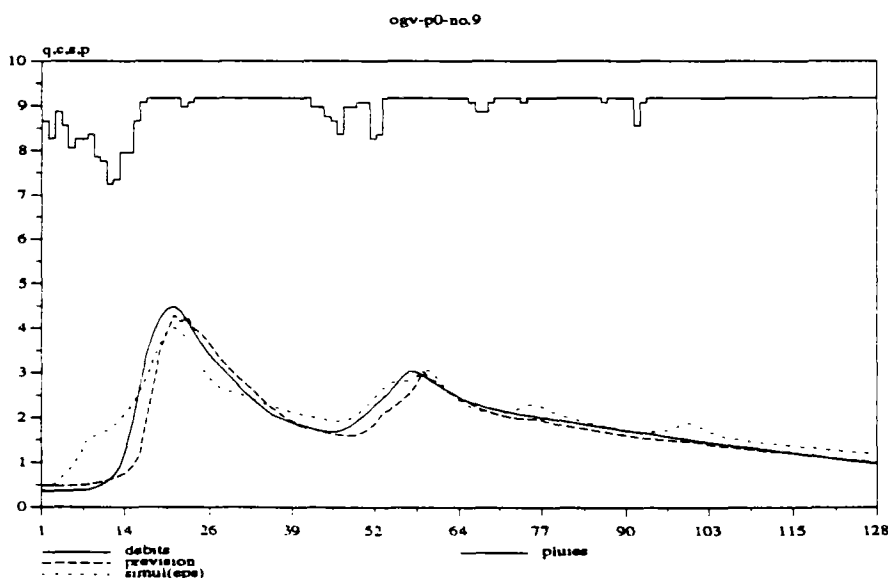
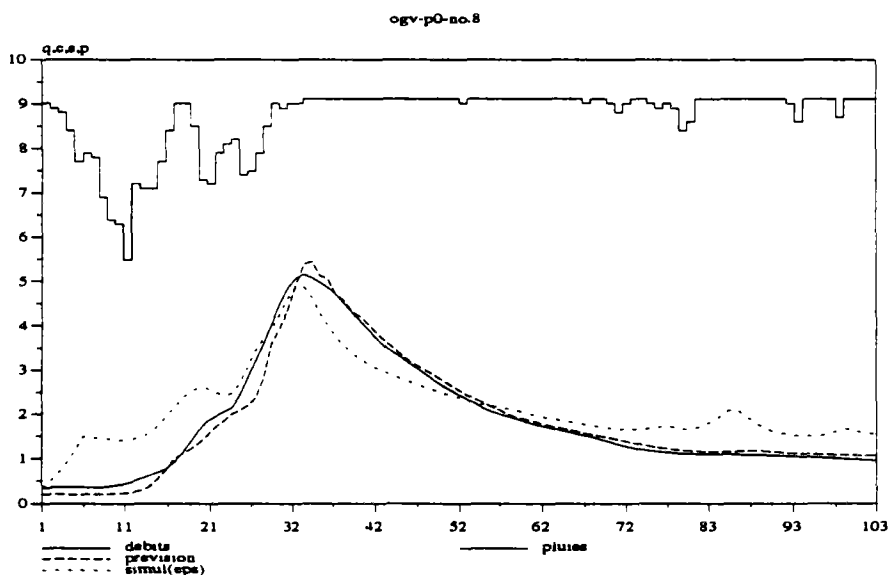
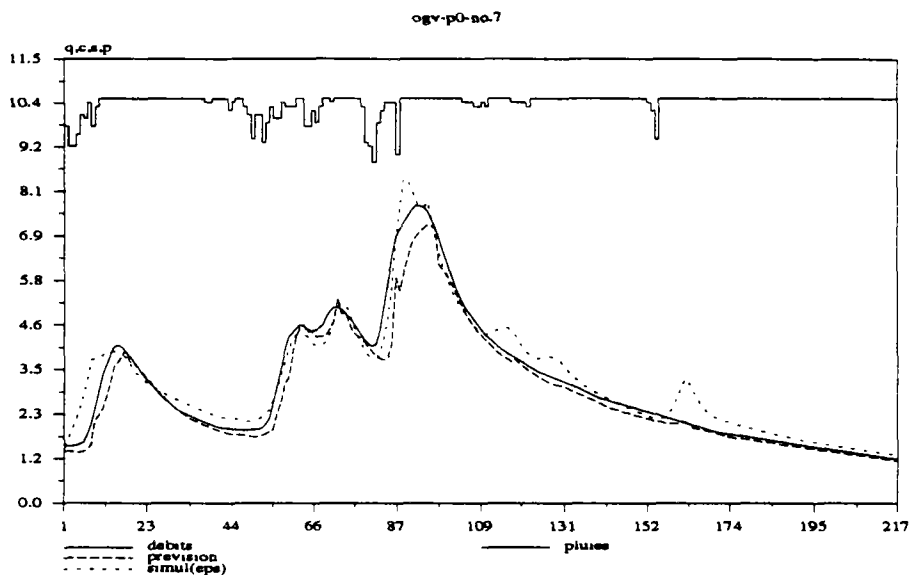
## Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval (N°1 - N°3)



### Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval (N°4 - N°6)

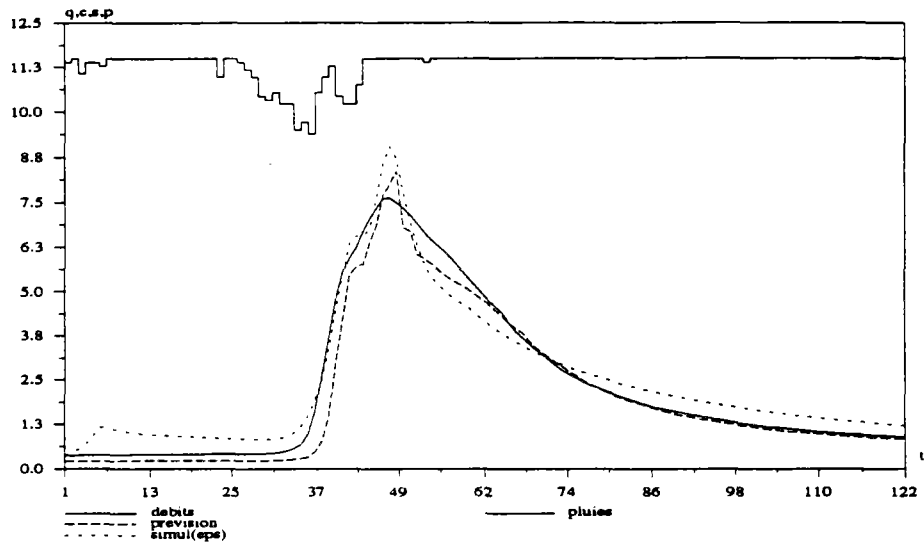


Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval  
(N°7 - N°9)

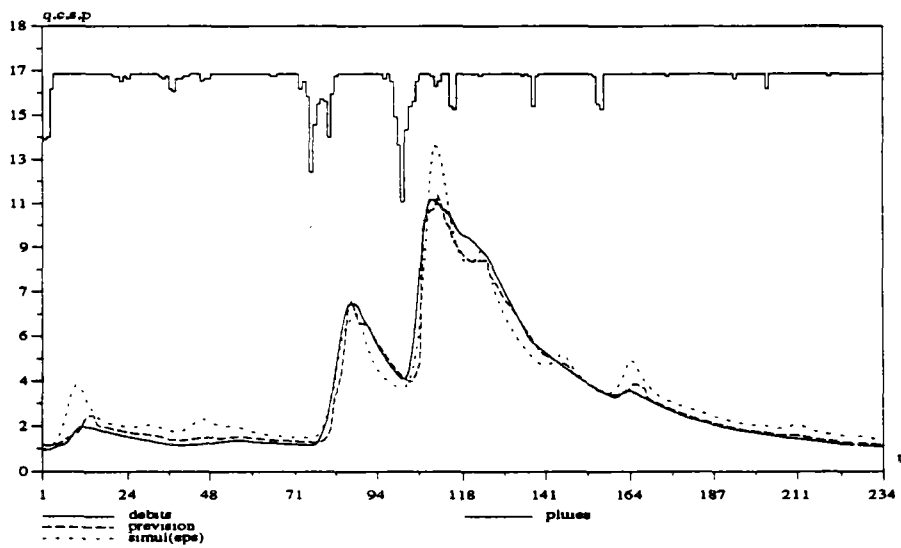


### Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval (N°10 - N°12)

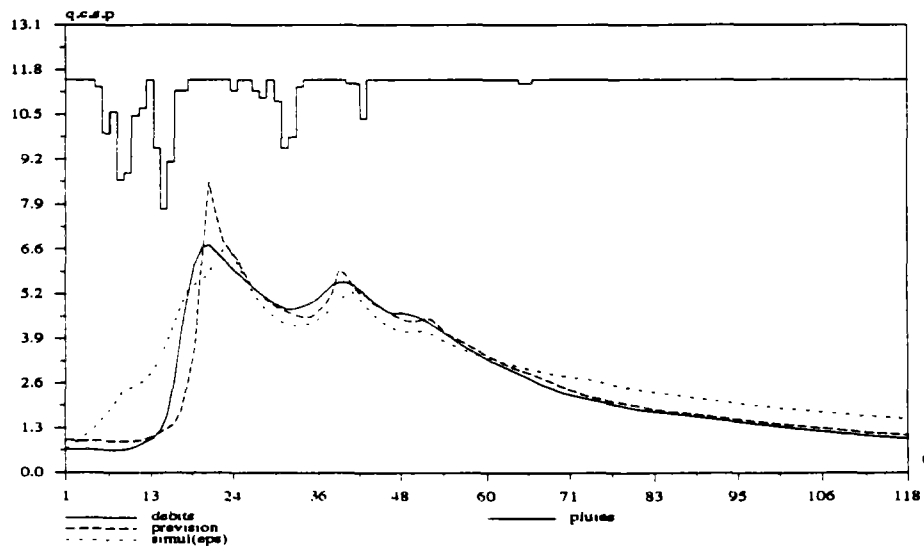
ogv-p0-no.10



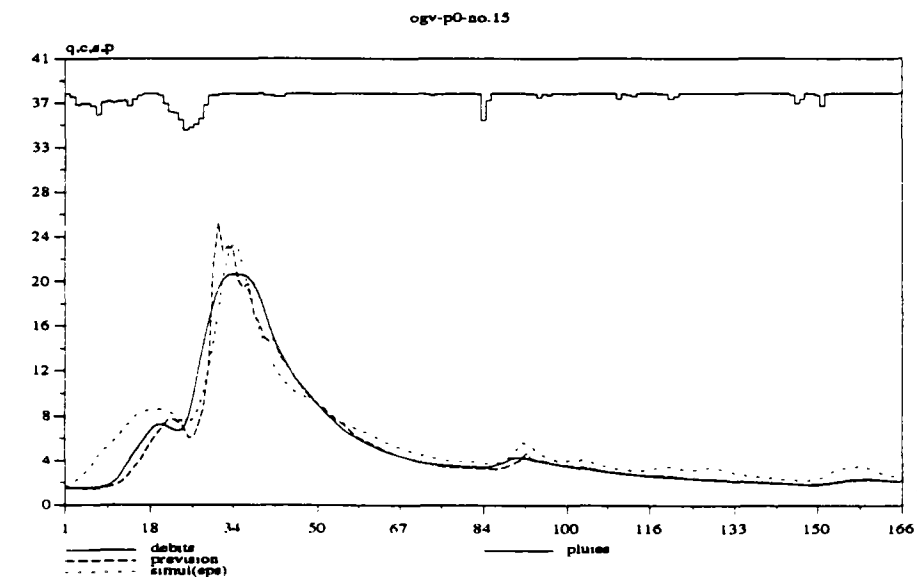
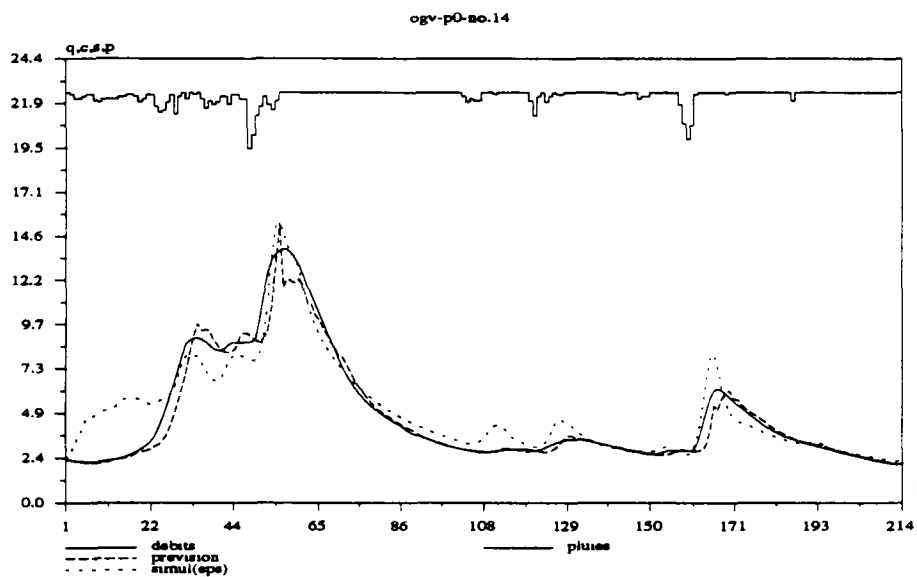
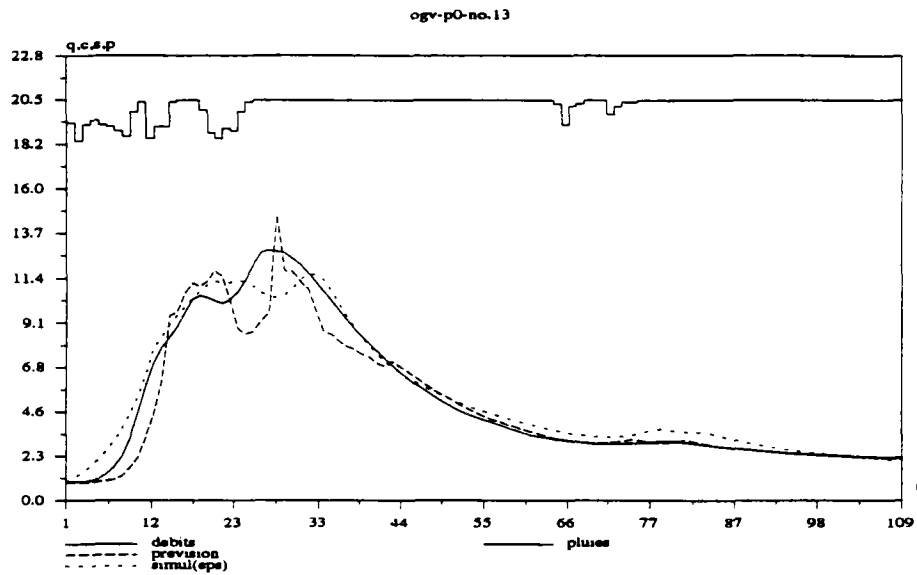
ogv-p0-no.11



ogv-p0-no.12

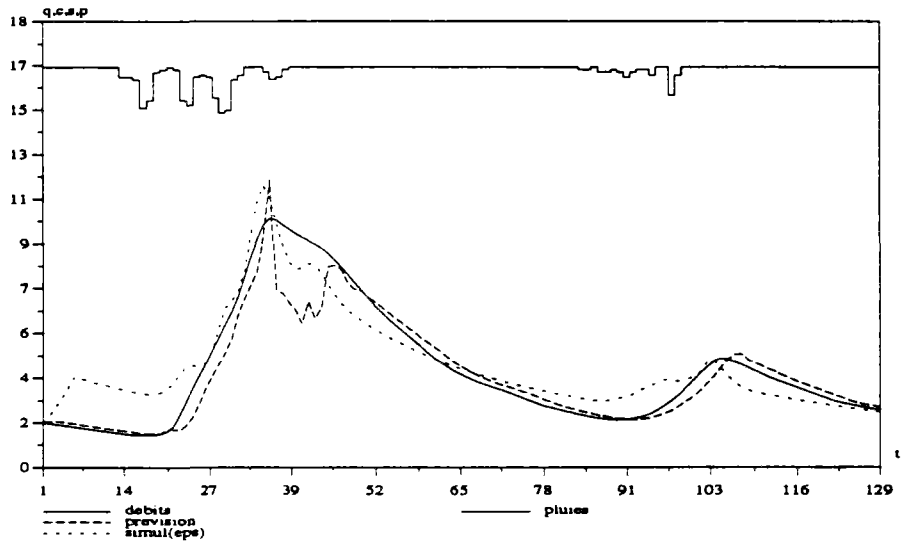


### Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval (N°13 - N°15)

