

NS 19793 (72)(4)

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES



CERGRENE

Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion
des Ressources Naturelles et de l'Environnement

Mémoire présenté pour l'obtention du titre de
Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement

**Appréciation l'Aide d'un Modèle Empirique des
Effets d'Actions Anthropiques sur la Relation
Pluie-Débit l'Echelle d'un Bassin Versant**

Volume 2 - annexes

par

Nilo DE OLIVEIRA NASCIMENTO

thèse soutenue le 03 Juillet 1995
devant le jury composé de :

Mr.	Claude	THIRRIOT	Président
Mme.	Claude	COSANDEY	Rapporteur
Mr.	Jean-Michel	GRESILLON	Rapporteur
Mr.	Jean-Claude	DEUTSCH	Examineur
Mr.	Claude	MICHEL	Examineur
Mr.	Pierre-Alain	ROCHE	Directeur de Thèse

06



INV03294

Annexes

Volume 2

ANNEXES	391
Annexes du Chapitre 1	393
Annexe 1.1 - Articles sur la modélisation mathématique en hydrologie	395
Annexes du Chapitre 2	436
Annexe 2.1 - La routine de désagrégation des ETP décennales de GR3J	438
Annexe 2.2 - Hydrogrammes de simulation - version originale de GR3J	439
Annexe 2.3 - Hydrogrammes de simulation - version EDIATNO de GR3J	440
Annexes du Chapitre 3	441
Annexe 3.1 - Modifications de GR3J au Niveau du Rendement et au Niveau du Transfert	443
Annexe 3.2 - Résultats de calage - versions 31 à 41	453
Annexe 3.3 - Analyse de sensibilité des paramètres - version 32	457
Annexe 3.4 - Les problèmes qui persistent	461
Annexe 3.5 - Les 121 bassins versants	465
Annexe 3.6 - Résultats de calage - version 32 - 121 bassins versants	468
Annexe 3.7 - Résultats de calage - GR4J - 121 bassins versants - critères	472
Annexe 3.8 - Résultats de calage - GR4J - 121 bassins versants - paramètres	475
Annexes du Chapitre 4	478
Annexe 4.1 - L'influence de l'exactitude de l'évaporation	480
Annexes du Chapitre 5	494
Annexe 5.1 - La méthode URS appliquée dans le calage de GR4J une analyse exploratoire	496
Annexe 5.2 - La méthode URS appliquée dans le calage de GR4J une analyse détaillée	505
Annexe 5.3 - La méthode EG appliquée dans le calage de GR4J série 1963-1989	512
Annexes du Chapitre 6	515
Annexe 6.1 - Evolution dans le temps des critères de qualité de GR4J pour des contrôles successifs (série synthétique [<i>br.q1qm</i>])	517
Annexe 6.2 - L'évolution des variables hydrologiques comme résultat de l'évolution des paramètres du modèle GR4J	519
Annexe 6.3 - L'évolution des variables hydrologiques comme résultat de l'évolution des paramètres du modèle GR4J - paramètres composés	533
Annexe 6.4 - Série [<i>0,2pq</i>] - méthode EG - courbes d'isocritère	540
Annexe 6.5 - Série [<i>br.q1/100</i>] - méthode EG - courbes d'isocritère	542
Annexes du Chapitre 7	544
Annexe 7.1 - Interruption de mesure de débit dans les bassins versants du Rimbaud, du Vaubarnier et du Valescure, entre 1969 et 1992	546
Annexe 7.2 - L'évolution des variables hydrologiques comme résultat de l'évolution des paramètres du modèle GR4J - Toulon	547
Annexe 7.3 - Bassin versant du Valescure - Evolution dans le temps des critères de qualité de GR4J pour des contrôles successifs	549

Annexes du Chapitre 1

SOME EPISTEMOLOGICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT AND USE OF HYDROLOGIC CONCEPTUAL MODELS

Nilo NASCIMENTO and Claude MICHEL

Centre d'enseignement et de recherche sur la gestion de ressources naturelles et de
l'environnement - (CERGRENE) - *Training and research center in natural resources*
and environment management.
Noisy le Grand, France

ABSTRACT: The paper addresses the role of the conceptual rainfall-runoff modelling approach in hydrology on a scientific and technological context. From this analysis, suggestions for modelling and further research in this field are proposed.

KEYWORDS: model development; model use; conceptual rainfall-runoff modelling; epistemology; hydrology.

1. INTRODUCTION

In the present work, the question of whether the conceptual rainfall-runoff (CRR) modelling approach may still be part of a fruitful program of research in hydrology is addressed.

In an attempt to contribute to this debate, we first consider the CRR modelling approach in respect to other approaches, especially the physically based (PhB) modelling approach. This reflection is followed by some conclusive remarks on the role of the CRR modelling approach in science and technology.

Some model building procedures and aspects of the CRR modelling research program are suggested, as a result of the analysis carried out.

2. DEFINITION OF A MODEL: some essential points

Scientific literature is rich in definitions of a model (e.g. Danchin, 1979; Thom, 1979; Jacquet, 1984; Bunge, 1974; Michel, 1989; Roche, 1988; Kauark Leite, 1990). From these works, we may outline some essential points:

a) *models derive from theories and constitute the result of procedures of translating and interpreting general theories in a real world situation:* For instance, CRR models employ the general theory of systems (dynamic systems) in order to model rainfall-runoff processes. As the theory of systems is very general and interdisciplinary, other formal theories, statements and hypotheses are necessary to interpret it in a hydrological system context: e.g. CRR models must respect the principle of continuity. These hypotheses, statements and theories restrain the generality of the theory of systems and, in principle, provide necessary conditions for model verification and validation. In this sense, "models are at best working hypotheses about the nature of reality" (Beck, 1983). The theory of systems itself is not testable (Bunge, 1980).

b) *models are formal logical discourses about a real world situation:* This is a consequence of the first statement, as theories are themselves discourses about reality,

composed by formal general propositions, logically linked. Delattre (1979) claims that rational coherence must be an essential property of models. He states that rational coherence relates not only to the internal but also to the external discourse of the model. Internally the formal restricted discourse of the model must be coherent with the formal general discourse of the theory. Externally, coherence is related to the translation of observed phenomena into the theoretical language.

c) *models are built in order to answer 'a priori' specific questions about a real world situation:* For Thom (1979) it is possible to build an infinite number of different models for a specific real world situation. Questions *a priori* raised by the researcher restrain the choices in model building and may constitute an objective criterion to assess the usefulness of the model. Thom (1979) claims that a model is useful if it provides satisfactory answers to the questions that have motivated the modelisation. By satisfactory answers he understands: answers that allow us to predict or better understand the behaviour of the real world.

d) *models are incomplete representations of reality:* In developing models, modellers search for an adequate reduction of the complexity of the real world, able to provide them with a means of reflecting on reality.

3. DIFFERENT APPROACHES IN RAINFALL-RUNOFF MODELLING

There are many model classifications in the literature. They have been devised in order to simplify the overcrowded field of rainfall-runoff models (e.g. Clarke, 1973; Fleming, 1979). However, since we do not share the corporate point of view in this matter, we propose our own gross classification (table 1).

Table I - The main classes of rainfall-runoff modelling

CLASS → ATTRIBUTES ↓	Linear models	Conceptual Models	Physically Based Models
Example →	ARMA	Stanford Watershed Model	S.H.E.
Science involved →	Mathematics	Systems and Hydrology	Physics and Hydrology

Linear models benefit from a huge stock of mathematical tools. Thus, they may be very appealing and they have been the subject of a great deal of development. The hydrological concepts involved are rather poor however, and apart from a few derivatives such as C.L.S. (Todini and Wallis., 1977) hydrologists may feel very frustrated in using such black box models.

CRR models appear to be properly hydrological. Such a modelling consists of devising empirical mechanisms that succeed in mimicking the outputs of a catchment, given known inputs. Therefore, CRR models emphasize more the behaviour of hydrological systems than interpretations of why hydrological systems behave as they do, i.e. the dynamic mechanism governing the processes. "In the system approach one ignores the details that are too complex to be understood, not known, or simply unimportant. However, the important overall behaviour characteristics should be represented" (Kundzewicz and Duckstein, 1990). In this sense, CRR models are classified as phenomenological models, bringing them near to other physical phenomenological theoretical models, such as kinetic theory or electric circuits theory (see e.g. Kundzewicz, 1987).

CRR models are usually called conceptual to allow for their reference to some concepts of fluid dynamics which may foster the imagination required to yield adequate structures. But actually, physical "prejudices" may be very confusing and make model development inextricable. Moreover, putting some elements of physical knowledge in conceptual models is in no way a proof of good modelling because interactions with empirical parts of the models may be worse than working without inopportune physical specifications. CRR models may provide understanding of the lumped behaviour of a catchment, which has to be investigated as a unit. It is really the most prominent feature of CRR models to look for knowledge about a catchment thought of as a whole.