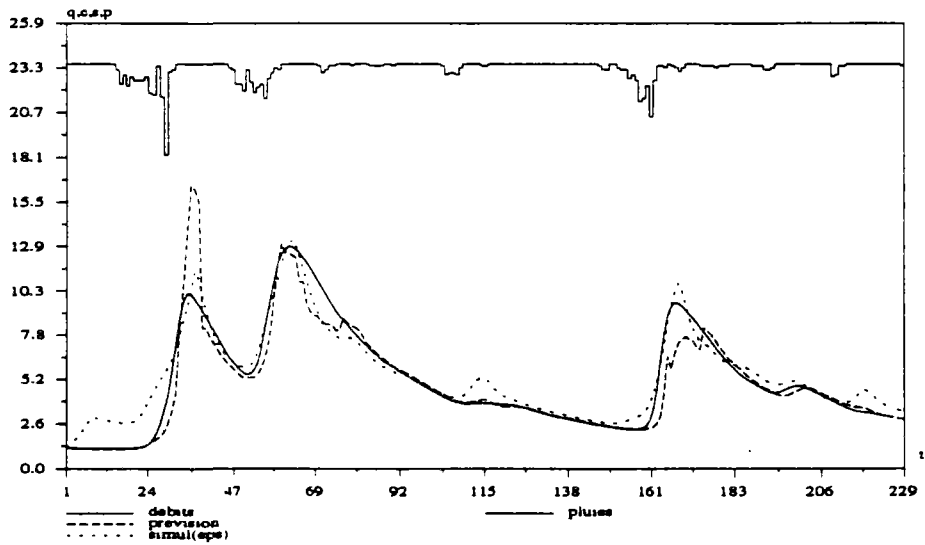


### Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval (N°16 - N°18)

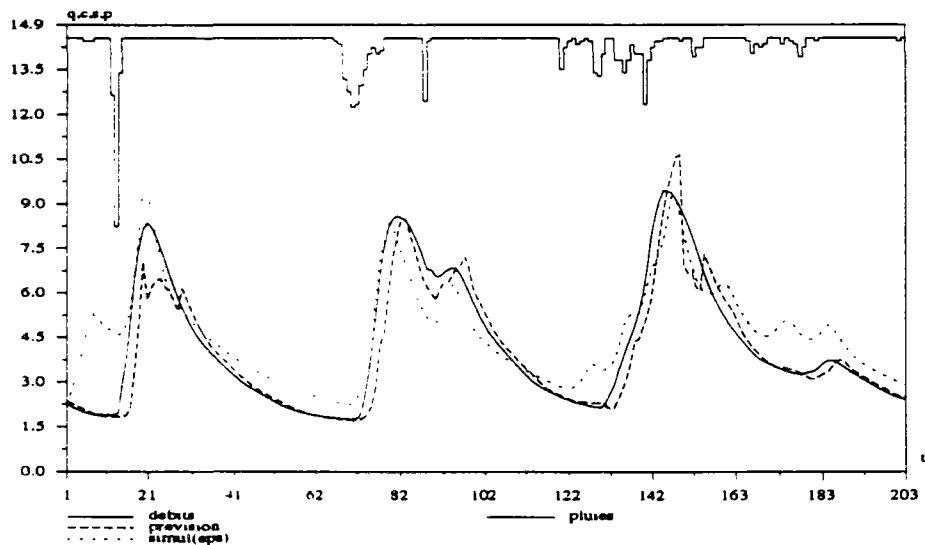
ogv-p0-no.16



ogv-p0-no.17

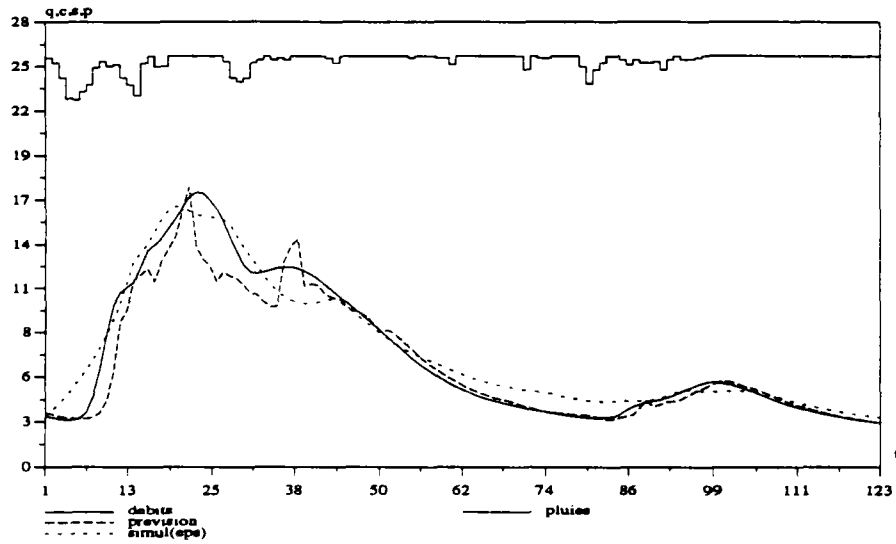


ogv-p0-no.18

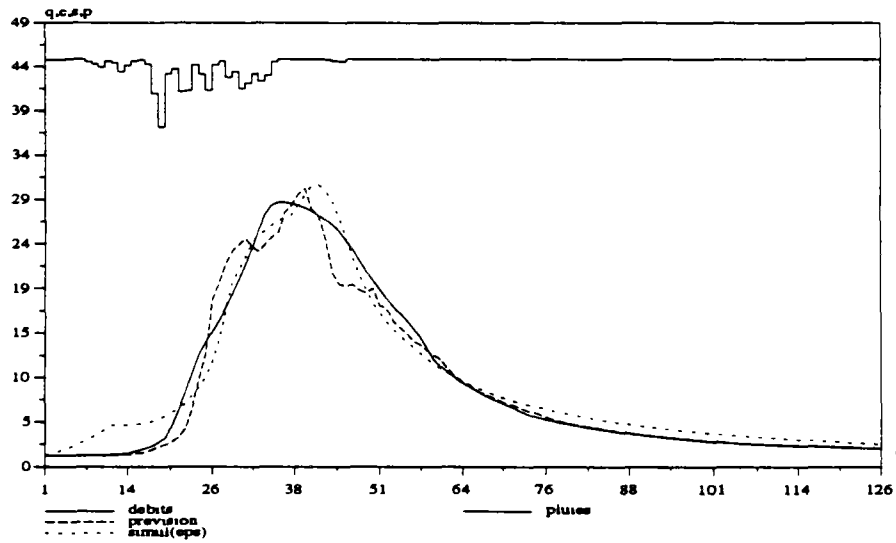


Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval  
(N°19 - N°21)

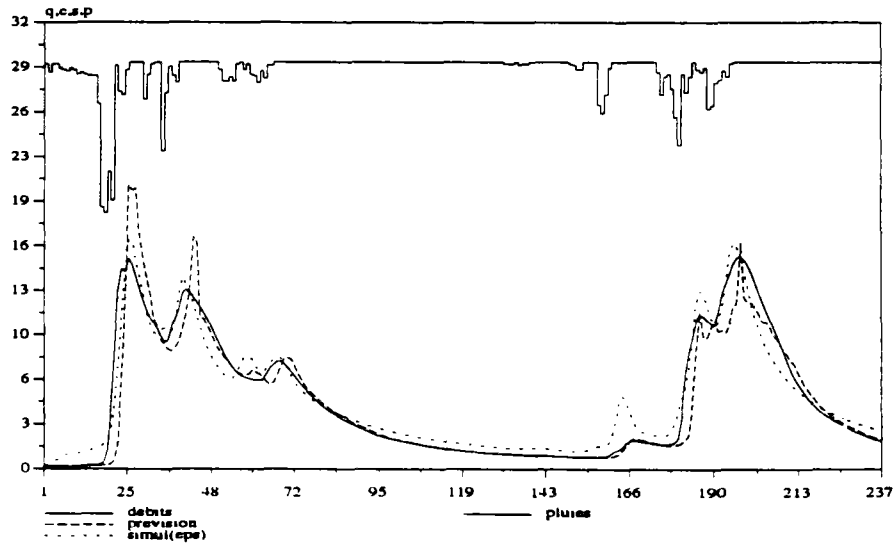
ogv-p0-no.19



ogv-p0-no.20

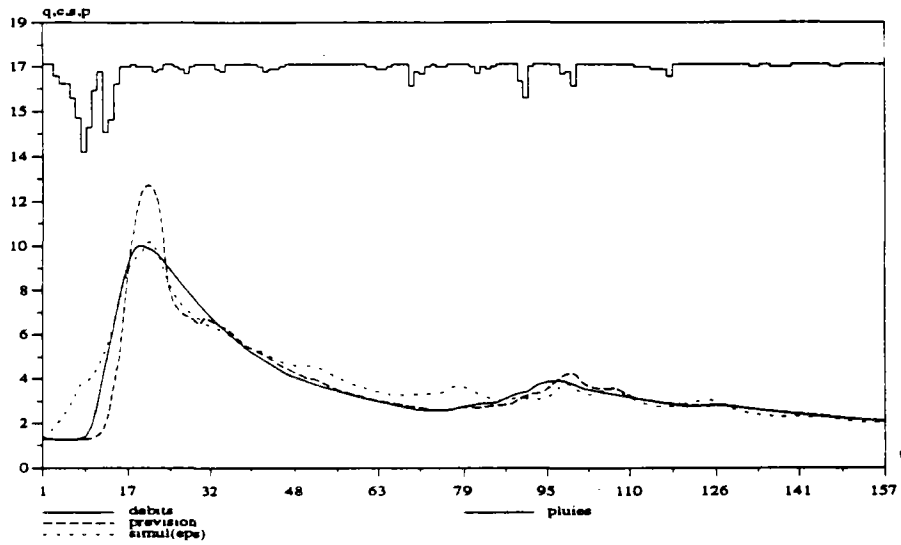


ogv-p0-no.21

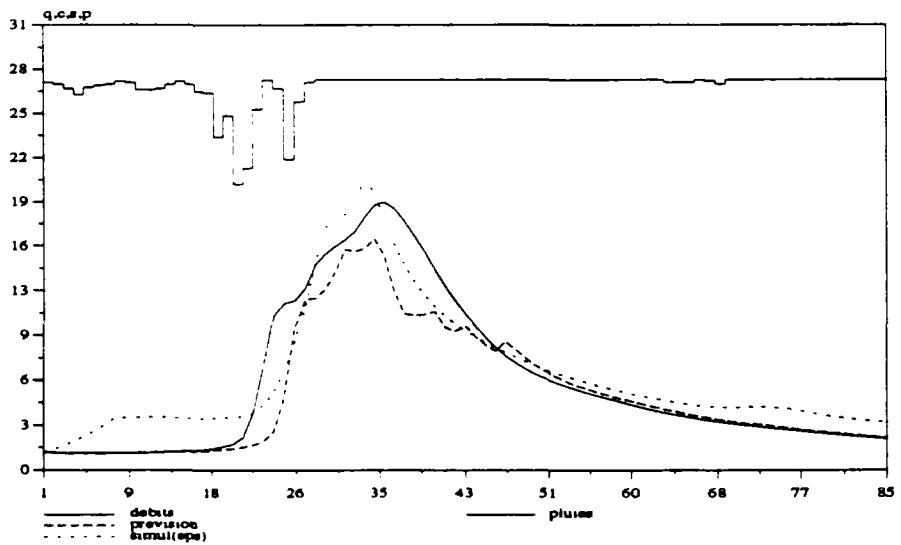


### Prévision sous la condition de pluies nulles à l'Orgeval (N°22 - N°24)

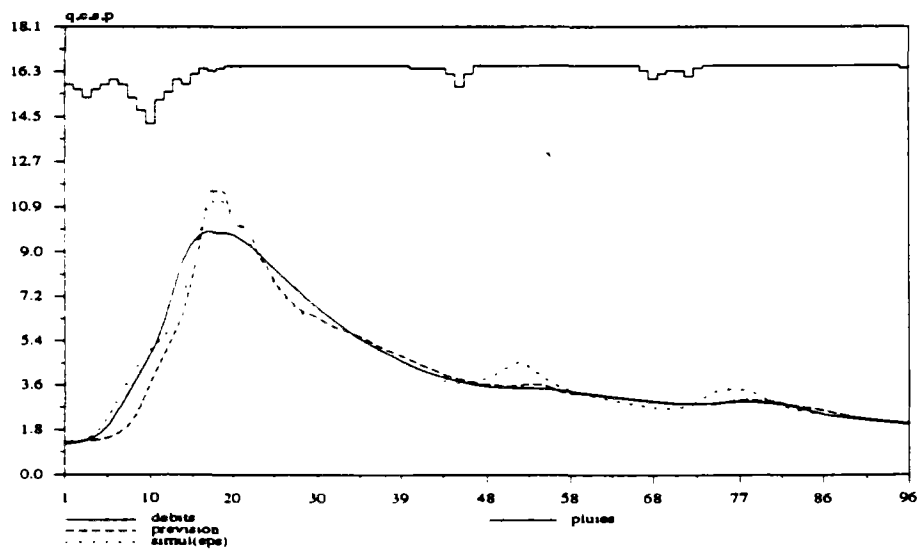
ogv-p0-no.22



ogv-p0-no.23



ogv-p0-no.24









## **ANNEXE-VII**

### **Vérification de la méthodologie de la prévision des crues en temps réel sur le Réal Collobrier**

**VII-A Vérification sous la condition de pluies connues  
sur le Réal Collobrier**

**VII-B Vérification sous la condition de pluies nulles  
sur le Réal Collobrier**



## ANNEXE-VII-A

### Vérification sous la condition de pluies connues sur le Réal Collobrier

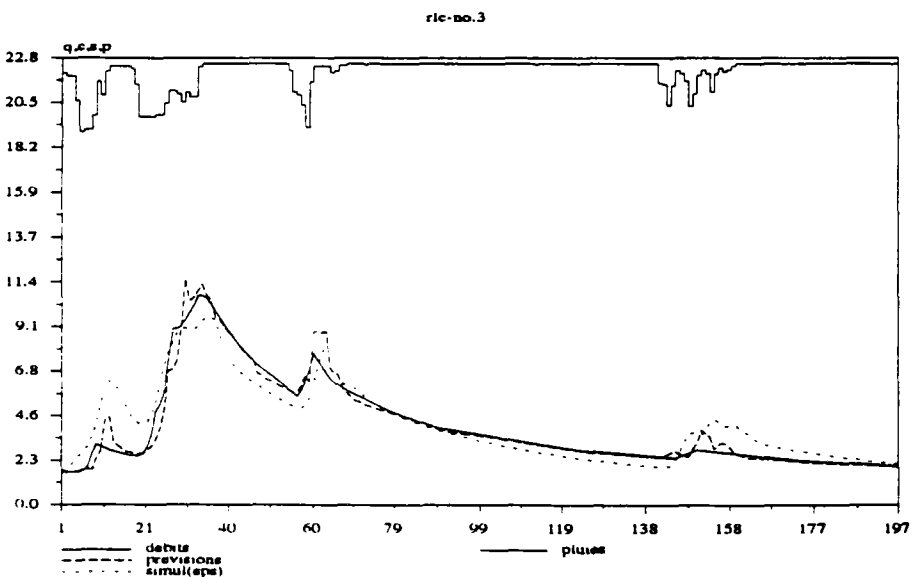
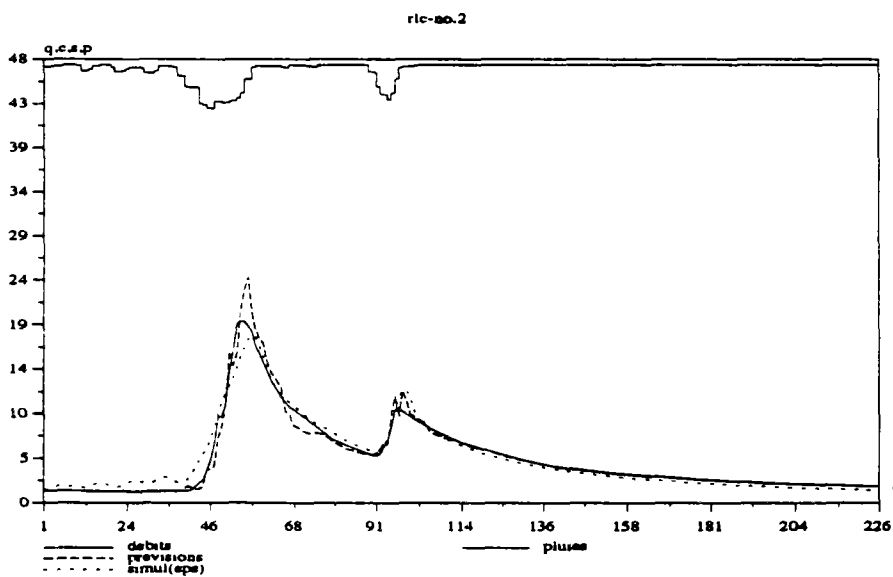
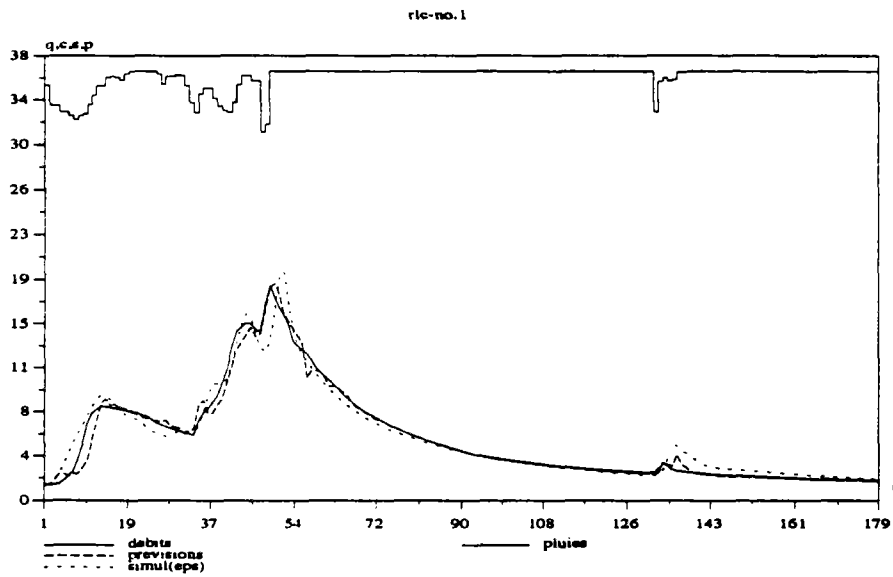
Délais de prévision = 3 pas de temps ( $\Delta t=1$  heure)  
12 épisodes de crue (1969-1972)