However, the phenomenological characteristics of CRR models are often seen as a limitation in the endeavour to improve scientific understanding of the hydrological processes (Klemes, 1982; Klemes, 1988; Dooge, 1988). Other limits of CRR models are indicated by several works in hydrology; for a synthesis see e.g. Beven, 1989. They report the dependence of CRR models on hydrological data series, known to present a low signal-to-noise ratio which may introduce uncertainties in parameter and structure identification; the risk of overparameterisation; the danger of oversimplifying spatial heterogeneities in system response when employing catchment average parameters, among other drawbacks.

PhB models, in a large sense, have been developed as an alternative to conceptual models, in order to cope with practical hydrological problems to which CRR models are supposed to be inadequate, e.g.: hydrologically effective changes in catchment characteristics (natural or man-made changes); spatially variable inputs and outputs; movement of pollutants and sediment; prediction of hydrological responses of ungaged catchments (Beven and O'Connell, 1982). Therefore, PhB models should be distributed in space, in contrast to CRR lumped models, and should employ only mathematical operations that have definite physical interpretations, in contrast to the empirical equations used in conceptual models. A model embodying all these characteristics, in principle, should not require parameter calibration (Bathurst, 1986).

PhB models sound more scientific (Beven, 1989). However, while differential equations are available for the treatment of very simplified systems, we sorely lack an accurate description of the natural system and its boundary conditions. Furthermore, it would be desirable to have mathematical tools able to cope with highly space-variable soil characteristics. Even in the case of representative and experimental catchments, we are very far from a satisfying description of the complex tri-dimensional space (and not only the surface) where fluid mechanics have to work according to the relevant boundary conditions. Moreover, the most difficult task is not identifying the sub-processes but making them interact in the proper way. Nevertheless, we must notice that PhB models often use empirical statements (e.g. one makes a wider use of the Manning-Strickler relationship than that of the turbulence theory) and do not eliminate the need for parameter calibration. Also, PhB models cannot eliminate a lumped treatment of grid scale spatial discretisation, as the physical equations employed generally derive from small scale homogeneous physical systems.

4. CRR MODELS IN THE CONTEXT OF HYDROLOGICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

4.1. The context of science

The objective of science is to produce understanding about the real world (Bunge, 1980; Chalmers, 1991; Klemes, 1988; Dooge, 1986 and others). While trying to meet this objective, scientists may perform an interactive strategy which includes proposition of hypotheses and theories concerning a real world situation and realization of planned experiments, as interactive activities. Although oversimplified and insufficient to explain completely the invention of sophisticated theories and progress in science, the above procedures seem to help scientists in their work as a strategy to produce

description and explanation about a specific real world situation, at least in physics and related sciences.

Thom (1974) states that explanation may be achieved by two approaches: the reductionist and the structural. In the reductionist approach, the objective is to establish the causal chains capable of explaining the behaviour of the phenomenon; it may be performed by looking for external as well as for internal causes. In the structural approach, the objective is to obtain a good reproduction of the system behaviour.

Hydrologists involved in the development of PhB models seem to adopt the reductionist strategy. Therefore, they are faced with the typical problems connected with it: difficulties in establishing the causal chains, mainly because causal agents are usually much more complex than the observed effects; difficulties in choosing and in justifying the adequate level of spatial and temporal description of subprocesses and difficulties in establishing and in justifying the interactions between the subprocesses.

In the absence of theories to support the change of scale (from global lumped to grid lumped), and to establish the causal chains, one may claim that the use of physically based equations is not enough to eliminate the conceptual nature of PhB models and to ascribe them a sounder scientific basis. Therefore, in incorporating non-verifiable physically based assumptions, PhB models are in danger of joining the group of very complex conceptual models that may not justify their level of complexity.

Hydrologists involved in the development of CRR models seem to adopt the structural strategy. Therefore, they are faced with the typical problems related to it: sterility, i.e. after having achieved a model structure the modeller may not see other ways forward than effecting small improvements in the structure and polishing accessory methodologies; s/he will also encounter difficulties in justifying lumped treatment of spatially distributed variables and parameters; and difficulties in justifying the chosen structure among innumerable other potential structures.

Because CRR models do not claim to explain physical processes occurring in catchments, they do not advance hypotheses about these processes. The consequences are: a low level of interaction between observation (hydrological measurement) and modelization; little use of information (contour, soil and vegetation maps, soil physics and plant physiology) other than hydrological series (Abbott et al., 1986); the risk of diverting attention from the investigation of hydrologic processes into improvement of model development methodology, which cannot improve knowledge about hydrologic processes (Klemes, 1982); and of developing models that are essentially unfalsifiable (Klemes, 1982).

Not one of the modelling approaches seems to meet satisfactorily the scientific objectives of hydrology. Therefore it is straightforward to conclude that there is insufficient knowledge of hydrological processes to allow for an adequate model development.

It is certainly beyond the objectives of the present work to address a panel on how to improve understanding in hydrology. However, we would like to reinforce the idea that for hydrology, as for natural sciences in general, the barriers for progress in scientific knowledge are closely related to the complexity of natural systems and the impossibility of developing completely controlled experiments. Turning to the history of science in order to search for examples of good achievements in the progress of science may be valuable if we do not forget to take into account the differences between objects of research, which usually imply different methodologies of research. Taking epistemological theories of scientific progress to evaluate progress in scientific hydrology may also be profitable if the reflection is a two-way process, i.e. if it also allows for criticism of epistemological models.

Whether CRR models could be an instrument to improve understanding of hydrological processes or, at least, be fruitful in proposing new problems are questions that we will address in the next sections.

4.2. The context of technology

In paragraph 4.1 we introduced the idea that the objective of science is to produce knowledge about the real world. Bunge (1980) states that the objective of technology is to control, transform or create things or processes. He claims that technologists have an opportunist concept of truth, in the sense that even in adopting realism they search for the level of explanation just sufficient to meet the technological objectives, in a specific situation.

This should not imply a refusal to employ new scientific achievements nor a refusal to collaborate in the improvement of knowledge, e.g. by proposing problems generated by practical activities. However, in choosing theories and models to be employed for solving technological problems, technologists should also consider criteria other than the truth contents of scientific theories, e.g. economic efficiency, effectiveness-to-complexity ratio and others.

At this point, we should consider some important problems in the theory of knowledge, e.g. what is truth, how to recognize truth and whether it is possible to propose criteria of truth. We would also examine whether the distinction between science and technology proposed by Bunge is adequate. Although important in the present context, these reflections would lead to a vast discussion certainly beyond the limits of this modest contribution.

Therefore, let us just establish some links between these reflections and the CRR modelling approach. The use of CRR models in hydrology is frequently justified by hydrologists in terms of their technological usefulness. Here we would like to outline two points:

a) *uncertainties*: Whatever the criteria employed by technologists to choose a model among the plethora of hydrological models, possibilities of assessing model uncertainties should be essential.

b) *instrumentalism*: Instrumentalism, a philosophical doctrine which claims that theories are rather instruments to explain the real world than constructs able to bring us nearer and nearer to a true understanding of the real world, seems to be similar to the way that technologists take into account scientific knowledge. The danger of instrumentalism is the refusal to improve understanding of the real world by a lack of speculation or invention. We should recognize the adequacy of the CRR modelling approach to Hydrology; nevertheless, this should not obstruct our looking for improvement of scientific knowledge.

In the case of PhB models, it seems to be utopian to talk about technological applications mainly in reason of a low effectiveness-to-complexity ratio.

5. A REFLECTION ON THE PERSPECTIVES OF THE CRR APPROACH - outlines for a research program on conceptual modelling

5.1. Some aspects of model development: the role of simplicity

One can find in literature many works asking for simplicity in CRR models development (Michel, 1983; Edijatno and Michel, 1989a; Naef, 1981; Mein and Brown, 1978). Nevertheless, this advice is seldom respected. Probably looking to ascribe a physical meaning to conceptual models, many modellers propose complex structures, employing a large number of parameters, that cannot be justified by the usually available information and by the effective knowledge of hydrological processes.

We should claim that the usual approach employed for model development is not relevant. This approach consists of enumerating the physical sub-processes that ought to be present in a conceptual model and of introducing empirical relationships likely to describe them. Having recourse to physical sub-process may be misleading since we emphasize those that are obvious (interception, ponding....) and over-simplify those which are hidden and which occur in unknown and intricate media: the various movements of water within the soils for example. If we succeed in devoting only a couple of parameters to each of these relationships we get a model with a score of parameters which is impossible to validate due to the limited amount of information usually available in data. Consequently, when it comes to conceptual modelling, we must not be bound to explicit reference to the physics and rather have to imagine proper devices that will prove efficient in reproducing discharges observed at the outlet of catchments. This implies a sort of lumping of sub-processes.

Therefore, when developing a conceptual model one has to face the difficult task of finding an efficient structure combining suitable mathematical tools with the help of very few guidelines in doing so. This difficulty has been very well described by Nash and Sutcliffe (1970) who indicated the two main prerequisites for such a modelling: (a) agreement on objective criteria for measuring the vicinity between observed and computed outputs; (b) investigation of all (or almost all) combinations of operators that may prove useful.

There are various reasons why CRR models have to remain very simple. Firstly, the limited quantity and quality data available can seldom support sophistication. Secondly, the possibility of predicting parameters for use in ungaged catchments would be doomed to failure in case of parameter proliferation. Thirdly the second prerequisite given by Nash and Sutcliffe would become intractable when developing an over-complex model. This prerequisite is an important means of verification and is therefore inescapable. The fourth and last argument in favour of simple models is connected with the problem of parameter identifiability. When a model becomes too complex redundancy arises among parameters and automatic optimization of these parameters is likely to fail. Parameter sensitivity analysis would seldom succeed with a too large a number of parameters (Mein and Brown, 1978). Such an analysis may appear to be another important mean of model validation and has to be carried out in approximately the same way as for linear regression models. The outcome of this analysis is a covariance matrix of the free parameters of the model. In developing simple models, one reduces the risks of overparameterisation and the danger of compensating previous wrong assumptions by new wrong assumptions, in the structure of the model.

5.2. The CRR approach and scientific theories: the case of the *ad hoc* hypotheses

Although phenomenological theories do not account for causal explanations, they do not deny them. In principle and for certain situations it is possible to establish hypotheses about hydrological processes by employing a conceptual model. Let us consider an example.

GR3J is a 3-parameter daily conceptual model developed by Edijatno and Michel (1989a) at CEMAGREF. Edijatno and Michel started with a 2-parameter model, one parameter associated with the moisture reservoir and the other associated with the routing reservoir. The inclusion of the third parameter was justified by the need to represent better catchment lag times, as becomes obvious after a survey over 120 catchments from different regions in France. GR3J provided good performance for the majority of the catchments used in the model development (see Edijatno, 1991; Edijatno and Michel, 1989a and Edijatno and Michel, 1989b). However, some small catchments drained by ephemeral creeks were poorly represented by the model.

Research into the specific reasons of the model failure and for possible changes in the model structure so that it includes the representation of these particular cases is being conducted. The first results indicate the need to include in the model a substructure

allowing for interbasin subsurface flow exchange. The hypothesis is that effects of moisture exchanges between neighbouring catchments and/or groundwater flow not contributing to the discharge at the catchment outlet are important phenomena in small ephemeral catchments. More than 40 different substructures have been tested (Nascimento, 1991a and Nascimento and Michel, 1991b). Figure 1 shows the current solution adopted, i.e. the model GR4J. Table 2 shows the evolution of some criteria of performance during calibration. Figure 2 shows some results of the simulation of an observed period.

The hypothesis reported above would fit well to "explain" the observed water balance, but it remains an *ad hoc* or at least an untested hypothesis. Of course, one may try to use other information such as cartographical or geological data (soil types, groundwater divide) from the catchments studied if available, in order to reinforce or reject the hypothesis. One may also propose an experimental scheme for testing it, but such a scheme seems to be much more difficult to achieve.

This example seems to indicate possibilities to employ CRR models interactively with other scientific sources of information for both a better understanding of hydrological processes at the scale of the catchment as a whole and a more effective modelling. However, it is important to point out that notwithstanding the results obtained in testing the advanced hypothesis, they do not ascribe a physical meaning to the model which keeps on being a conceptual model.

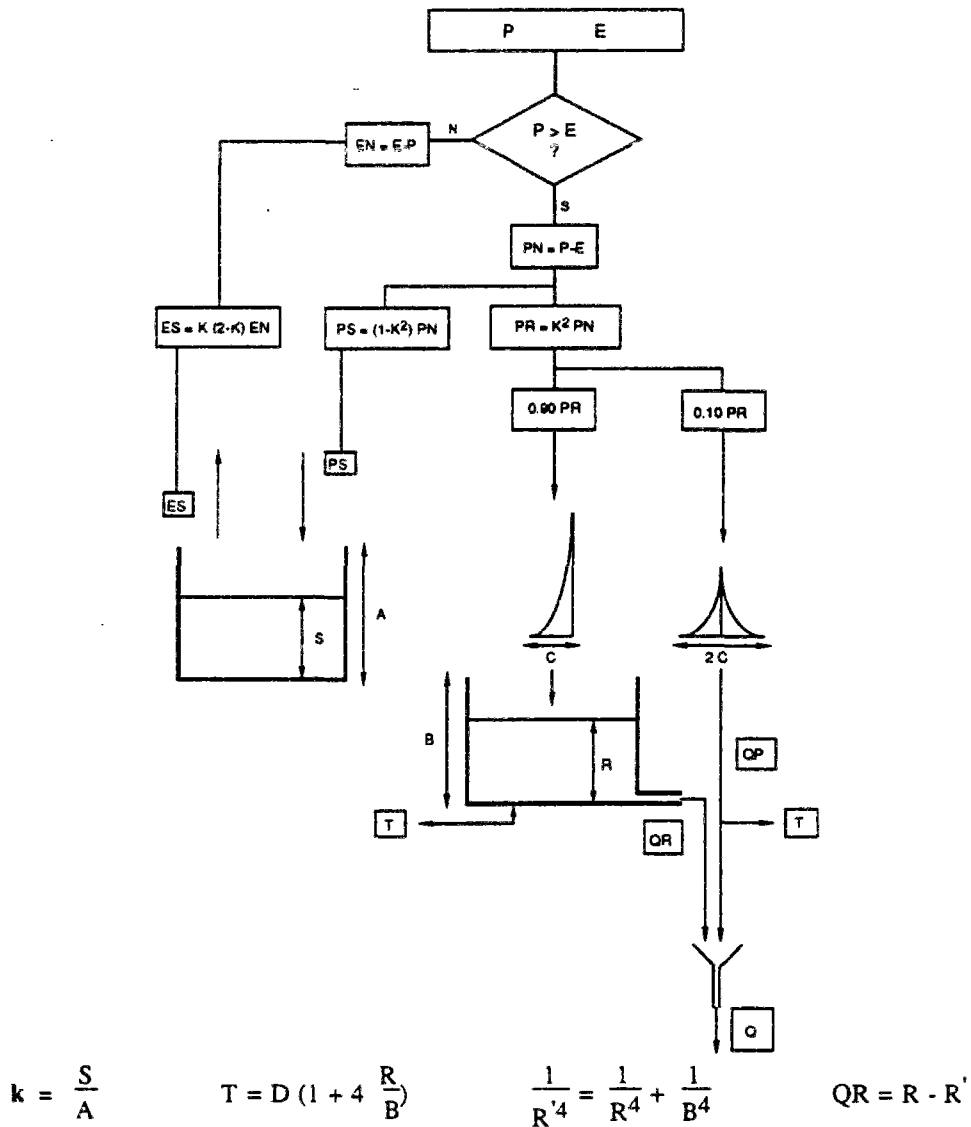


Figure 1 - The model GR4J.