Valeurs d'indice de corrélation (IC) et de coefficient d'efficacité (CE)

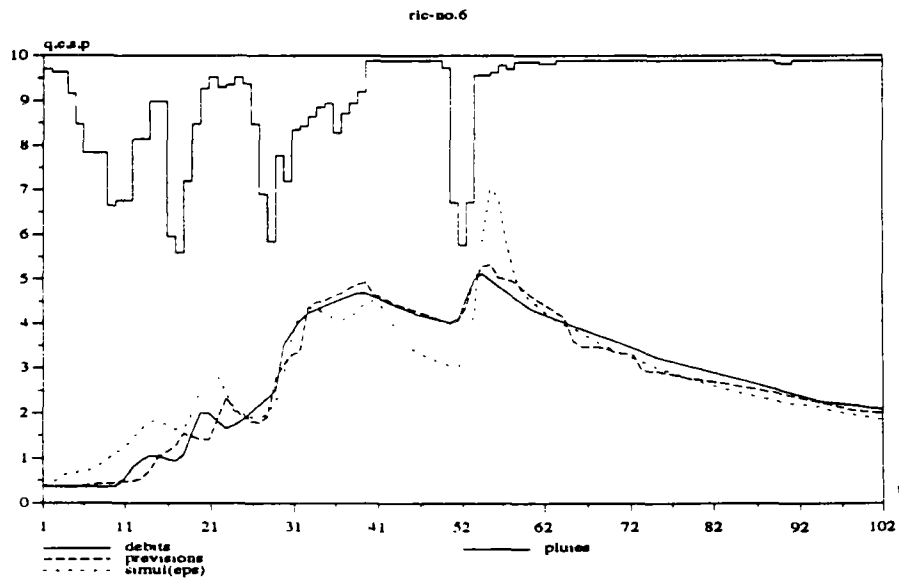
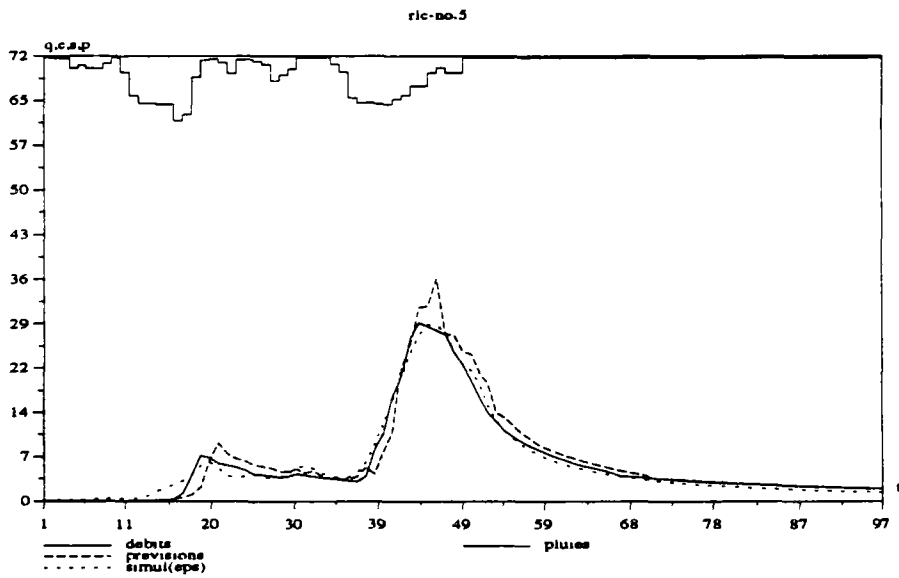
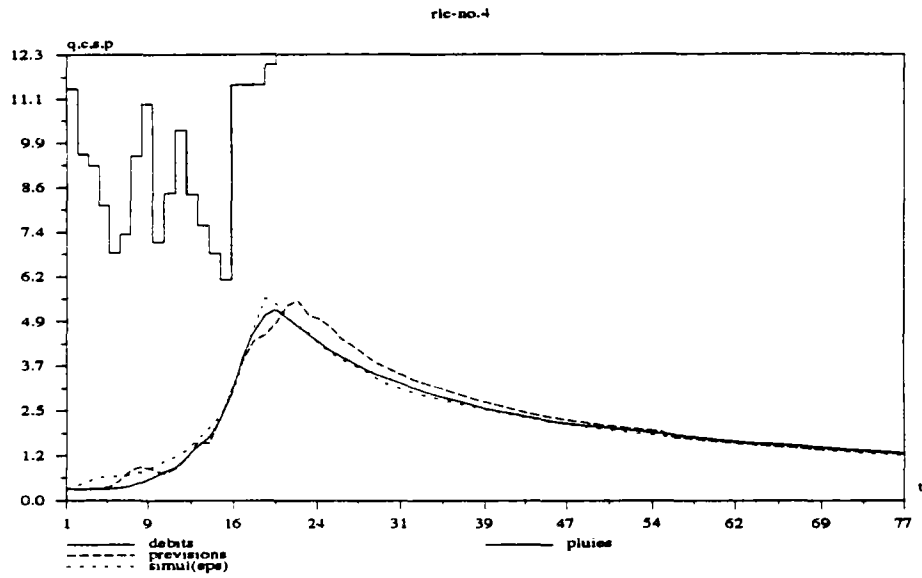
ordre	nom d'épisode	IC	CE
1	6902211	0.932	0.761
2	6903051	0.899	0.707
3	6903141	0.854	0.493
4	6905061	0.936	0.868
5	6912311	0.887	0.787
6	7003151	0.895	0.640
7	7012271	0.954	0.907
8	7103211	0.900	0.532
9	7202041	0.658	0.209
10	7203051	-0.469	-1.054
11	7203131	0.833	0.631
12	7212281	0.620	-0.484



### Prévision sous la condition de pluies connues au Réal Collobrier (N°1 - N°3)

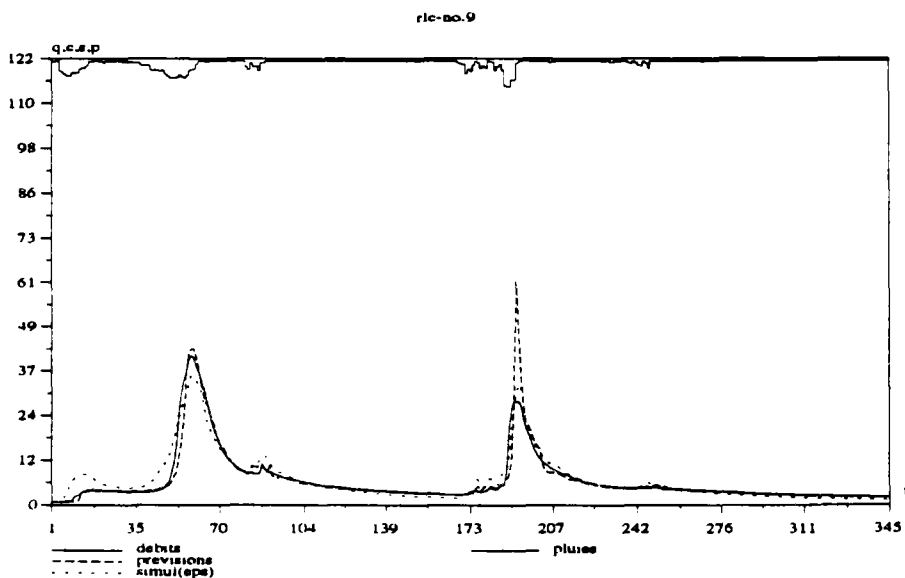
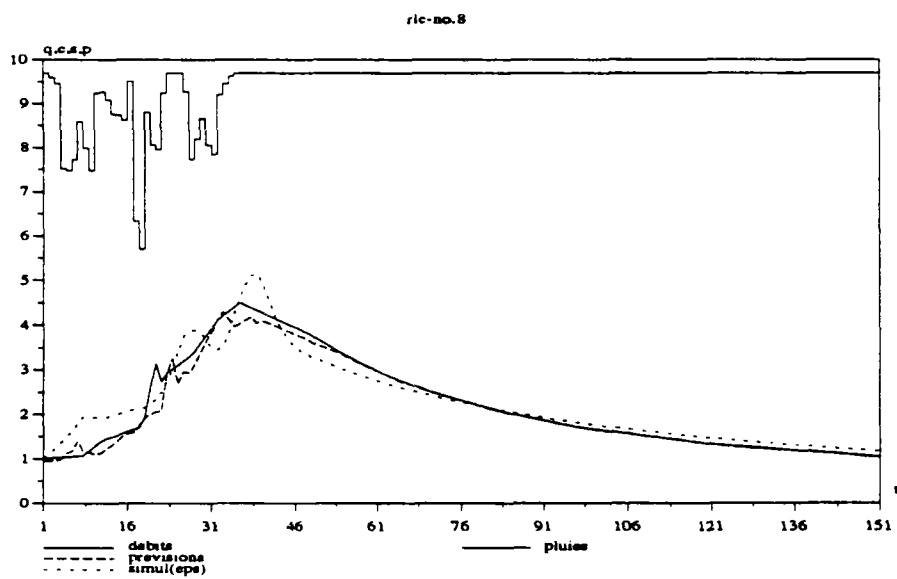
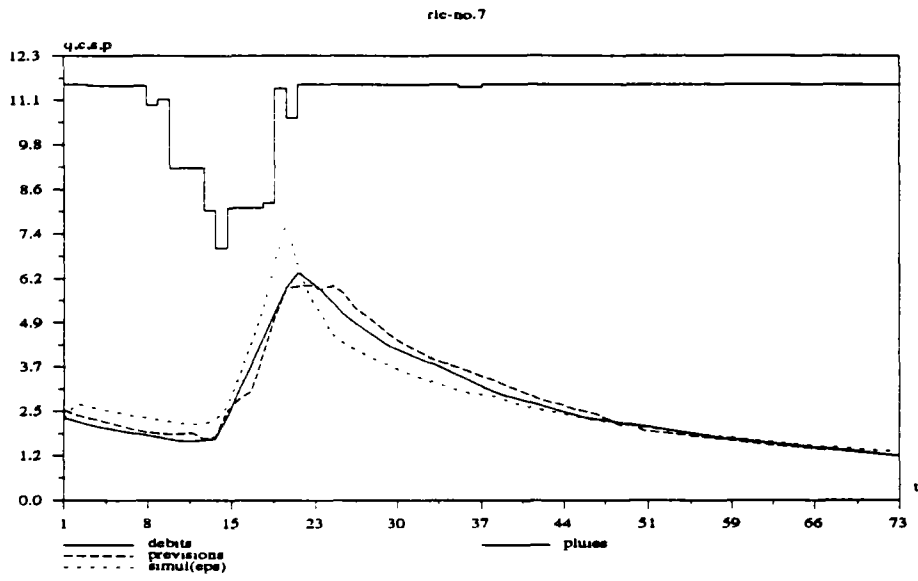