**Table 2 - Results of Calibration:
GR3J and GR4J (present version)
mean and standard deviation of criteria / number of catchments: 8**

		criteria				
VER	STA	F	BILN	CRU	DRC	DRET
GR3J	M	57.2	-10.9	60.8	1.2	-0.2
	SD	32.1	32.0	24.3	0.4	0.2
GR4J	M	79.6	-3.6	87.2	1.1	-0.04
	SD	08.6	11.5	13.8	0.3	0.1

where VER: version; STA: statistics; M: mean; SD: standard deviation;

$$F = 100 \cdot \left\{ 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Q_{obsj} - Q_{calcj})^2}{\sum_{j=1}^N (Q_{obsj} - Q_{moy})^2} \right\};$$

$$BILN = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^N Q_{obsj} - \sum_{j=1}^N Q_{calcj}}{\sum_{j=1}^N Q_{obsj}}$$

$$CRU = 100 \cdot \frac{Q_{mcf}}{Q_{mof}};$$

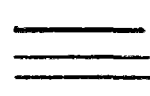
$$DRC = \frac{LHC}{LHO};$$

$$DRET = \frac{LLO - LLC}{N}$$

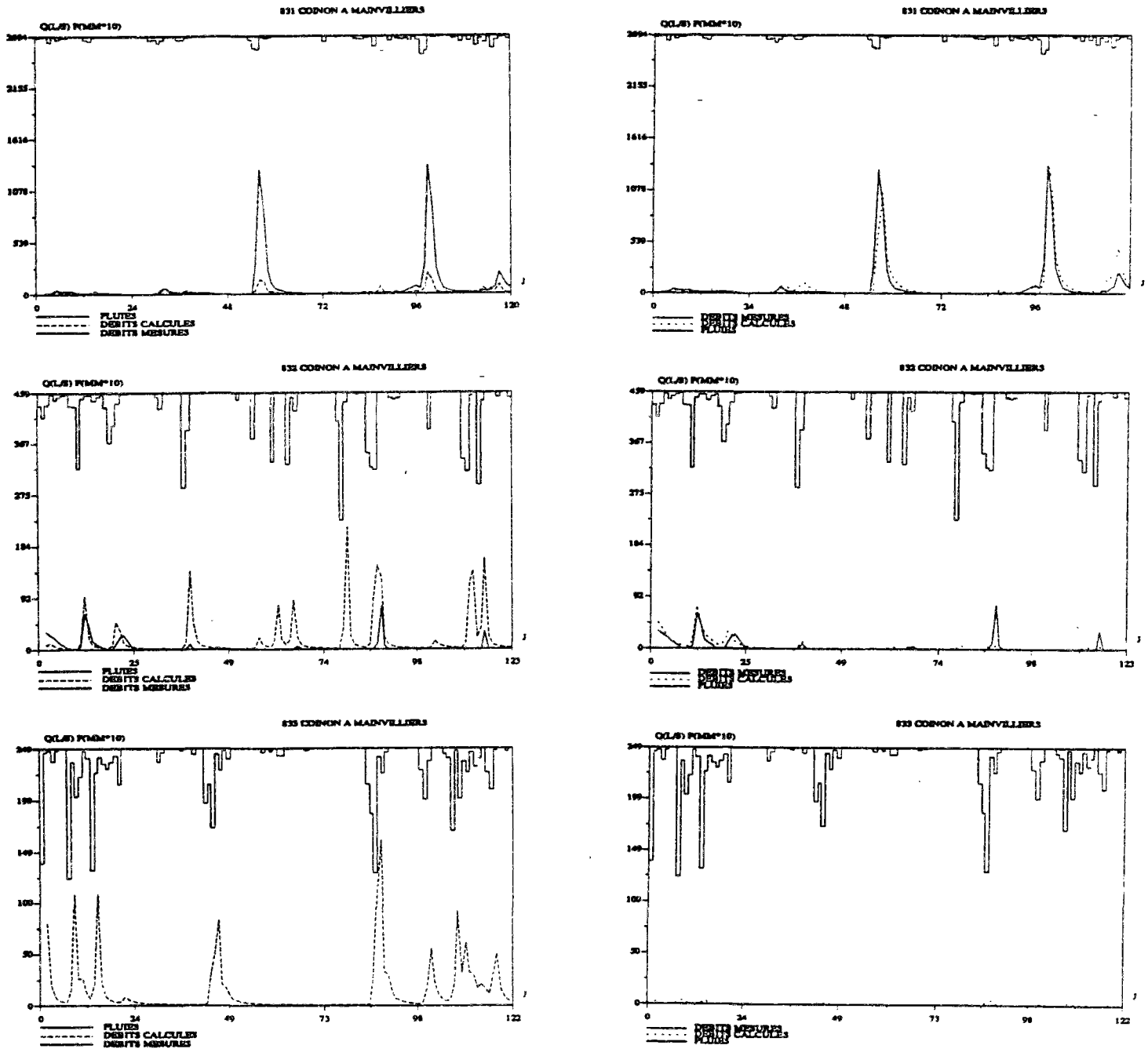
where

- F: Nash-Sutcliffe criterion
- BILN: streamflow balance error
- CRU: mean annual flood ratio
- DRC: flood duration criterion
- DRET: low streamflow duration criterion
- Q_{obsj} : observed streamflow for the day j
- Q_{calcj} : calculated streamflow for the day j
- Q_{moy} : mean observed streamflow
- Q_{mcf} : mean of the peaks of calculated floods over a threshold ($Q > 4.M$)
- Q_{mof} : mean of the peaks of observed floods over a threshold ($Q > 4.M$)
- M: mean annual streamflow
- N: length of concomitant observed and calculated streamflow series
- LHC: length of ($Q_{calc} > 4.M$) streamflow series
- LHO: length of ($Q_{obs} > 4.M$) streamflow series
- LLO: length of ($Q_{calc} < M/4$) streamflow series
- LLC: length of ($Q_{obs} < M/4$) streamflow series

Comparisons of 1 year of observed and calculated hydrographs for Coinon catchment at Mainvilliers ($s = 45 \text{ km}^2$) are shown in Figure 2. GR3J and GR4J were used to calculate hydrographs.



 rainfall
 observed hydrographs
 calculated hydrographs



a) GR3J (F = 5.4)

b) GR4J (F = 84.1)

Figure 2 - Observed and calculated hydrographs (1983)
 a) GR3J simulation; b) GR4J simulation. Coinon at Mainvilliers.

5.3. The CRR approach and scientific theories: learning through comparative analysis

The phenomenological approach is frequently considered as a first stage in building scientific theories. Therefore, a complete physically sound theoretical model, if available in hydrology, would validate an adequate CRR model.

Comparative analysis would then be very useful in establishing adequate levels of simplification for a particular application, e.g. by introducing simplified assumptions or by removing terms of less importance (Kundzewicz, 1986). "It may be possible to trade accuracy for complexity" (Kundzewicz and Duckstein 1990).

Nevertheless, we cannot find in the current state-of-the-art of modelling in hydrology, a model with the characteristics required to be used as the highest standard reference. It does not follow from this that comparative analyses are impossible or undesirable. On the contrary, the very few comparative analyses already performed in hydrology modelling seem to have produced important insights (see Naef, 1981; Edijatno, 1991; Kauark Leite, 1990).

As an example, let us present some results of a comparative analysis between the models CREC and GR3J, performed by Edijatno and Michel (Edijatno, 1991). GR3J has been summarily describe above. The CREC model is a 12-parameter CRR model. Both of them have been employed to model rainfall runoff process in the Seine river basin, for periods covering 3 years (calibration) and 6 years (validation). Evidently, the same automatic calibration procedures and criteria for performance evaluation have been used. The criterion of adjustment proposed by Nash and Sutcliffe appears among others used to validate both models. The evidence of the effectiveness of a very simple model is mentioned among the conclusions of the analysis.

Table 3 - Comparative analysis between the models
CREC (12 parameters) and GR3 (3 parameters)
Seine River Basin at Bar-sur-Seine (s = 2,340 km²)

	criteria	MODELS	
		CREC	GR3J
calibration (1960-1963)	F	73.4	71.5
	BILN	-0.3	-2.6
	CRU	82.4	98.4
validation (1952-1955)	F	74.5	70.9
	BILN	4.4	4.8
	CRU	87.5	91.4
validation (1974-1977)	F	72.7	72.6
	BILN	5.6	2.6
	CRU	91.4	100.0

(adapted from Edijatno, 1991)

Other analyses would also be performed, comparing models in different catchments and for different applications. We may hope to find some insights in the adequate level of complexity as well as in adequate particular model substructures.

5.4. Anthropogenic and natural nonstationarities

An additional level of complexity in the hydrological processes is due to their natural and induced (anthropogenic) nonstationarities. Coping with conceptual models is in no way an easy task on account of these problems. In fact, these difficulties are shared by all kinds of rainfall-runoff models.

It would be useful to list some reasons that make the task difficult:

a) *parameter uniqueness*: Sorooshian and Gupta (1983) report difficulties in obtaining a unique set of parameter values when using CRR model automatic calibration. This may constitute an obstacle in trying to follow CRR parameter shift during calibration of different stationary periods of a nonstationary series. We may be unable to establish the uniqueness of the set of parameter values for each period and, therefore, to relate nonstationarity to parameter change.

b) *measurement errors and modelling uncertainties*: Assessing measurement errors and modelling uncertainties are basic requirements for a research program on modelling nonstationarities. Basically, we must be able to distinguish catchment nonstationarities effects from measurement errors and modelling uncertainties effects.

c) *interruption in hydrological data series*: We frequently observe interruption in hydrologic measurement data series when catchments are submitted to changes capable of originating important nonstationarities, e.g. progressive urbanization; extensive drainage of agricultural lands or intensive irrigation.

While trying to overcome the present difficulties, we may start working with synthetic data series, for instance. Of course, it is essential to know the distribution of parameter values, the degree of interdependence of the parameters and to be able to perform a qualitative judgement about the model behaviour. In working with measured data series, beyond the evident identification of measurement errors, it seems to be necessary to develop more integrated experimental-modelling research programs. As stated in section 5.1, these kinds of analyses are feasible only when employing simple models, otherwise the modeller would not be able to relate the internal model behaviour to the generated outputs, therefore s/he would lose control of the model.

The above reported difficulties refer to the study of nonstationarities using CRR models and analysing parameter value changes. An obvious complementary problem is giving an explanation on changes in parameter values by relating them to a change in catchment's physical characteristics. This is also a difficult task, as CRR model parameters are seldom connected with specific physical catchment parameters. We hope to learn more about these questions, as they constitute a key part of our present program of research.

6. CONCLUSIONS

According to the present analysis, it seems possible to conclude that the CRR approach may still be part of a fruitful program of research in hydrology. The majority of the questions raised by the CRR approach are connected with model development strategy (the role of simplicity, comparative analyses), treatment of errors and uncertainties (the role of measurement errors on model structure and parameter identification) and enlargement of CRR model application fields (ungaged catchments, nonstationarities).

The catchment taken as a unit has to be considered as an object of scientific investigation. The CRR approach is likely to be the most suitable approach for such investigation, since we lack almost all the relevant information necessary in the PhB

approach. Moreover, the PhB approach has to get closer and closer to the real world in an endless and maybe disappointing process on account of its low effectiveness-to-complexity ratio.

CRR models present particular limits and drawbacks, most of them connected with their phenomenological characteristics. If the limits and drawbacks are well considered in model development and usage, CRR models may continue to contribute to hydrology in both scientific and technological contexts.

7. REFERENCES

- ABBOTT, M. B. et al. - 1986. An Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: Hystory and Phylosophy af a Physically-Based, Distributed Modelling System, Journal of Hydrology, n. 87, 45-59.
- BATHURST, J. C. - 1986. Physically-Based Dristibuted Modelling of an Upland Catchment Using the Système Hydrologique Européen. Journal of Hydrology, n 87, 79-102.
- BEVEN, K. - 1989. Changing Ideas in Hydrology - The Case of Physically-Based Models. Journal of Hydrology, n° 105, 157-172.
- BEVEN, K. J. et O'CONNELL, P. E. - 1982. On the Role of Physically-Based Distributed Modelling in Hydrology. Institut of Hydrology, Rep. n° 81, 36 p.
- BECK, M. B. - 1983. A procedure for modeling. In: Orlob, G. T. (ed), Mathematical modeling of water quality: streams, lakes and reservoirs, Wiley (IIASA), 11-41.
- BUNGE, M. - 1974. Teoria e Realidade. Perspectiva, São Paulo, 1974, 243 p.
- BUNGE, M. - 1980. Epistemologia : curso de atualização. Queiroz-EDUSP, São Paulo, 246 p. (brazilian edition of "Epistemología: Curso de Actualización", Ariel, Barcelona, 1980).
- CHALMERS, A. F. - 1991. La Fabrication de la Science. La Découverte, Paris, 167 p. (french edition of "Science and its Fabrication", Open University Press, Buckingham, 1990).
- CLARKE, R. T. - 1973. Mathematical Models in Hydrology. FAO Irrigation and drainage paper n.19. UNO-FAO, Rome.
- DANCHIN, A. - Placage et Modèles Totalitaires. In: Delattre, P. and M. Thellier (ed), Actes du colloque "Elaboration et Justification des Modèles: Applications en Biologie", Tome I, Maloine Editeur, Paris, 39-55.
- DELATTRE, P. - 1979. Le problème de la justification des modèles dans le cadre du formalisme des systèmes de transformations. In: Delattre, P. and M. Thellier (ed), Actes du colloque "Elaboration et Justification des Modèles: Applications en Biologie", Tome I, Maloine Editeur, Paris, 97-128.
- DOOGE, J. C. - 1986. Looking for Hydrologic Laws. Water Resources Research, Vol. 22, N° 9, 46S-58S.
- EDIJATNO - 1991. Mise au Point d'un Modèle Elémentaire Pluie-Débit au Pas de Temps Journalier, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, CEMAGREF, Antony, 625 p.
- EDIJATNO and MICHEL, C. - 1989a. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, N° 2, 113-121.
- EDIJATNO and MICHEL, C. - 1989b. Recherche sur la mise au point d'un modèle journalier pluie-débit pour les petis bassins non jaugés. Rap. au Min. Chargé de l'Env., DDP Service de l'Eau, CEMAGREF, Antony.
- FLEMING, G. - 1979. Deterministic models in hydrology. FAO irrigation and drainage paper n. 32. UNO-FAO, Rome.
- JACQUET, J. - 1984. Modélisation et stratégie de la mesure dans l'eau et dans l'air. La Houille Blanche, n. 1/2, 67-78.
- KAUARK LEITE, L. A. - 1990. Réflexions sur l'Utilité des Modèles Mathématiques dans la Gestion de la Pollution Diffuse d'Origine Agricole. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées / CERGRENE, Paris, 449 p.
- KLEMES, V. - 1982. Empirical and Causal Models in Hydrology. In Studies in Geophysics : Scientific Basis of Water-Resource Management, National Academic Press, Washington, 95-104.
- KLEMES, J. - 1988. A Hydrological Perspective. Journal of Hydrology, Vol. 100, 3-28.

- KUNDZEWICZ, Z. W. - 1986. The Hydrology of Tomorrow. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 31, 223-235.
- KUNDZEWICZ, Z. W. - 1987. On the input of systems science to Hydrology. *In Water for the Future : Hydrology in Perspective*, Proceedings of the IAHS Rome Symposium, IAHS Publ. n° 164, 331-339.
- KUNDZEWICZ, Z. W. et DUCKSTEIN, L. - 1990. Symbiosis Between Systems Engineering and Hydrology. *Water Resources Management*, Vol. 4, 161-173.
- MEIN, R. G. and BROWN, B. M. - 1978. Sensitivity of Optimized Parameters in Watershed Models. *Water Resources Research*, Vol. 14, n. 2, 299-303.
- MICHEL, C. - 1983. Que peut-on faire en Hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre?. *La Houille Blanche*, n° 1-1983, 39-44.
- MICHEL, C.-1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. CEMAGREF, Antony, 528 p.
- NAEF, F. - 1981. Can we model the rainfall-runoff process today?. *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 26, 281-289.
- NASCIMENTO, N. - 1991a. Adaptation d'un Modèle Conceptuel Journalier (GR3J) aux Bassins Versants de Cours d'Eau Intermittents. Mémoire de D.E.A., ENGREF/UPVM/ENPC-CERGRENE, Noisy-le-Grand, 89 p.
- NASCIMENTO, N. and MICHEL, C. - 1991b. Etude des Apports par Ruissellement de Zones Mixtes Urbaines et Rurales. Partie 2, Adaptation d'un Modèle Simple (GR3J) aux Bassins Péri-urbains. ENPC-CERGRENE, Noisy-le-Grand, 90 p.
- NASH, J. E. et SUTCLIFFE, J. V. - 1970. River Flow Forecasting Through Conceptual Models. Part 1, A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, n. 3, 282-290.
- ROCHE, P. A. - 1988. Les modèles. In: Valiron, F. (ed), *Gestion des Eaux: Automatisation, Informatisation et Télégestion*, Tome III, ENPC, Paris, 138-166.
- SOROOSHIAN, S. et GUPTA, V. K. - 1983. Automatic calibration of rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness, *Water Resources Research*, Vol. 19, N° 1, 260-268.
- THOM, R. - 1979. Modélisation et Scientificité. In: Delattre, P. and M. Thellier (ed), *Actes du colloque "Elaboration et Justification des Modèles: Applications en Biologie"*, Tome I, Maloine Editeur, Paris, 21-29.
- THOM, R. - 1974. *Modèles Mathématiques de la Morphogénèse*. Union Générale d'Editions, Paris.
- TODINI, E. and WALLIS, J. R. - 1977. Using C.L.S. for daily or longer periode rainfall-runoff modelling. In: *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*, Wiley, New York.