### Prévision sous la condition de pluies connues au Réal Collobrier (N°4 - N°6)



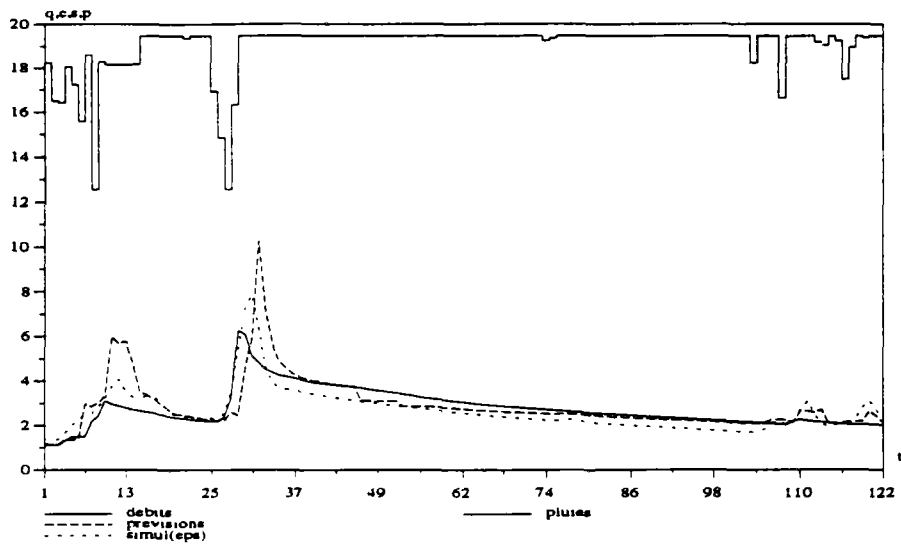


### Prévision sous la condition de pluies connues au Réal Collobrier (N°7 - N°9)

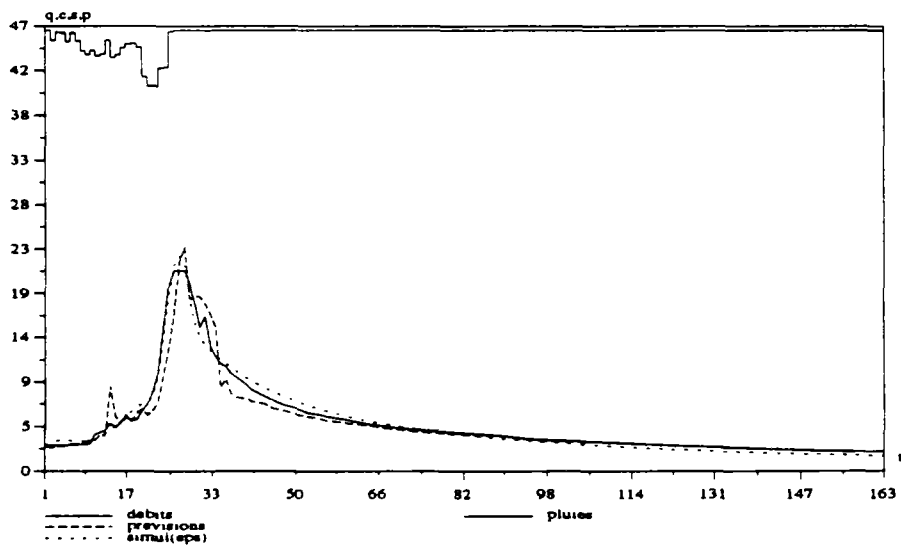


### Prévision sous la condition de pluies connues au Réal Collobrier (N°10 - N°12)

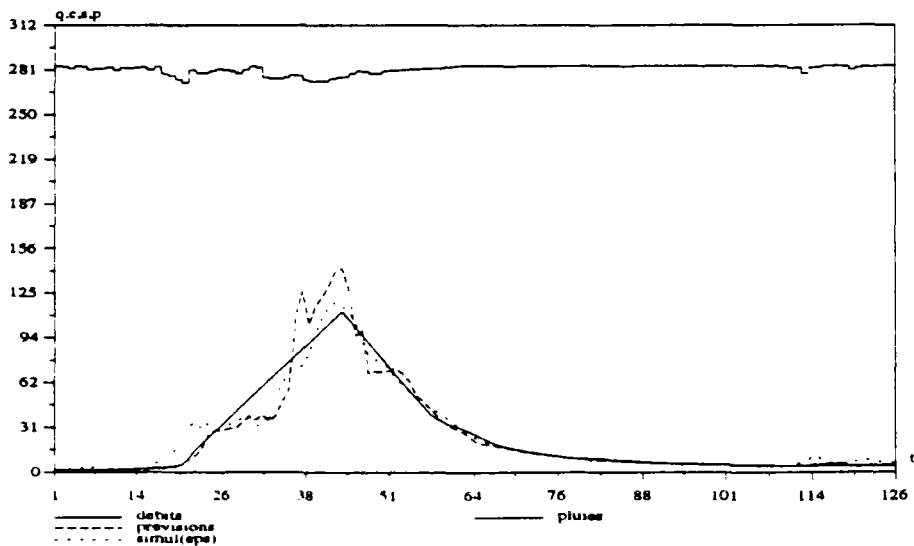
ric-no.10



ric-no.11



ric-no.12



## ANNEXE-VII-B

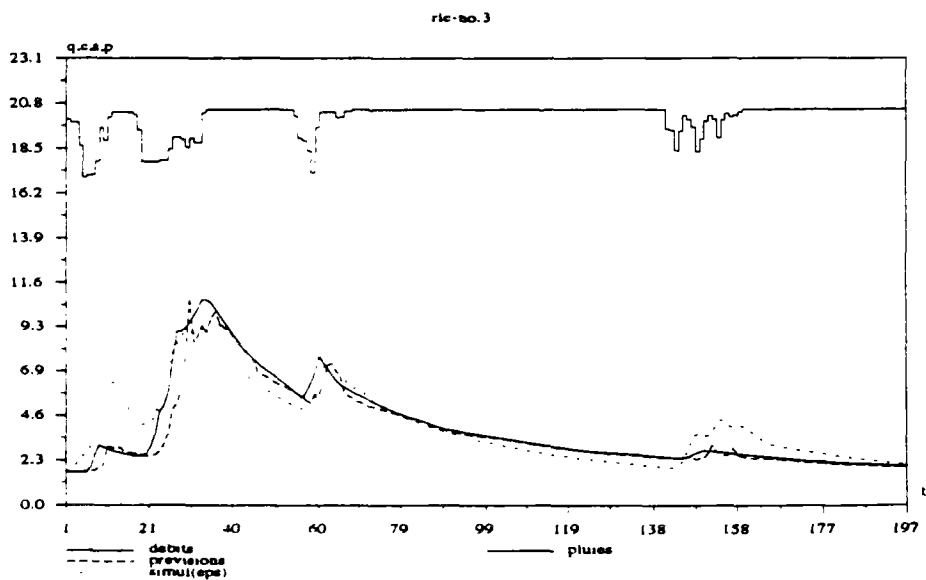
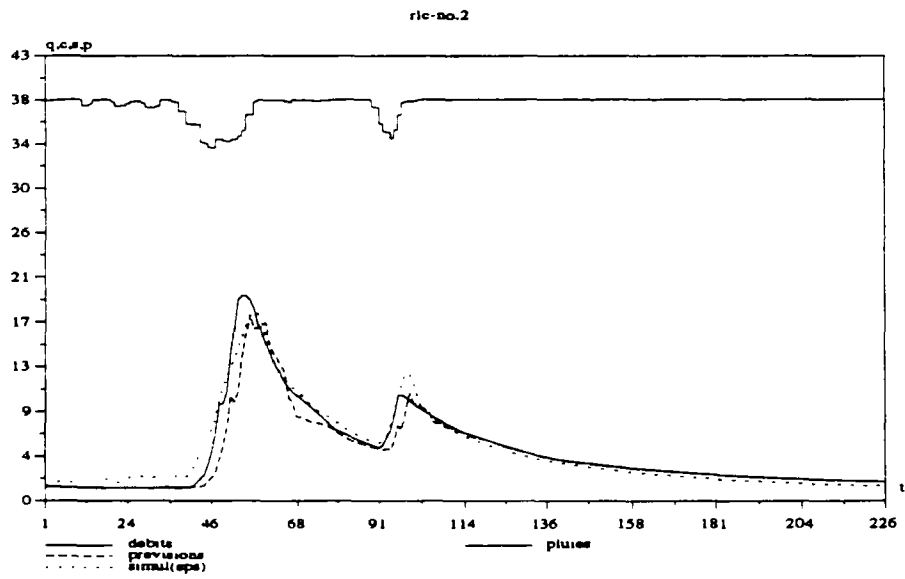
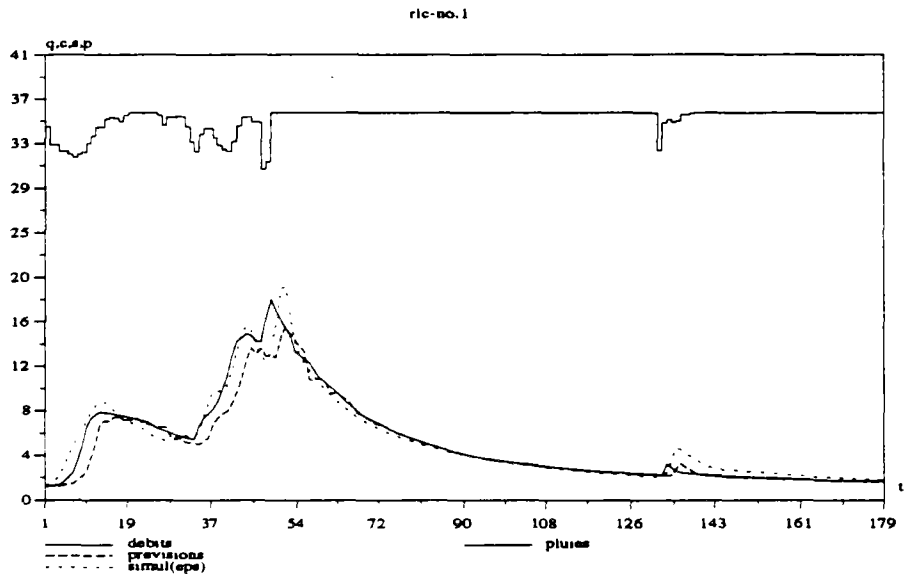
### Vérification sous la condition de pluies nulles sur le Réal Collobrier

Délais de prévision = 3 pas de temps ( $\Delta t=1$  heure)  
12 épisodes de crue (1969-1972)

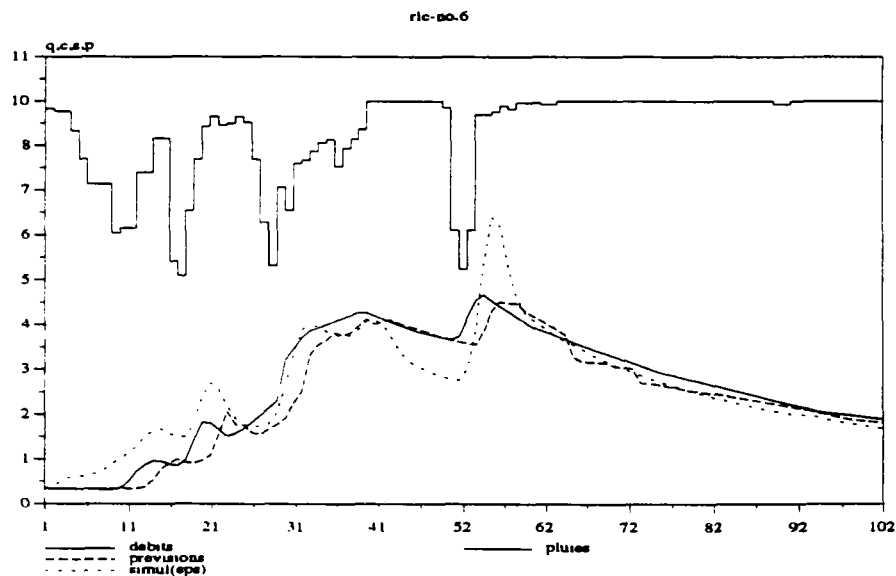
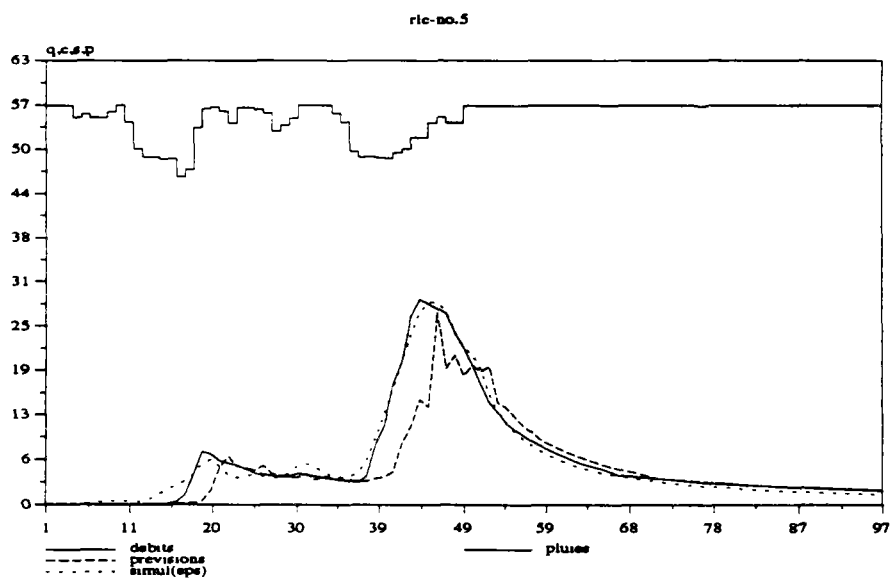
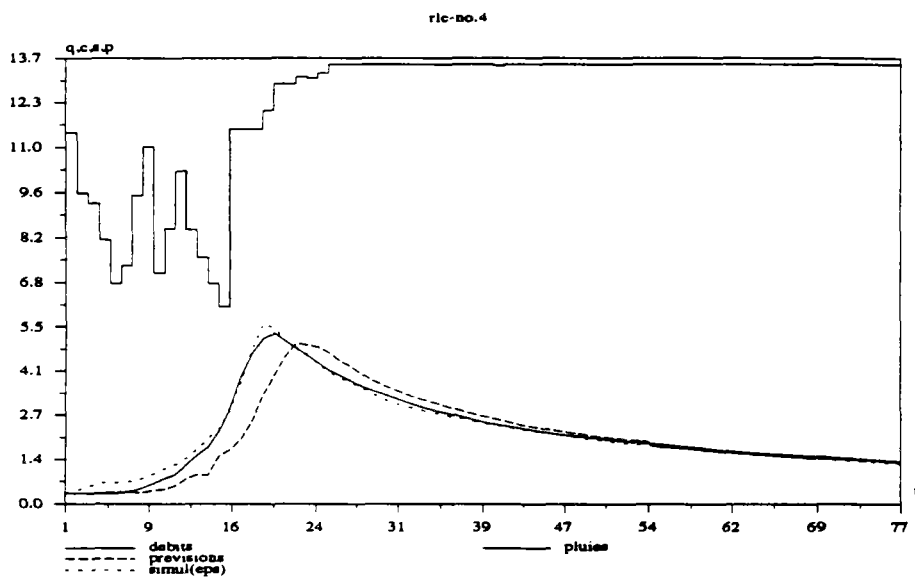
Valeurs d'indice de corrélation (IC) et de coefficient d'efficacité (CE)

ordre	nom d'épisode	IC	CE
1	6902211	0.770	0.180
2	6903051	0.747	0.268
3	6903141	0.783	0.247
4	6905061	0.667	0.307
5	6912311	0.533	0.117
6	7003151	0.794	0.295
7	7012271	0.673	0.334
8	7103211	0.824	0.174
9	7202041	0.648	0.187
10	7203051	0.318	0.047
11	7203131	0.687	0.310
12	7212281	-0.373	-4.350

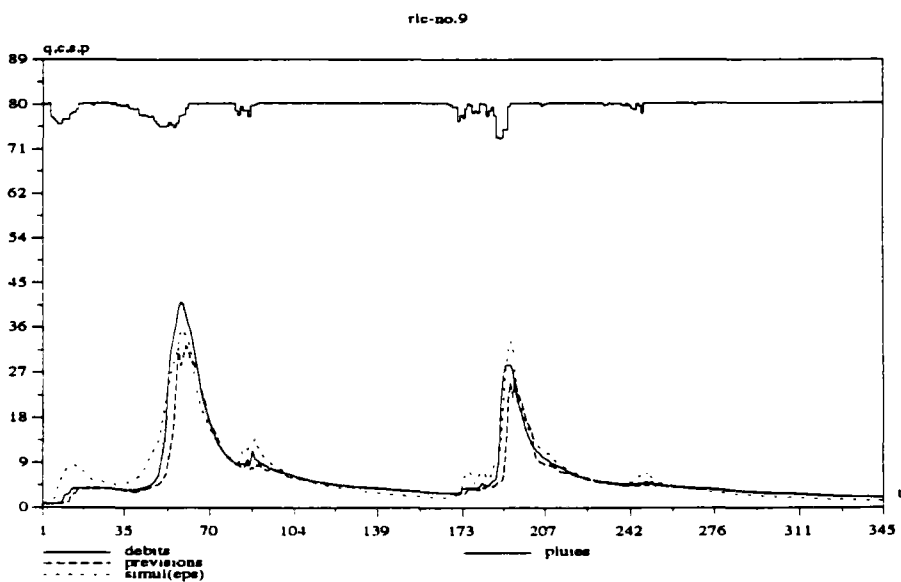
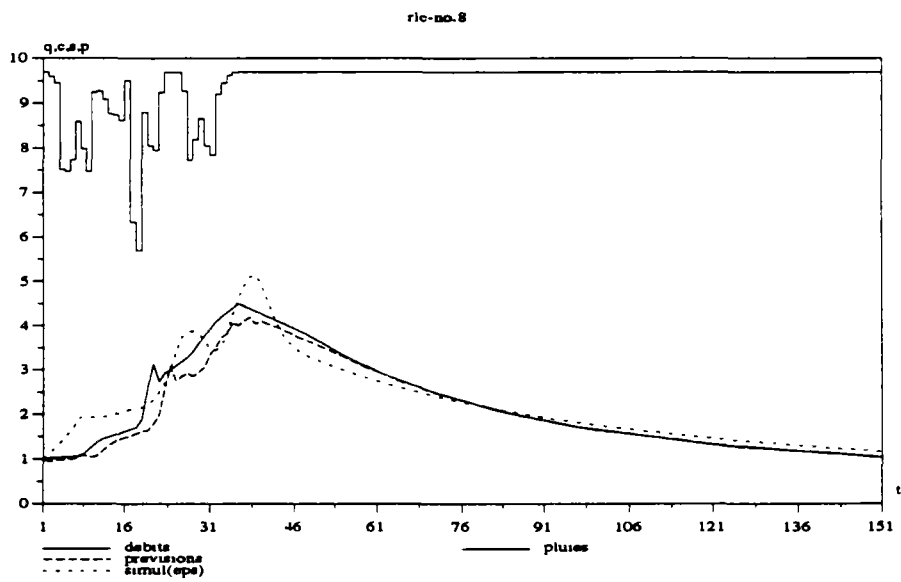
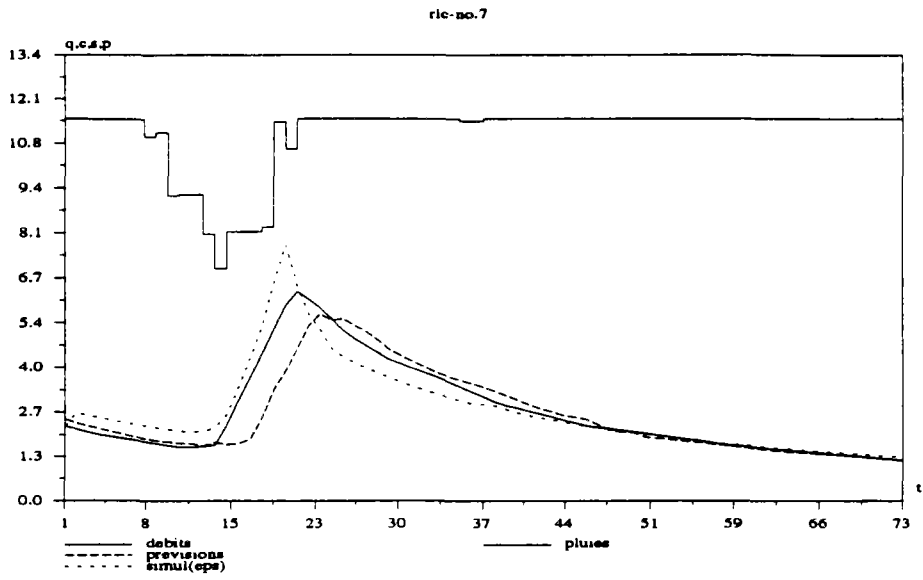
### Prévision sous la condition de pluies nulles au Réal Collobrier (N°1 - N°3)



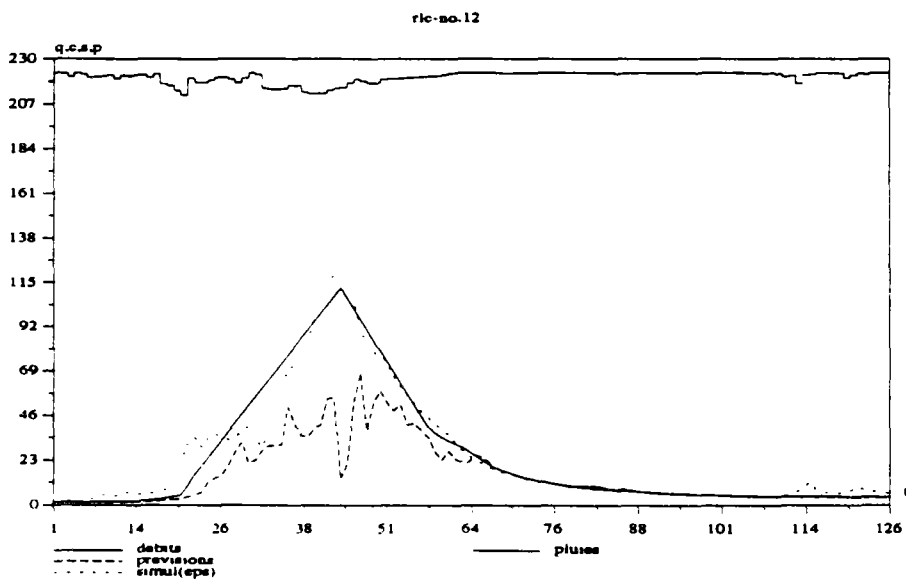
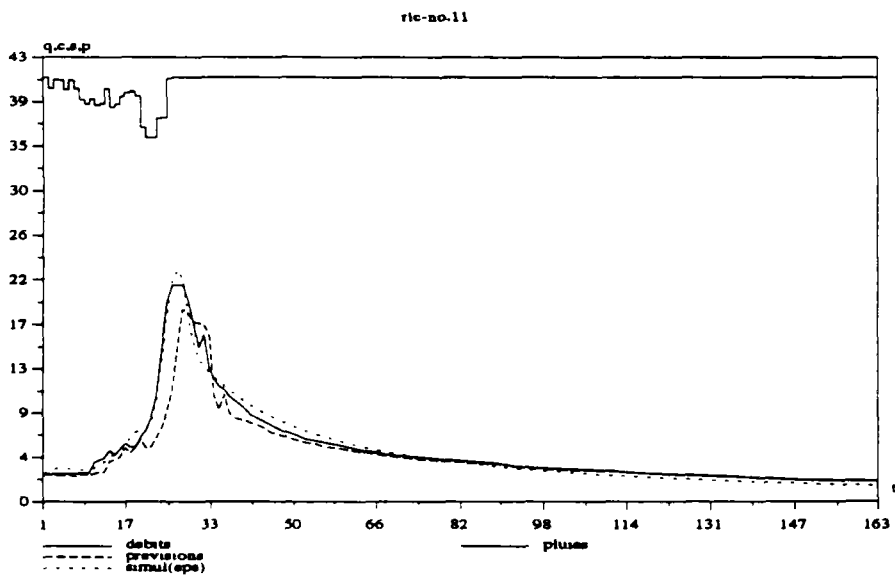
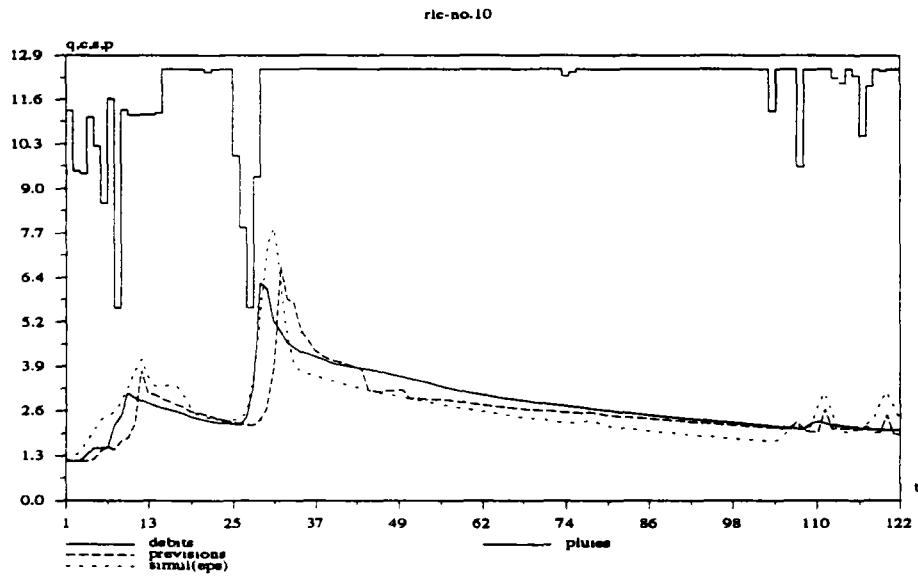
## Prévision sous la condition de pluies nulles au Réal Collobrier (N°4 - N°6)



### Prévision sous la condition de pluies nulles au Réal Collobrier (N°7 - N°9)



### Prévision sous la condition de pluies nulles au Réal Collobrier (N°10 - N°12)











## **ANNEXE-VIII**

### **Variations des paramètres au cours de la prévision**

**VIII-A Variations des paramètres au cours  
de la prévision sous la condition de pluies  
connues (Orgeval)**

**VIII-B Variations des paramètres au cours  
de la prévision sous la condition de pluies  
connues (Réal Collobrier)**



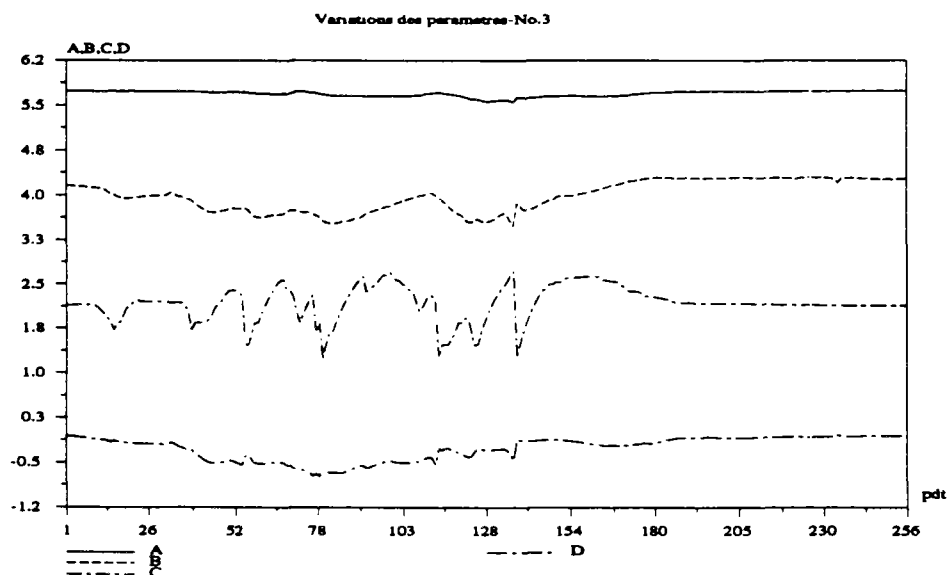
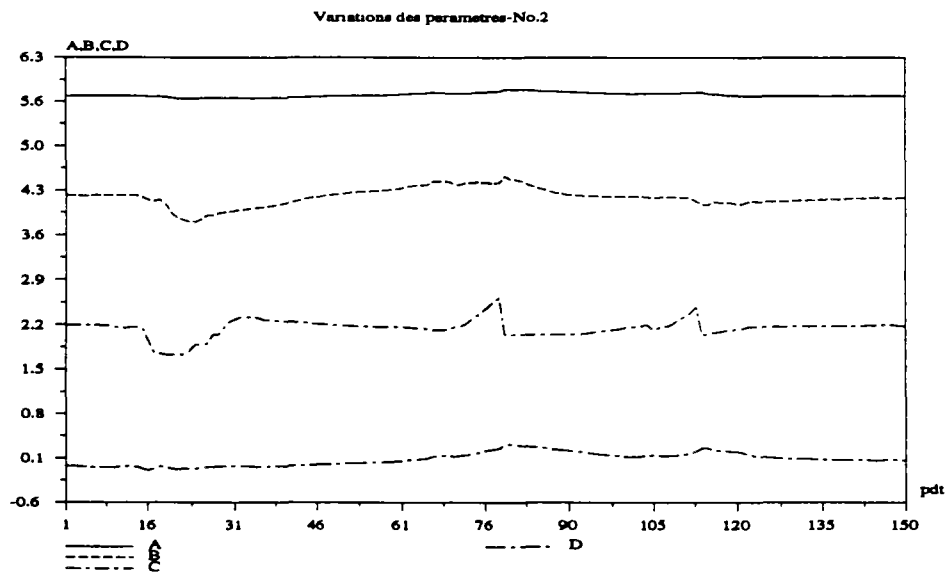
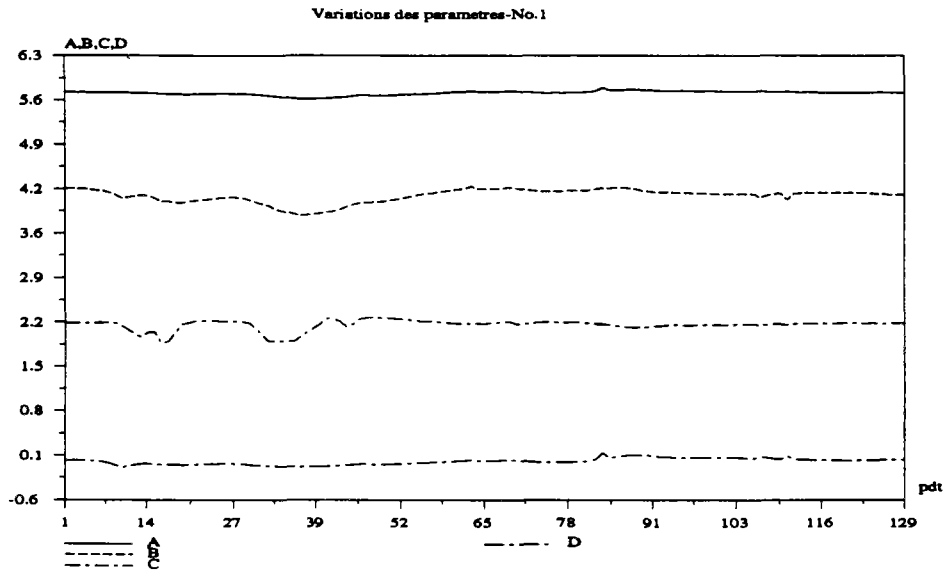
### VIII-A Variations des paramètres au cours de la prévision sous la condition de pluies connues (Orgeval)

Moyennes et écarts-types des paramètres pour la prévision pour chaque épisode (Orgeval)

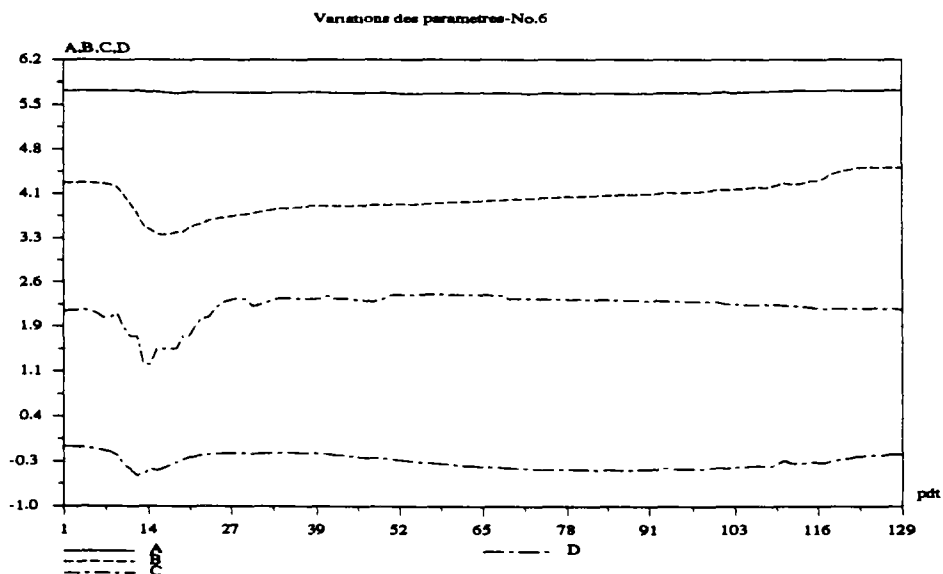
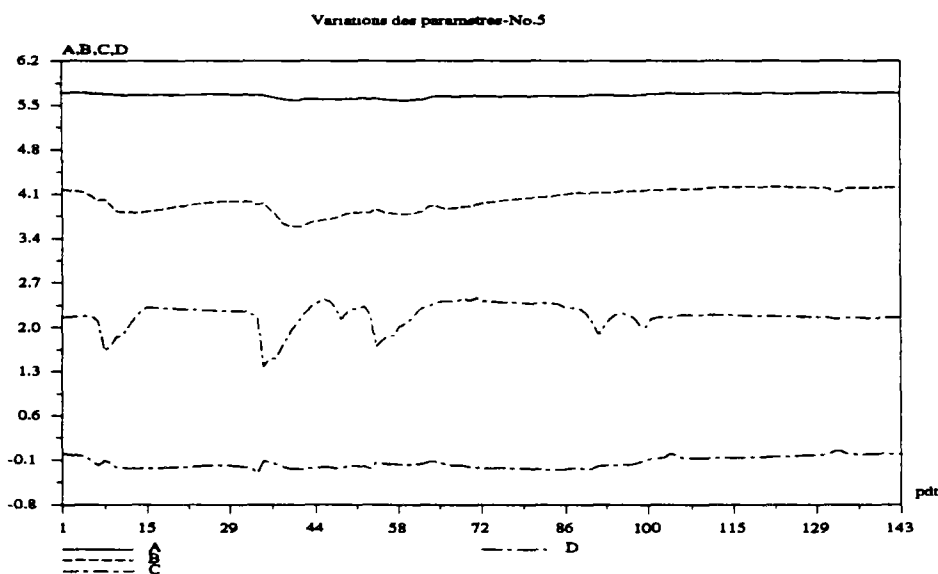
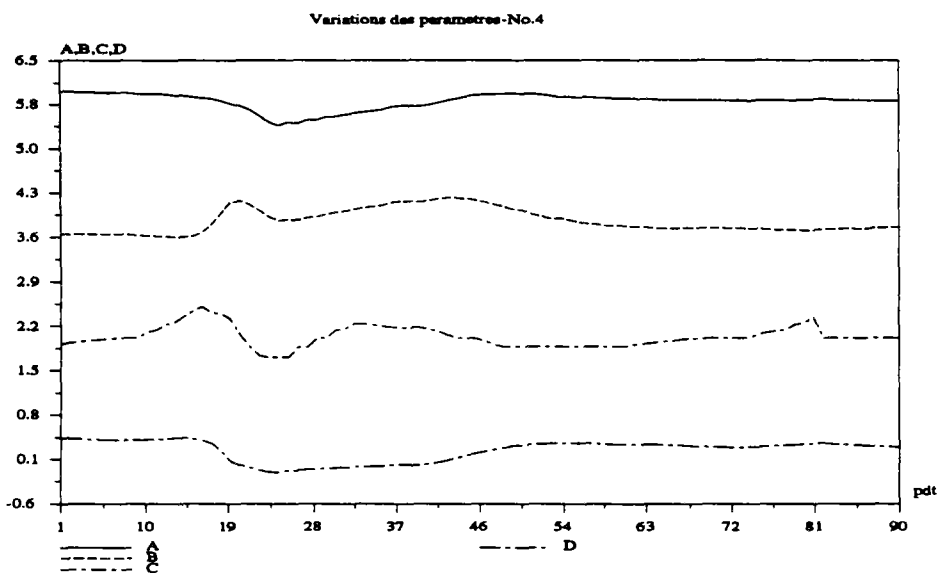
ordre	codage	m(A)	m(B)	m(C)	m(D)	etp(A)	etp(B)	etp(C)	etp(D)
1	7401081	5.733	4.134	2.126	0.002	0.033	0.107	0.082	0.050
2	7401281	5.755	4.150	2.120	0.065	0.034	0.140	0.136	0.104
3	7403151	5.699	3.995	2.199	-0.227	0.044	0.254	0.284	0.197
4	7410221	5.790	3.940	2.042	0.182	0.132	0.221	0.166	0.183
5	7412251	5.705	3.991	2.188	-0.137	0.048	0.183	0.200	0.154
6	7501071	5.712	3.956	2.204	-0.297	0.017	0.219	0.226	0.153
7	7501251	5.672	4.062	2.245	-0.261	0.080	0.309	0.315	0.142
8	7505061	5.723	4.111	2.121	-0.028	0.104	0.222	0.134	0.063
9	7512251	5.656	4.026	2.167	-0.136	0.090	0.193	0.179	0.137
10	7601111	5.645	3.840	2.258	-0.186	0.094	0.366	0.344	0.123
11	7702161	5.728	4.059	2.149	0.106	0.095	0.108	0.192	0.168
12	7704011	5.743	4.084	2.100	0.091	0.048	0.131	0.108	0.126
13	7801241	5.729	3.889	2.173	-0.424	0.169	0.508	0.160	0.325
14	7802021	5.729	4.147	2.165	-0.697	0.094	0.266	0.131	0.390
15	7803211	5.751	4.239	2.178	-0.107	0.151	0.211	0.202	0.277
16	7902021	5.774	3.919	2.098	-1.048	0.256	0.591	0.362	0.407
17	7903111	5.715	4.102	2.150	-0.598	0.160	0.543	0.203	0.453
18	7903251	5.753	4.075	2.146	-0.439	0.213	0.355	0.125	0.397
19	8002041	5.733	3.998	2.188	-0.483	0.039	0.402	0.195	0.422
20	8003141	5.745	4.216	2.287	-0.160	0.192	0.304	0.319	0.310
21	8006131	5.656	3.887	2.139	0.025	0.243	0.361	0.188	0.366
22	8012181	5.742	4.040	2.156	-0.596	0.100	0.364	0.126	0.382
23	8110151	5.707	3.908	2.164	-0.442	0.086	0.474	0.224	0.459
24	8112161	5.712	4.036	2.149	-0.519	0.152	0.338	0.120	0.317

m= moyenne, etp=écart-type.