DEVELOPPEMENT, UTILISATION ET INCERTITUDES DES MODELES CONCEPTUELS EN HYDROLOGIE

DEVELOPMENT, USE AND UNCERTAINTIES IN CONCEPTUAL RAINFALL-RUNOFF MODELING

KAUARK-LEITE, Luiz Augusto*

NASCIMENTO, Nilo**

Résumé : Dans cet article nous proposons de mener une discussion sur le programme de recherche en modélisation conceptuelle, en hydrologie, afin d'en préciser les buts, les moyens utilisés pour y parvenir, le degré de succes qu'ils atteignent et d'examiner si ils constituent un cadre fécond permettant de contribuer au progrès scientifique. Nous le faisons en utilisant, comme élément de comparaison, un programme de recherche alternatif : les modèles fondés physiquement, car ces derniers ont été développés à partir d'une critique des modèles conceptuels et en adoptant une stratégie de recherche différente. La réflexion est réalisée en considérant les contextes scientifique et technologique d'utilisation des modèles.

Mots clés : Modèle conceptuel, modèle fondé physiquement, hydrologie, incertitude, gestion, ressources en eau, épistémologie.

SUMMARY : This paper addresses the conceptual rainfall-runoff (CRR) research program, in hydrology, in order to investigate whether it may still be a fruitful approach. A research program focuses on the theoretical basis, the hypotheses and guidelines, as well as the mathematical and experimental techniques, utilised by hydrologists while modeling hydrological processes. The paper first gives some baseline definitions, e.g. the definition of model, the properties and requirements that a model should meet (rational coherence, identifiability, unicity, agreement with experimental results, falsifiability, etc.) and sets out a panel of different research programs in hydrological modeling. Secondly, a comparative study is undertaken in which the CRR research program is considered alongside with physically based modeling (PhB) approach, in a comparative study. The rationale underlying the choice of the PhB research program for this comparative study is the fact that the latter has been developed as an alternative approach to the CRR research program which has been subjected to a number of criticism. Then, the set objectives, the model development methods, the validation procedures utilised, the uncertainties

* SAFEGE Ingénieurs Conseils, Parc de l'Île, 15-27 rue du Port, B.P. 727, 92007 Nanterre cedex.

** CERGRENE - Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion de Ressources Naturelles et de l'Environnement, La Courtine, 93167 Noisy-le-Grand cedex.

and the agreement between the results and the set objectives concerning both research programs are investigated. This analysis is followed by a reflection on the role of these two kinds of models in both the scientific and technological contexts. According to the present analysis, it seems possible to conclude that the PhB approach is more fruitful than the CRR approach, in the context of science, although fruitfulness does not assure by itself the success of a program of research. Indeed, the PhB models presently available still keep a strong conceptual background and moreover, they are characterised by their relative complexity, large number of parameters to be identified and data to feed them. Therefore, as they do not demonstrate better performances with respect to those of CRR models, their extensive use in the technological context does not seem justifiable. The CRR approach is less fruitful, in the scientific context, and unable to improve the understanding of the hydrological processes, beyond a phenomenological and global (lumped) point of view. In the technological context, only the CRR models can provide reasonable answers to a certain number of hydrological relevant questions. Nevertheless, result precision and reliability are dependent upon the model development, validation, and a judicious use of the criterion of simplicity.

Key-words : Conceptual rainfall-runoff models, physically-based based models, hydrology, uncertainty, water resources management, epistemology.

1 - INTRODUCTION

Le développement des études sur les systèmes complexes et particulièrement les milieux naturels (*e.g.* bassins versants, rivières, lacs, nappes, estuaires, ...) associé au développement de l'informatique et à la vulgarisation des ordinateurs a provoqué au cours des vingt dernières années une prolifération de modèles mathématiques dont la littérature des sciences de l'eau regorge. Cependant, il faut bien reconnaître que ces modèles n'ont pas toujours apporté ce qu'on attendait pour la connaissance ou pour la maîtrise des systèmes étudiés.

La diversité des points de vue, principalement en ce qui concerne les méthodes d'élaboration et de validation a parfois provoqué chez certains chercheurs et gestionnaires une suspicion bien compréhensible quant à l'intérêt des modèles en hydrologie (le terme hydrologie est utilisé, dans cet article, *lato sensu*, *i.e.* toute action, étude ou recherche qui se rapporte à l'eau, au cycle de l'eau et à leurs applications, ROCHE, 1986). La référence au modèle est encore maintenant trop souvent perçue comme un mode de justification commode. D'ailleurs, le mot "modèle" y est pour quelque chose car il suggère un être supérieur, plus élevé, que l'être modélisé. Une confiance excessive accordée aux résultats, ignorant les limites des hypothèses de l'exercice de modélisation est aussi préjudiciable qu'un scepticisme démesuré envers ce type d'outil, ignorant le potentiel d'utilisation effectivement ouvert par eux.

A l'heure actuelle on peut se demander si les échecs rencontrés dans les programmes de recherche sur la modélisation en hydrologie constituent simplement des difficultés contournables qui peuvent être appréhendées par exemple à partir d'une sophistication des modèles existants ou des méthodes auxiliaires, ou si ces échecs en arrivent au point de détruire la confiance dans ces programmes et à les placer en "état de crise". Nous entendons par programme de recherche les bases théoriques, les hypothèses et les principes, ainsi que les méthodes mathématiques et expérimentales utilisées par les chercheurs dans la modélisation des processus hydrologiques.

Dans cet article nous proposons de mener une discussion sur le programme de recherche en modélisation conceptuelle, en hydrologie, afin de préciser les buts, les moyens utilisés pour y parvenir, le degré de succès qu'ils atteignent et d'examiner s'ils constituent un cadre fécond permettant de contribuer au progrès scientifique.

Il nous a paru intéressant de le faire en utilisant, comme élément de comparaison, un programme de recherche alternatif : les modèles fondés physiquement (MFP), car ces derniers ont été développés à partir d'une critique des modèles conceptuels et en adoptant une stratégie de recherche différente.

2 - QU'EST-CE QU'UN MODELE ?

On peut dire de façon générale qu'un modèle n'est jamais un objet isolé. Il est toujours relationnel, modèle pour quelque chose, modèle de quelque chose, il renvoie à autre chose que lui-même. Sa raison d'être est de répondre au(x) problème(s) posé(s) : le modèle n'est rien d'autre que sa fonction (BACHELARD, 1979).

Comme le remarquait BACHELARD (1938), "les problèmes ne se posent pas eux-mêmes, toute connaissance est réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique". C'est la question qui doit déterminer la construction du modèle et non l'inverse et c'est le type de question qui restreint le mode de modélisation à choisir (THOM, 1979).

Au sens large, on définit un modèle par sa finalité comme tout moyen permettant de raisonner sur un (ou des) phénomène(s) en faisant appel à des entités ou à des processus élémentaires qui sont censés être à leur origine, ou qui permettent de les reconstituer par combinaisons ou assemblages (JACQUET, 1984 ; DELATTRE, 1979).

La description du comportement des systèmes complexes (e.g. le cycle de l'eau) pour peu que l'on veuille obtenir une certaine finesse ayant valeur explicative, c'est-à-dire, mettant en oeuvre les propriétés de leurs éléments constitutifs, aboutit très vite à une situation inextricable, même si l'on sait écrire les relations auxquelles obéissent les éléments. Le nombre élevé de variables et d'équations entraîne le plus souvent l'impossibilité pratique du traitement théorique. On risque d'arriver à la curieuse situation d'un personnage de BORGES et CASARES qui se propose de décrire le monde en tous ses détails et particularités et finit par se concentrer sur la description du coin gauche de son bureau. KARTVELISHVILI cité par KLEMES (1982) suggère que le développement d'une théorie causale adéquate des processus hydrologiques devrait être plus exigeant que la théorie de la relativité ou de la mécanique quantique.

Le modèle est donc nécessairement réducteur de la complexité naturelle. Il est une image de la réalité modélisée par oubli de nombreuses propriétés jugées non pertinentes pour les questions posées (ROCHE, 1988). Le choix des processus considérés comme élémentaires, et la combinaison qui en est faite, dépendent, d'une part des connaissances acquises antérieurement, et d'autre part des idées du modélisateur quant à l'origine des phénomènes, autrement dit de son imagination et de son intuition (DELATTRE, 1979). La représentation des phénomènes doit être inventée ne demandant pas plus ou moins d'observations mais un effort d'imagination. Ceci a été parfois l'origine de la méfiance vis à vis des modèles.

En pratique, on réalise un compromis entre la généralité (i.e. la propriété d'un modèle d'être transportable à d'autres systèmes du même type), le réalisme (capacité à décrire réellement le monde) et la précision pour rechercher une "représentation simplifiée d'un processus ou d'un système" (définition au sens scientifique du mot modèle dans le dictionnaire Robert).