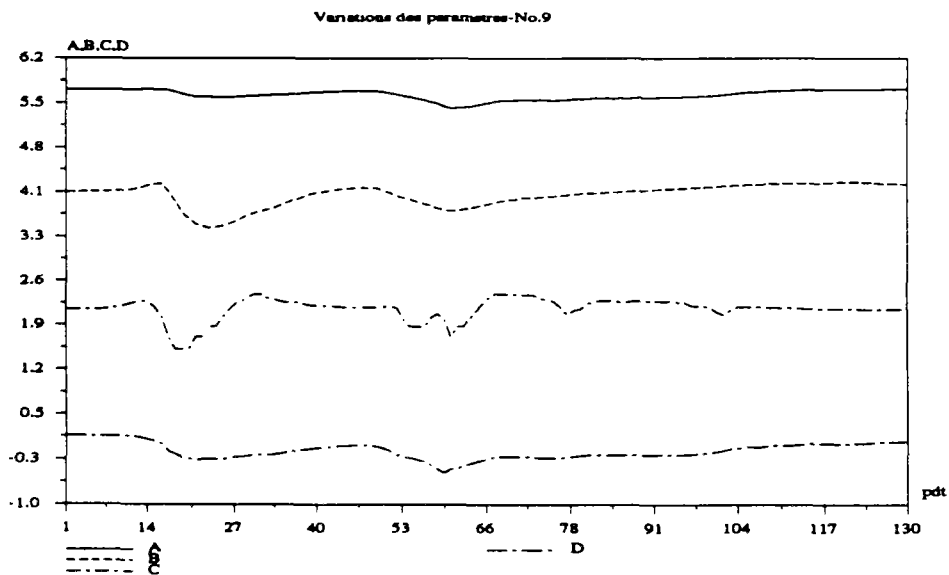
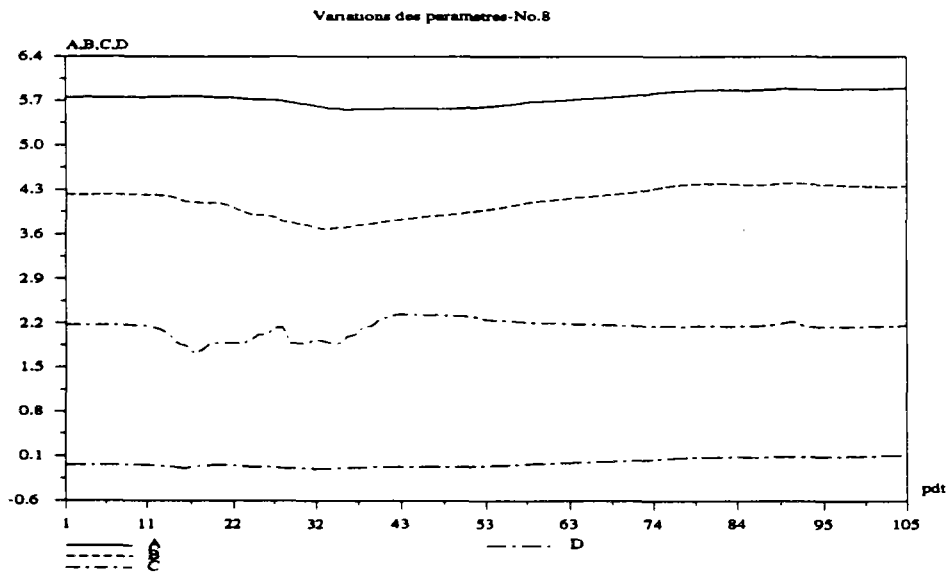
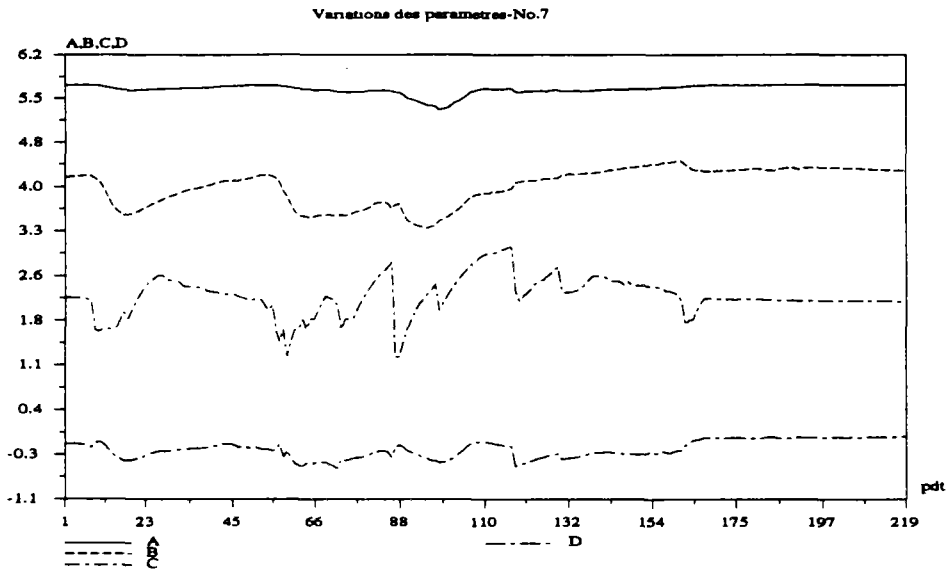
### variations des paramètres des épisodes N°1, N°2 et N°3 (Orgeval)



variations des paramètres des épisodes N°4, N°4 et N°6 (Orgeval)



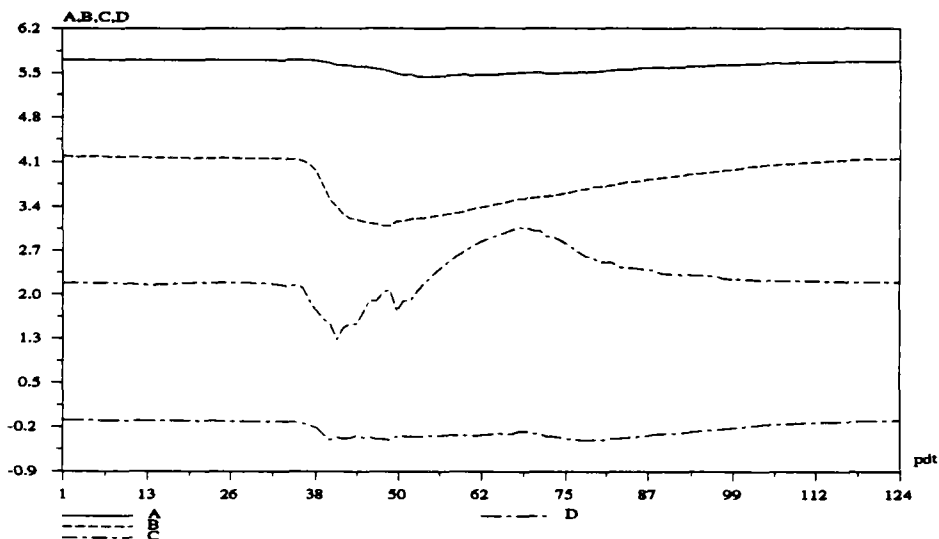
variations des paramètres des épisodes N°7, N°8 et N°9 (Orgeval)



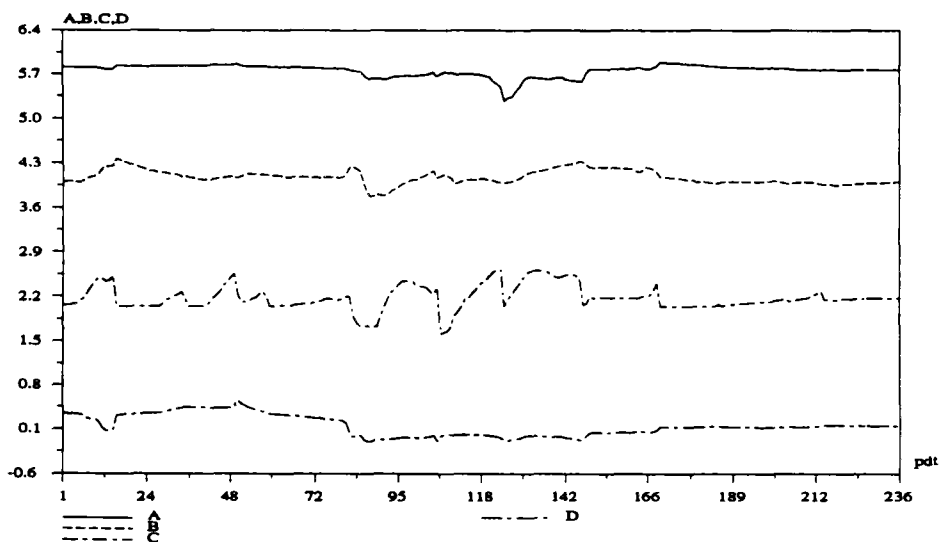


variations des paramètres des épisodes N°10, N°11 et N°12 (Orgeval)

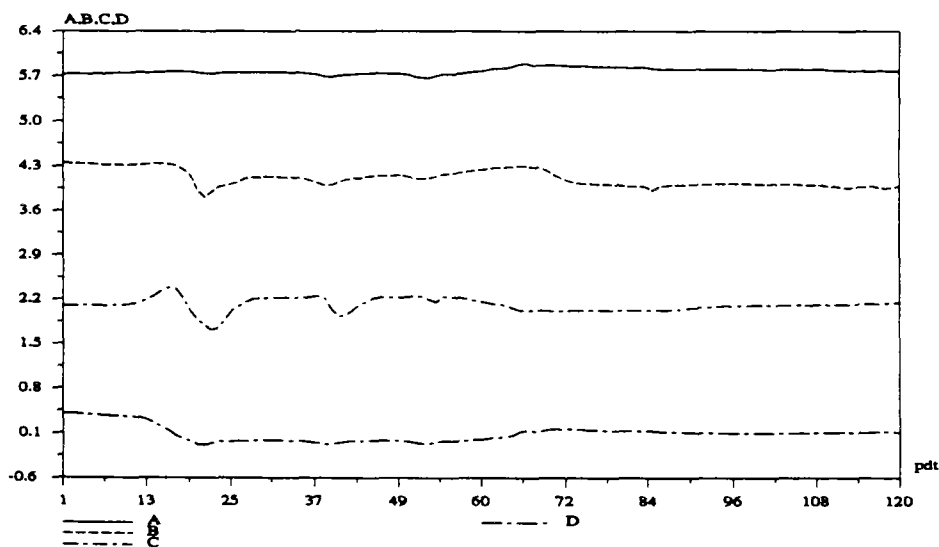
Variations des paramètres-No.10



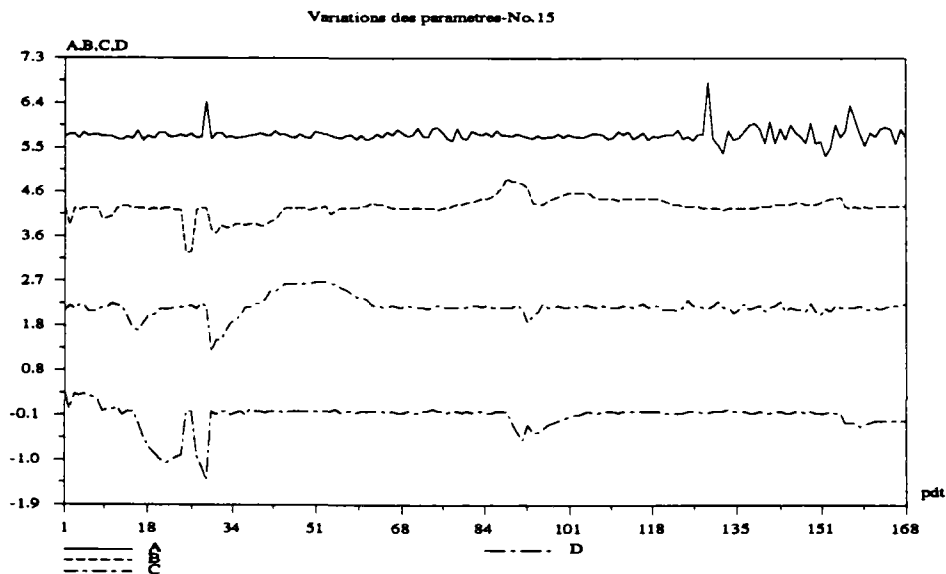
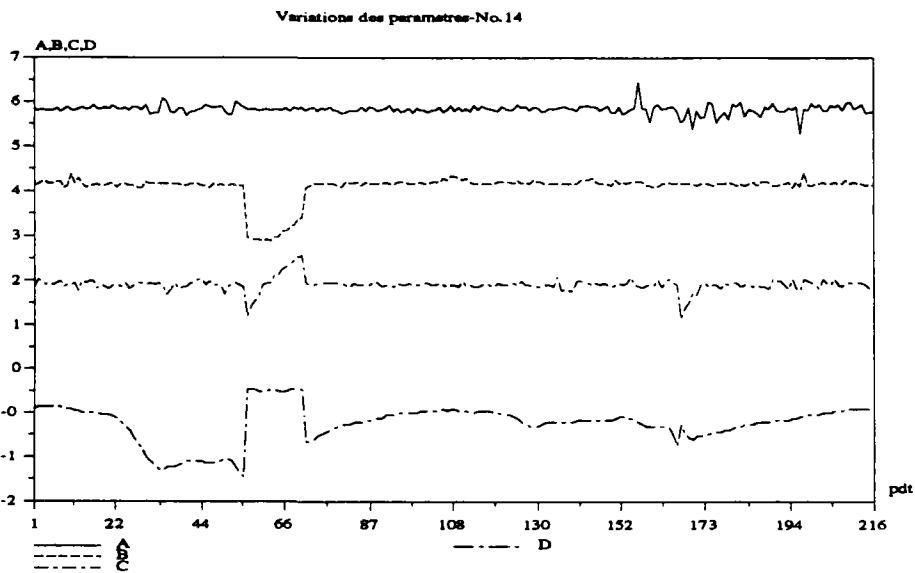
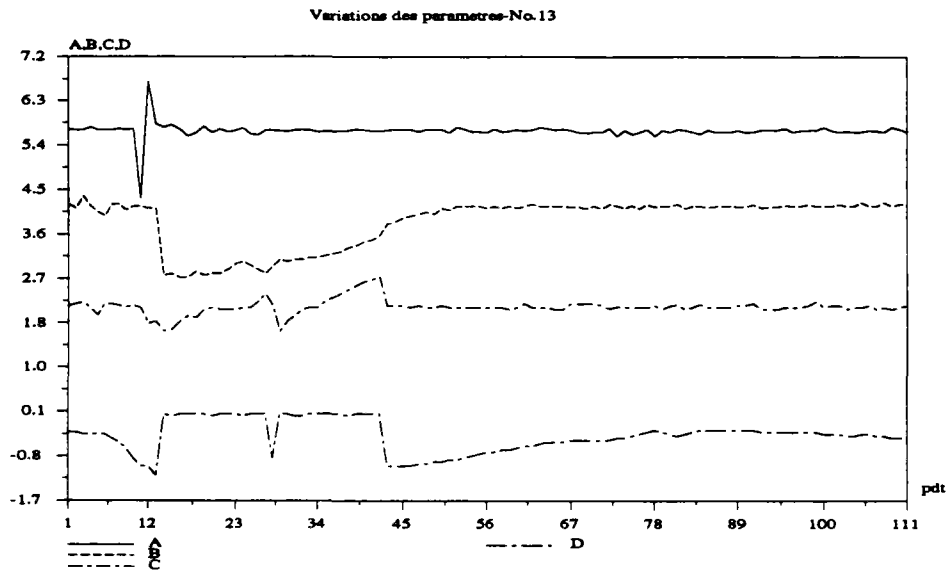
Variations des paramètres-No.11