Cette démarche de modélisation n'est pourtant pas dépourvue de balises ou de références. Des liens plus au moins étroits existent toujours entre le modèle en cours de développement et un groupe de théories existantes qui, soit avancent des hypothèses sur les phénomènes étudiés, comme par exemple l'ensemble des théories hydrologiques du cycle de l'eau, soit jouent un rôle de référence théorique générale, comme la théorie des systèmes dynamiques pour les modèles conceptuels. Un modèle est, à cet égard, une application de théories à une réalité spécifique. Pour les théories, les modèles offrent des possibilités de réalisation de nouvelles expériences et, dans certains cas, des possibilités d'extension à d'autres domaines d'application. Pour les modèles, les théories sont sources d'hypothèses sur la réalité à modéliser, elles offrent des possibilités d'échange d'outils mathématiques et expérimentaux entre applications différentes et donnent aux modèles un caractère général. Il peut évidemment arriver que, au cours du développement d'un modèle, des hypothèses originales conduisent à la proposition de théories nouvelles. En effet, cela n'est pas rare dans les domaines scientifiques où les interactions entre expérimentation et théorisation sont bien développées. Ces questions concernant les rapports entre théories et modèles sont discutées ensuite dans le cadre des propriétés requises des modèles.

3 - PROPRIETES REQUISES DES MODELES

avec du noir pour l

Il n'existe pas de méthode permettant de prouver que les théories scientifiques sont vraies ou même probablement vraies et il n'existe pas non plus de méthode permettant de prouver que les théories scientifiques ne marchent pas (CHALMERS, 1988). Comme l'a affirmé KUHN (1983) "*il n'y a pas d'algorithme neutre pour le choix d'une théorie, pas de procédure systématique de décision qui, appliquée à bon escient, doit conduire chaque individu du groupe à la même décision*".

A partir de ce constat et sans nous laisser piéger dans le relativisme du "tout est bon" de FEYERABEND, il existe des valeurs sanctionnées par la communauté scientifique, des critères métascientifiques, qui guident les chercheurs dans leur choix entre des voies concurrentes pour la construction d'une théorie. Bien qu'il n'y ait aucun processus de décision pour reconnaître la vérité, même approximative, d'une théorie, les chercheurs disposent de "symptômes" de vérité de caractère logique, sémantique, épistémologique, méthodologique et philosophique qu'ils emploient pour évaluer une théorie, parmi lesquels la cohérence rationnelle, la précision, l'identifiabilité, la minimalité, la falsifiabilité et le pouvoir de prévision que nous décrirons brièvement ensuite. Les chercheurs peuvent, par contre, les utiliser et les pondérer différemment et en conséquence opérer des choix différents dans une même situation concrète. Pour une discussion très complète des critères métascientifiques nous renvoyons à BUNGE (1961).

La pertinence de ces critères dans le cas de la modélisation en hydrologie dépend du contexte dans lequel sont utilisés les modèles : en science et en technologie. Toutefois, si les critères métascientifiques sont applicables indifféremment aux théories et aux modèles, l'invalidation d'un modèle particulier n'est presque jamais suffisante pour mettre en cause les théories sur lesquelles il se base, au moins dans le contexte de l'hydrologie. Elle peut, par contre, mettre en cause le modélisateur.

3.1 - Cohérence rationnelle

C'est, par définition, l'exigence première de tout discours scientifique. En fait, la rationalité nécessaire ne se limite pas à la cohérence interne du discours, fût-il mathématique. A partir du moment où ce que l'on dit doit s'appliquer à un certain domaine du réel, ce qui est bien le cas des modèles, la rationalité exige aussi, et surtout, la cohérence des transcriptions que nous faisons entre les objets ou phénomènes perçus et leur traduction dans le langage théorique choisi (cohérence externe). Les défauts de rationalité sont souvent subtilement cachés et sont en réalité beaucoup plus difficiles à déceler qu'il peut sembler à première vue. Par exemple, le traitement de certains systèmes dynamiques à l'aide de conditions de

stationnarité ou l'impact de la variabilité spatiale et temporelle des paramètres fondés physiquement demanderait en toute rigueur une vérification dont on se passe généralement.

3.2 - Ajustement aux données expérimentales

Il s'agit d'un critère de justification d'un modèle bien évidemment nécessaire mais qui n'est, tout aussi évidemment, pas suffisant. Pour qu'un modèle mathématique puisse être considéré comme un "bon" modèle, il ne suffit pas qu'il fonctionne bien. Il doit fonctionner bien pour de bonnes raisons. Il doit refléter, même sous une forme simplifiée, les caractéristiques essentielles du prototype physique qu'il est censé représenter (KLEMES, 1986). Les mauvaises raisons pour qu'un modèle en hydrologie fonctionne bien sont décrites dans un article remarquable de KLEMES (1982).

Si le caractère non suffisant de l'ajustement aux données observées est généralement reconnu, les conséquences de ce principe sur la pratique de la modélisation sont souvent négligées, le critère d'ajustement tenant fréquemment une place quasi-exclusive, mais non suffisante, dans les arguments de justification des modèles.

3.3 - Unicité et identifiabilité

Ce critère n'est en réalité qu'une autre manière d'exprimer le caractère non suffisant du précédent. S'il est possible de construire plusieurs modèles rendant compte d'un même phénomène, aucun d'entre eux ne peut être justifié sans l'intervention de facteurs autres que la simple adéquation aux données observées. En dernière instance, la justification implique d'une part d'aboutir à un modèle unique pour un niveau de représentation donné (unicité de la représentation du système) et d'autre part la possibilité d'ajuster les paramètres du modèle à partir de données expérimentales en obtenant un jeu unique de paramètres (identifiabilité des paramètres).

3.4 - Minimalité

Dans la lignée du rasoir d'OCCAM¹, (*i.e.* si un modèle simple suffit, aucun autre modèle complexe n'est nécessaire) la minimalité concerne l'économie des moyens utilisés (minimum du nombre de variables et paramètres), ou encore le principe de réduction de l'arbitraire (THOM, 1974). On remarquera toutefois que, en l'absence de ce caractère de minimalité, il deviendrait impossible d'imposer le critère précédent d'unicité. En effet, si un modèle de complexité donnée (entendue ici comme le nombre de variables et de paramètres) permet de rendre compte d'un phénomène, il est toujours possible de trouver une infinité de modèles plus complexes qui en rendent également compte. La minimalité et surtout l'unicité, sont les critères de justification dont le respect est souvent le plus difficile à démontrer.

La minimalité vise l'économie et non la pauvreté. On ne cherche pas la simple élimination des complexités mais la réduction prudente des redondances. Comme l'a signalé BUNGE, le rasoir d'OCCAM, comme tous les rasoirs, doit être manipulé avec précaution pour éviter de décapiter la science dans la tentative de couper quelques pilosités. Dans la science, comme chez le barbier, mieux vaut être vivant et barbu que mort et bien rasé.

¹ Guillaume d'OCCAM (1290-1349), né à Ockham, franciscain, enseignant à Oxford, fut un philosophe écossais de la première moitié du XIV^e siècle et développa une théorie de la connaissance qu'on appelle le nominalisme. Son "rasoir" est une lame qui tranche tout ce qui est inutile, excluant toute "pluralité de raisons". Cette image désigne en fait une règle de méthode qu'on appelle aussi principe d'économie, et qui s'énonce ainsi : "il ne faut pas multiplier les êtres sans nécessité".

3.5 - Falsifiabilité

La falsifiabilité concerne la possibilité d'introduire des hypothèses dans un modèle, en le modifiant, la validité de ces hypothèses devant pouvoir être confirmée par l'incidence directe ou indirecte sur les observables. Autrement dit, une hypothèse est falsifiable si la logique autorise l'existence d'un énoncé ou d'une série d'énoncés d'observations qui lui sont contradictoires, c'est-à-dire, qui la falsifieraient si ils se révélaient vrais. Ceci implique obligatoirement l'existence de relations biunivoques entre l'écriture des hypothèses et l'énoncé de leurs conséquences. Cela ne veut pas dire que, toute hypothèse concernant la structure interne d'un modèle particulier, se traduira par des conséquences vérifiables en pratique ; les moyens expérimentaux disponibles peuvent être pour cela insuffisants.

Toute hypothèse ou tout système d'hypothèses doit satisfaire une condition fondamentale pour acquérir le statut de loi ou théorie scientifique. Pour faire partie de la science, une hypothèse doit être falsifiable. Elle est d'autant meilleure qu'elle est plus falsifiable, mais elle ne doit néanmoins pas être falsifiée.

Il ne faut pas confondre la falsifiabilité d'une hypothèse avec les thèses falsificationnistes pour expliquer le développement de la science dont Karl POPPER est le porte parole le plus éminent. Le falsificationisme considère que le but de la science consiste à s'efforcer de falsifier des théories et que la science progresse par essais et erreurs, par conjectures et réfutations (POPPER, 1985).