Variations des paramètres-No.12

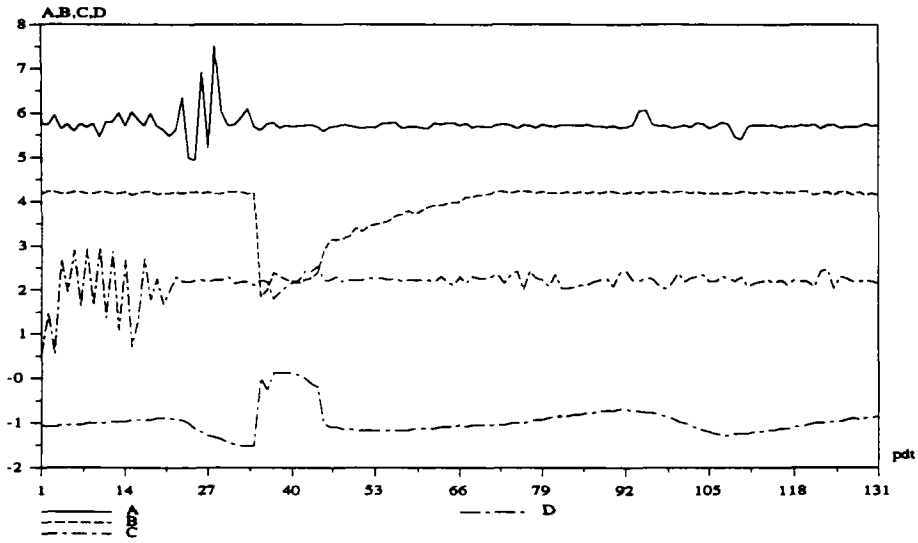


### variations des paramètres des épisodes N°13, N°14 et N°15 (Orgeval)

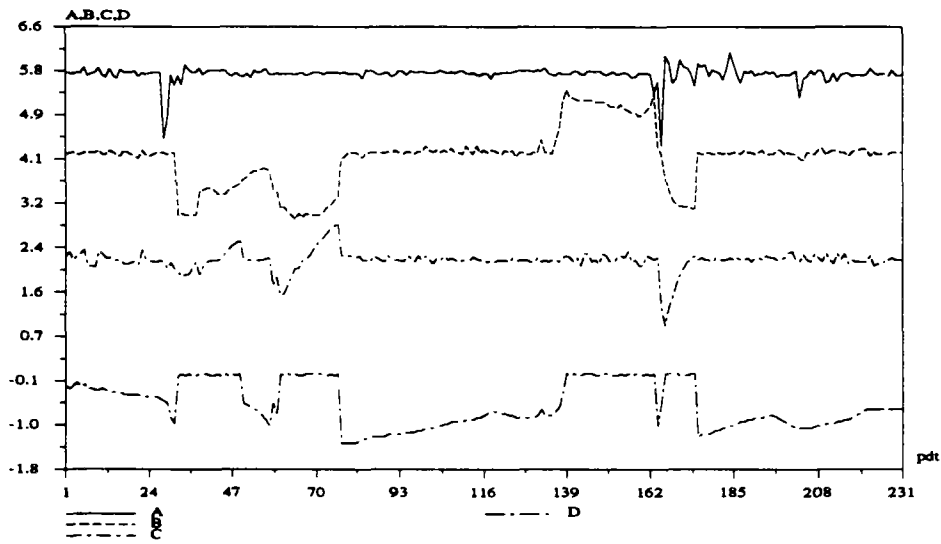


variations des paramètres des épisodes N°16, N°17 et N°18 (Orgeval)

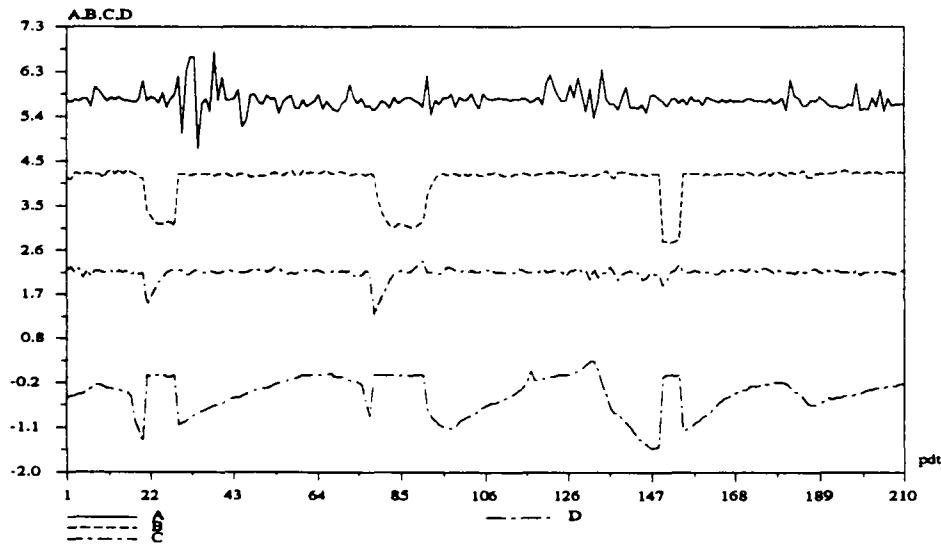
Variations des paramètres-No.16



Variations des paramètres-No.17

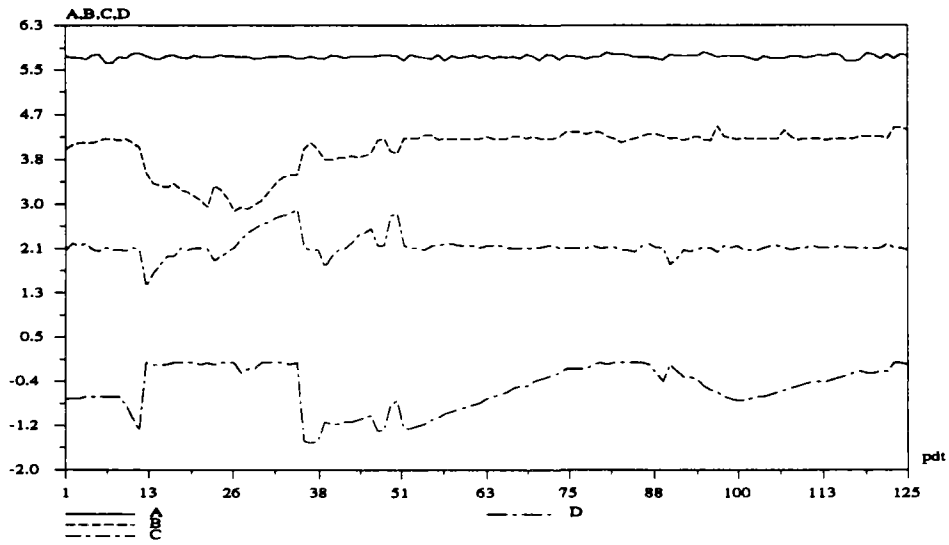


Variations des paramètres-No.18

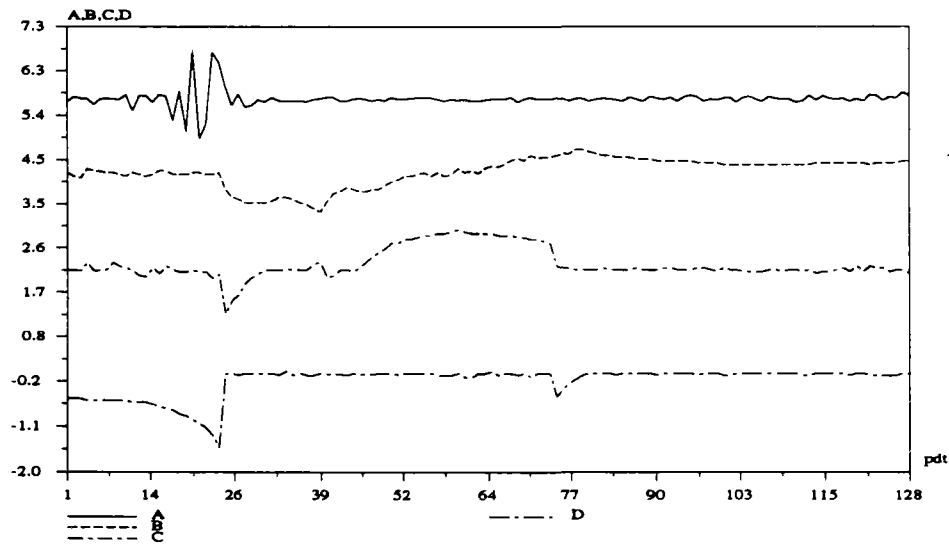


### variations des paramètres des épisodes N°19, N°20 et N°21 (Orgeval)

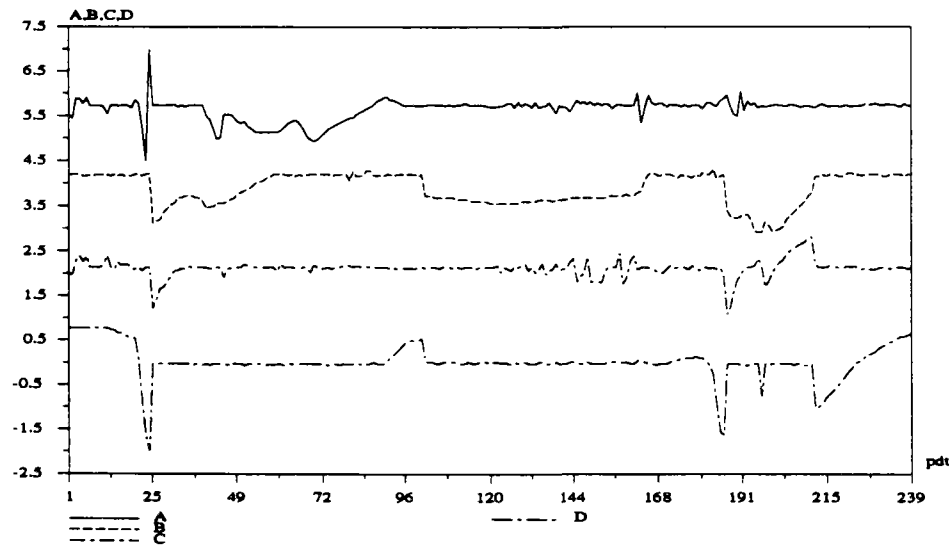
Variations des paramètres-No.19



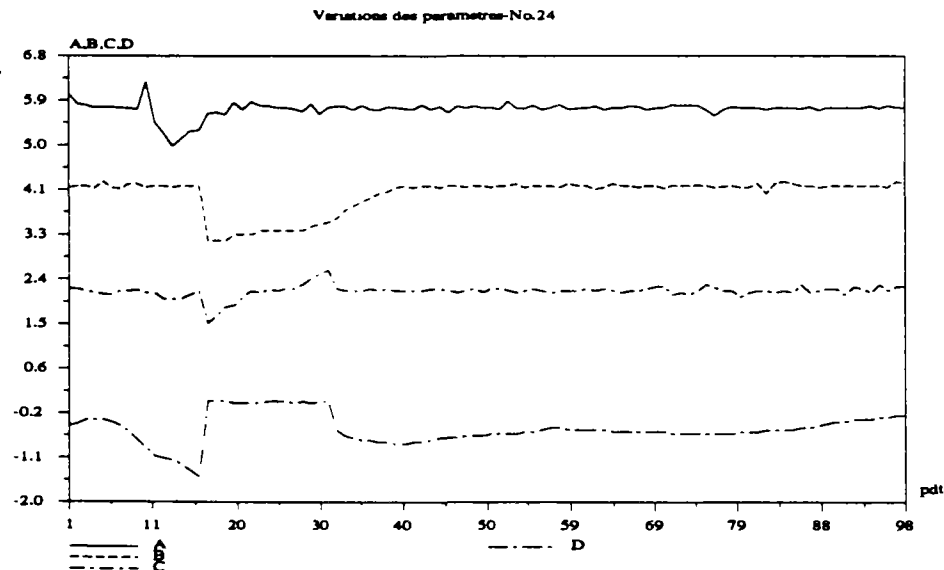
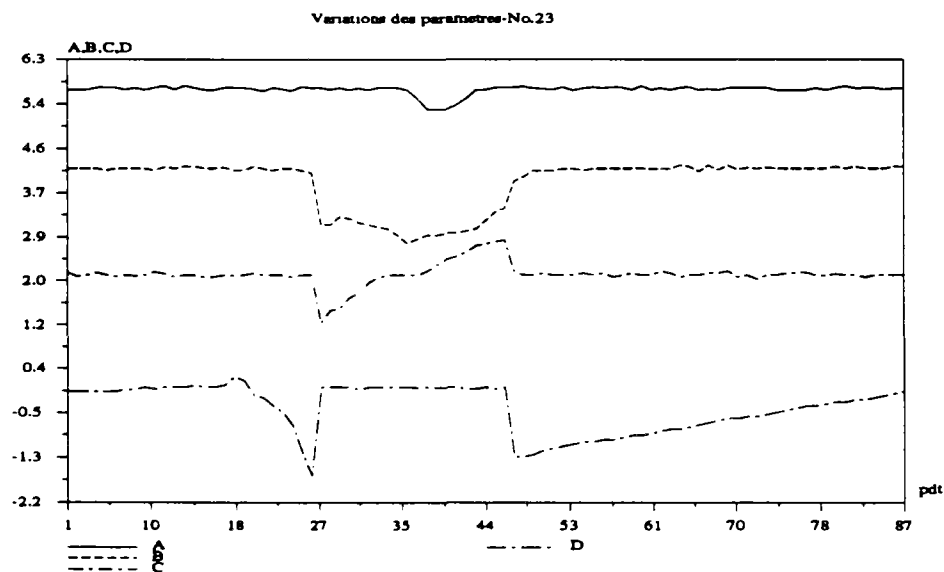
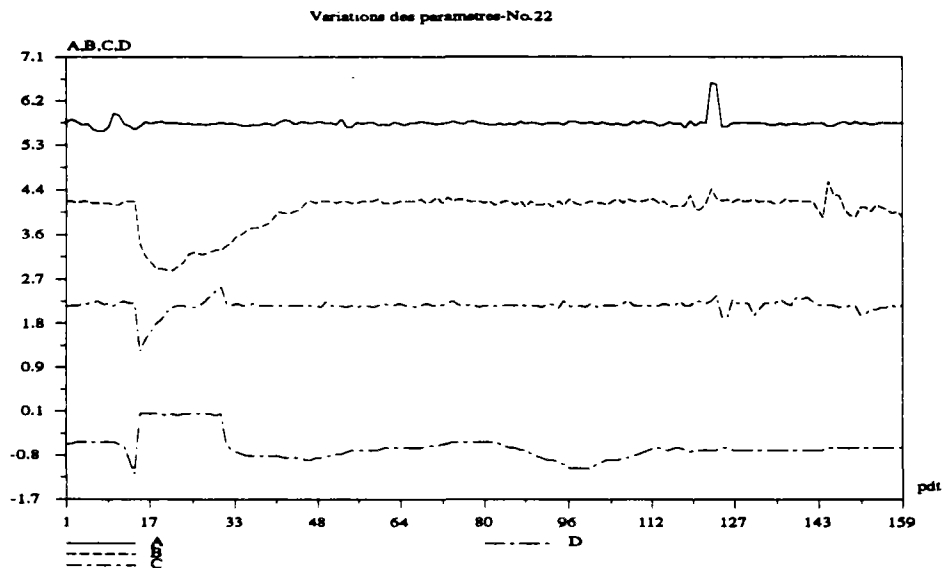
Variations des paramètres-No.20



Variations des paramètres-No.21



variations des paramètres des épisodes N°22, N°23 et N°24 (Orgeval)



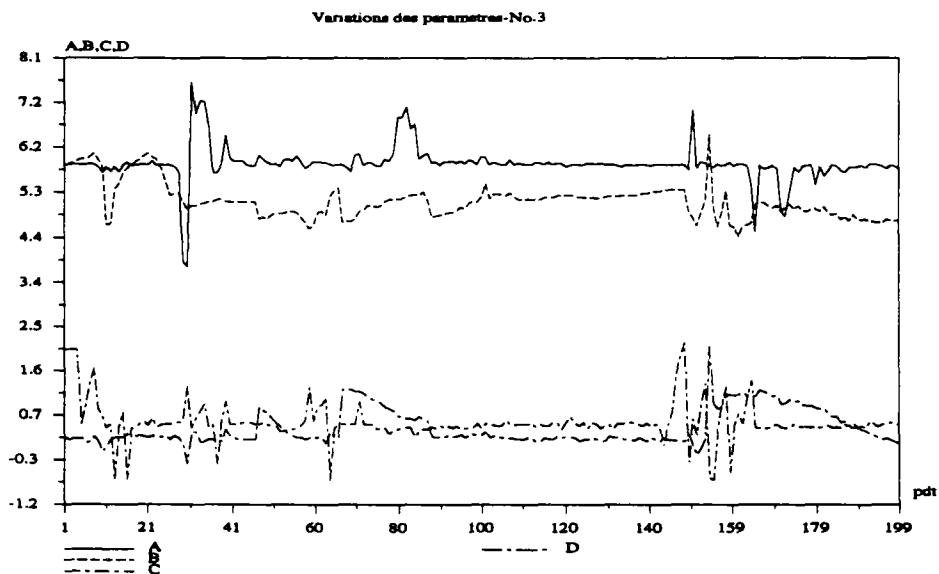
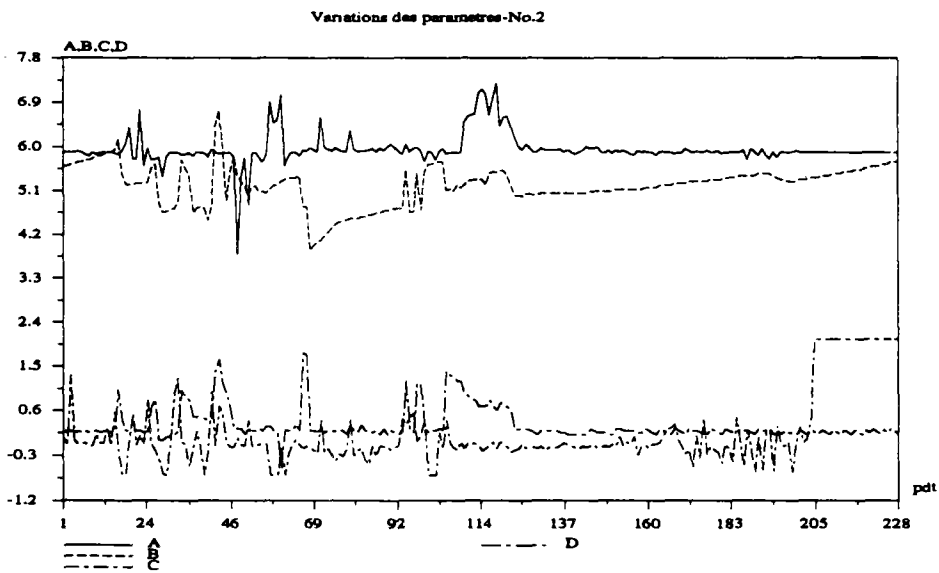
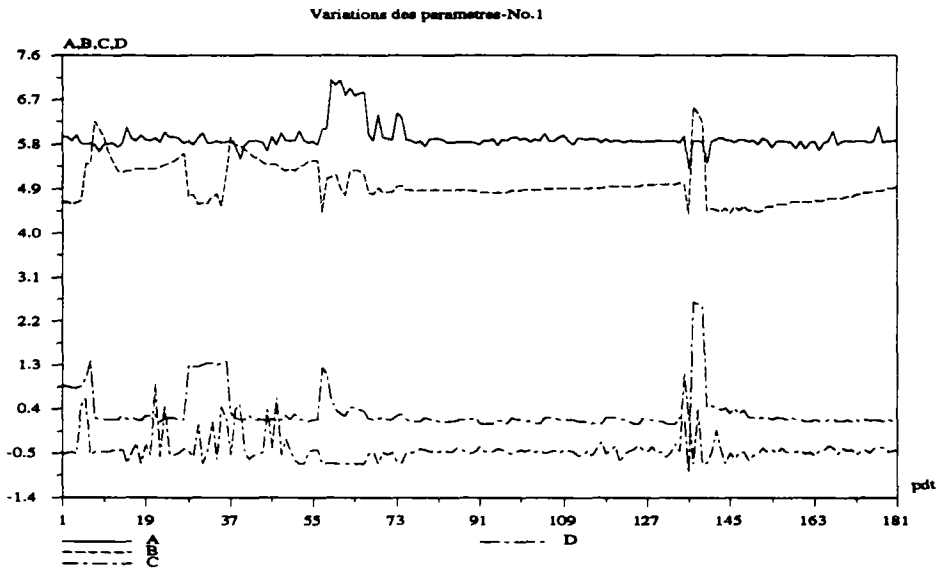
### VIII-B Variations des paramètres au cours de la prévision sous la condition de pluies connues (Réal Collobrier)

Moyennes et écarts-types des paramètres pour la prévision pour chaque épisode (Réal Collobrier)

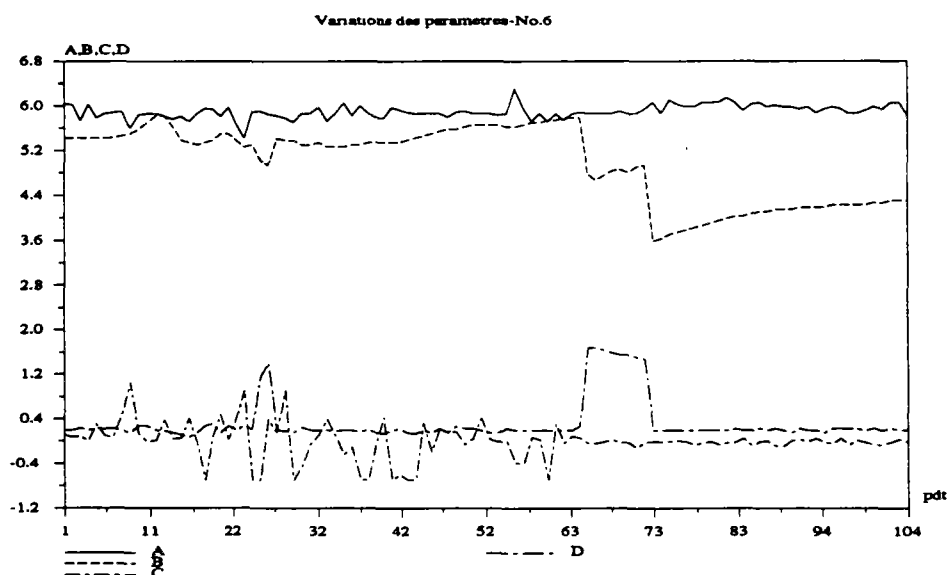
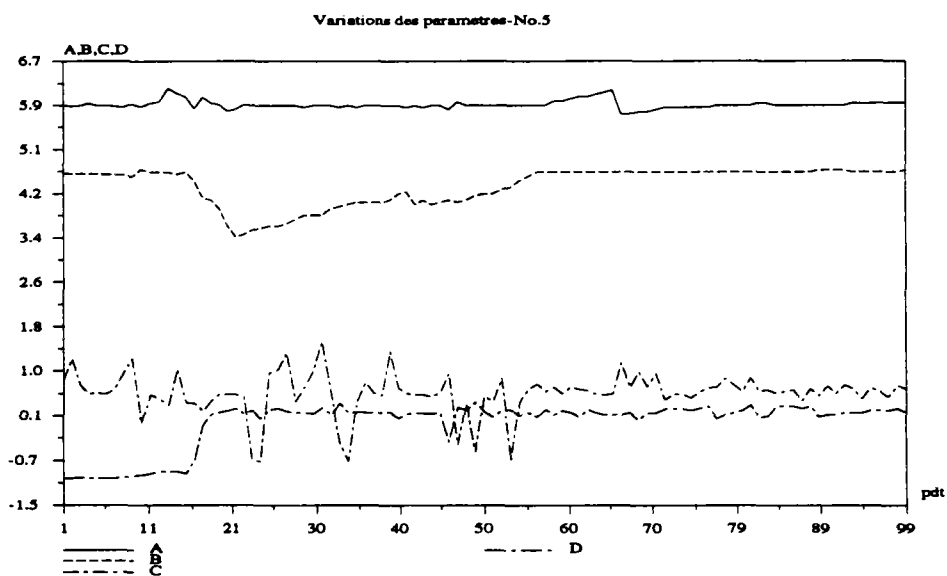
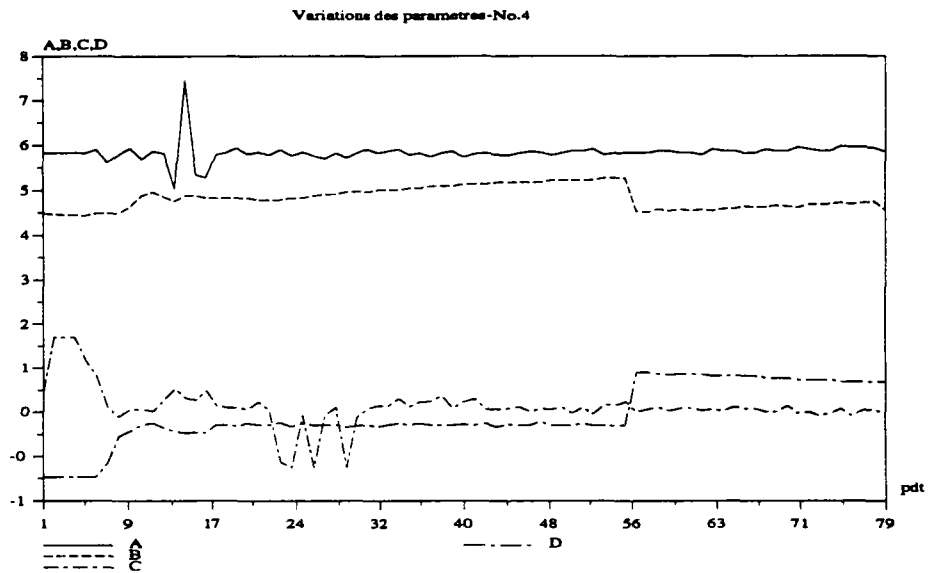
ordre	codage	m(A)	m(B)	m(C)	m(D)	etp(A)	etp(B)	etp(C)	etp(D)
1	6902211	5.936	4.980	-0.123	0.368	0.254	0.377	0.267	0.436
2	6903051	5.924	5.178	-0.100	0.311	0.323	0.401	0.253	0.326
3	6903141	5.860	5.148	-0.088	0.441	0.366	0.375	0.366	0.384
4	6905061	5.878	4.963	-0.095	0.370	0.290	0.231	0.228	0.578
5	6912311	5.867	4.388	-0.004	-0.007	0.071	0.335	0.388	0.434
6	7003151	5.896	5.032	-0.138	0.332	0.103	0.657	0.296	0.389
7	7012271	5.993	4.420	-0.047	0.230	0.320	0.457	0.233	0.170
8	7103211	5.857	4.960	-0.081	0.220	0.104	0.441	0.206	0.204
9	7202041	5.946	5.140	-0.108	0.348	0.370	0.503	0.292	0.393
10	7203051	5.912	4.816	-0.105	0.245	0.196	0.632	0.339	0.464
11	7203131	5.879	5.196	-0.114	0.266	0.118	0.596	0.202	0.283
12	7212281	5.902	4.697	-0.145	0.235	0.590	0.417	0.511	0.371

m= moyenne, etp=écart-type.

variations des paramètres des épisodes N°1, N°2 et N°3 (Réal Collobrier)

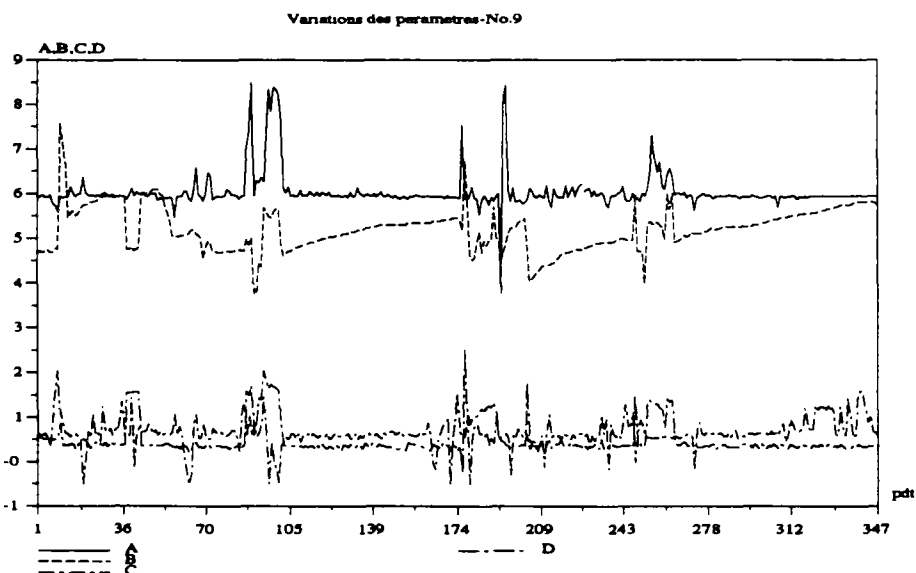
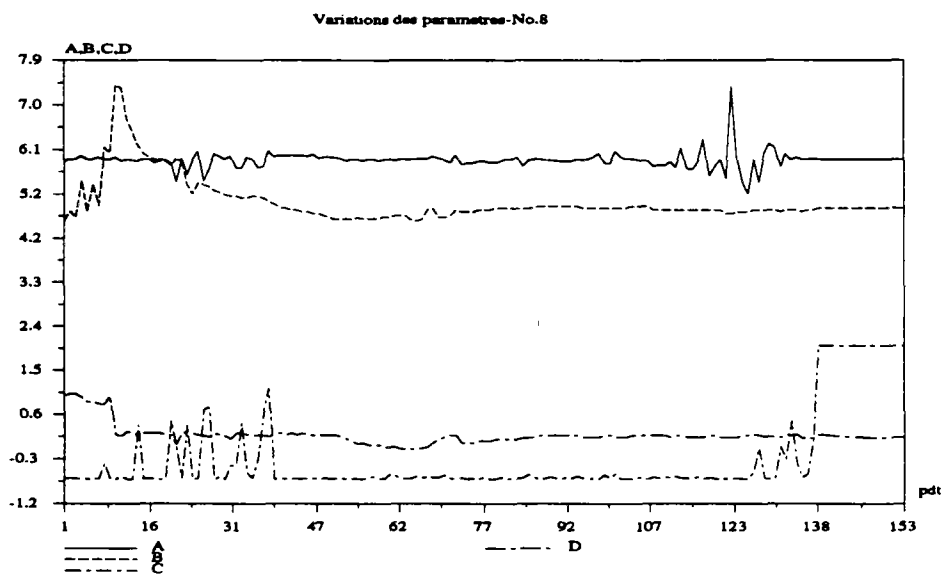
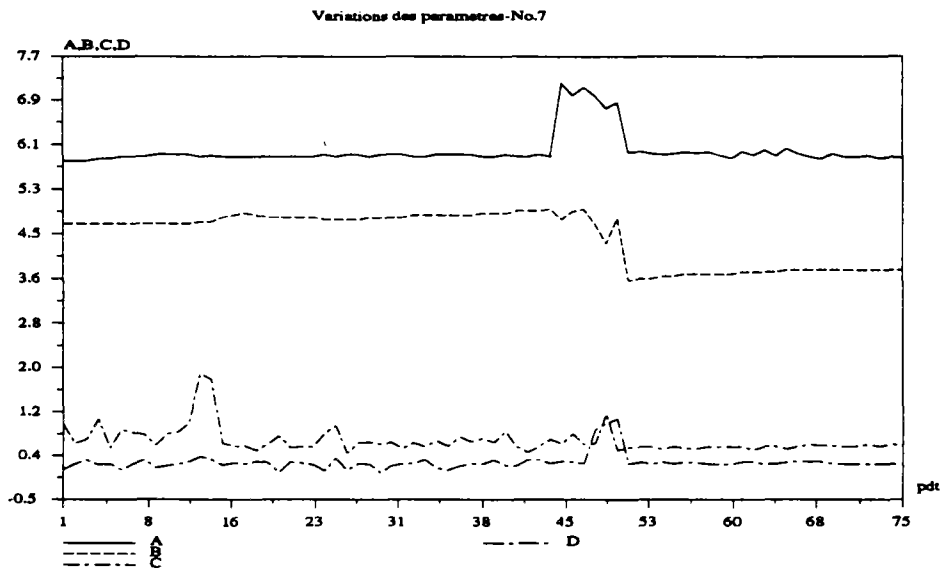


variations des paramètres des épisodes N°4, N°4 et N°6 (Réal Collobrier)





variations des paramètres des épisodes N°7, N°8 et N°9 (Réal Collobrier)



variations des paramètres des épisodes N°10, N°11 et N°12 (Réal Collobrier)