3.6 - Pouvoir de prévision

Si les quatre premiers critères concernaient essentiellement la cohérence du modèle et des observations ayant servi à le construire, le pouvoir de prévision est lié à l'extension du domaine de validité. Un modèle nous apparaît d'autant mieux justifié que son champ d'applicabilité s'avère *a posteriori* plus large. Ici, l'argument fréquemment avancé selon lequel de simples modèles statistiques ou "boîte noire" étant souvent plus performants (notamment pour ce qui concerne la qualité de l'eau) que les modèles conceptuels ou les modèles fondés physiquement, une modélisation plus fine n'est pas justifiée, tombe, car la question ici n'est pas de prévoir précisément des conditions connues (données existantes), mais justement la crédibilité du modèle réside dans la prévision de situations inconnues (non contenues dans des séries disponibles).

4 - DIFFERENTS PROGRAMMES DE RECHERCHE DE MODELISATION EN HYDROLOGIE

Il est possible de trouver dans la littérature un grand nombre de classifications des modèles hydrologiques. Ces exercices (e.g. CLARK, 1973 ; FLEMING, 1979), dans la plupart des cas, visent à simplifier l'analyse des caractéristiques et à dégager les champs d'application des modèles, dans un univers surpeuplé de types et de versions. Nous proposons ensuite (tableau 1) notre propre classification quant à la valeur cognitive d'un modèle, qui bien que peu nuancée, est adaptée à nos besoins dans ce texte.

Un modèle est linéaire, dans le sens de la théorie des systèmes, si le principe de superposition est respecté. Le principe de superposition affirme que, si $y_1(t)$ et $y_2(t)$ sont les sorties d'un système correspondant aux entrées $x_1(t)$ et $x_2(t)$ respectivement, la réponse du système à une entrée $x_1(t) + x_2(t)$ sera $y_1(t) + y_2(t)$.

Dans le sens statistique, un modèle est dit linéaire si une variable de sortie, y , est liée à une variable de forçage, x , par une équation du type $y = a + b f(x)$. Le modèle est linéaire au sens statistique mais le principe de la superposition ne s'applique pas car $y_1 + y_2 \neq a + b f(x_1 + x_2)$. Cette non-linéarité est due à

un effet de seuil (caractéristique usuelle des processus hydrologiques) qui empêche la linéarité "systémique" des modèles hydrologiques.

Tableau 1 : Les principales classes de modèles hydrologiques

Table 1 : The main classes of hydrological modeling

CLASSE →	Modèles Linéaires	Modèles Conceptuels	Modèles Basés Physiquement	
			Mécanistes	Conceptuellement réalistes
ATTRIBUTS ↓				
Références scientifiques	Mathématiques	Théorie des systèmes et hydrologie	Physique et hydrologie	Théorie des systèmes et hydrologie
Exemples	ARMA	SWM et GR4	SHE	TOP Model

Les *modèles linéaires (ML)*, au sens statistique ou systémique, bénéficient d'une grande disponibilité d'outils mathématiques. Cela les rend très attractifs et explique en partie la concentration des efforts dans leur développement. Cependant, les concepts hydrologiques employés sont trop sommaires et, à part quelques cas, comme le C.L.S. (TODINI et WALLIS, 1977), l'utilisation de tels modèles ne contribue pas à mieux raisonner sur les phénomènes étudiés.

Quand la structure du système et les lois qui le régissent sont inconnues ou quand la mise en oeuvre d'un modèle fondé physiquement devient trop compliquée (en raison de l'incertitude et de la pauvreté des informations, et de la complexité des phénomènes lors de l'application en grandeur nature) on procède à une simplification du comportement du système. Les *modèles conceptuels (MC)* intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le *concept* physique du comportement du système par une représentation plus simple qui, bien qu'ayant un sens physique, est dépourvue de réalité physique.

Dans ce type de modélisation on essaie de construire des structures empiriques censées reproduire les sorties du système (e.g. le débit ou la concentration à l'exutoire des bassins versants) à partir des variables d'entrées (e.g. la pluie, l'évapotranspiration, la fertilisation, les pratiques agricoles, ...). Les MC accentuent donc la reproduction du comportement du système hydrologique plutôt qu'ils n'avancent des explications causales sur ce comportement, c'est à dire, sur la dynamique interne du système. Dans l'approche conceptuelle on ignore les détails qui sont trop complexes pour être compris, ceux qui sont inconnus ou tout simplement pas importants; il est nécessaire, cependant, que le comportement général soit reproduit (KUNDZEWICZ et DUCKSTEIN, 1990).

Les *modèles fondés physiquement (MFP)*, dans une large mesure, sont développés comme une alternative aux modèles conceptuels. D'après leurs concepteurs, ils sont censés rendre compte des problèmes pour lesquels les modèles conceptuels sont a priori jugés inadéquats, tels que : la prévision des effets de changements naturels ou anthropiques des caractéristiques physiques du bassin versant ; la variabilité spatiale des entrées et des sorties ; le mouvement des polluants et des sédiments ; la prévision des réponses pour des bassins non jaugés (e.g. BEVEN et O'CONNELL, 1982).

la x
et le tout

La caractéristique principale définissant les modèles fondés physiquement concerne leur capacité à attribuer un réalisme physique à la représentation du système. On peut distinguer deux types de modèles parmi les MFP : les modèles mécanistes (e.g. Système Hydrologique Européen - SHE, ABBOTT *et al.*, 1986a et b) et les modèles conceptuellement réalistes (e.g. TOP model, BEVEN et KIRKBY, 1979).

Les *modèles mécanistes* décrivent les mécanismes internes du système, se basant sur des lois de la mécanique, de la physique (e.g. conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement), de la chimie (e.g. équilibres chimiques et thermodynamique, cinétiques chimiques) ou de la biologie (e.g. lois de comportement et de croissance) et sur une parfaite connaissance de la structure physique du système. En théorie, ce type de modèles est indépendant du calage car tous les paramètres sont censés être mesurables.

Les *modèles conceptuellement réalistes* utilisent la théorie générale des systèmes pour représenter les sous-processus mais contrairement aux modèles conceptuels, ils tentent d'attacher une signification spécifique (physique, biologique, ...) aux sous-processus modélisés. Le terme réaliste est ici utilisé pour caractériser la volonté de lien avec l'objet réel.

5 - LES MODELES DANS LE CONTEXTE DE LA SCIENCE OU DE LA TECHNOLOGIE

Deux catégories d'utilisation des modèles peuvent être distinguées. Dans le contexte de la science, la synthèse architecturée de connaissances qu'offre le modèle et la possibilité d'une meilleure compréhension du comportement des systèmes naturels sont les motivations majeures.

Dans le contexte de la technologie, la meilleure représentation des relations cause-effet qu'offrent les modèles et leurs capacités de prévoir le comportement futur du système sont utilisées dans l'aide à la gestion et à la décision.

Nous allons ensuite discuter les mérites des différents programmes de recherche en modélisation hydrologique décrits dans le paragraphe précédent.

5.1 - Dans le contexte de la science

L'objectif de la science peut être défini comme l'amélioration ou la croissance continue de la connaissance sur le monde en formulant les généralisations qui régissent son comportement (e.g. DOOGE, 1986 ; KLEMES, 1988 ; BUNGE, 1980 ; CHALMERS, 1991). Dans la tentative d'atteindre cet objectif, les scientifiques doivent mener une stratégie interactive laquelle inclut la proposition d'hypothèses et de théories sur le monde réel, et la réalisation des expérimentations planifiées, toutes les deux menées de façon interactive. Bien que simpliste et insuffisante pour expliquer complètement le développement des théories sophistiquées et le progrès de la science, ces procédures semblent aider les scientifiques dans leur travail comme une stratégie pour décrire, expliquer et prévoir un aspect particulier du monde.

Pour ce qui concerne les sciences de l'eau on peut dire que l'objectif de l'hydrologie est de chercher les meilleures solutions à l'équation du bilan de l'eau (DOOGE, 1988) dans toute sa dynamique et la complexité des forces mises en jeu, dans tous les aspects quantitatifs et qualitatifs, dans le temps et dans l'espace, dans la métamorphose d'un état à l'autre, dans la complexité structurelle des environnements par lesquels l'eau trouve son chemin (KLEMES, 1988).

Pour caractériser complètement la science à une certaine étape de son développement, il faudrait donc caractériser la nature des techniques théoriques et mathématiques qu'elle inclut.

5.1.1 - Notion de niveau de la description

Parler de parties constitutives, de processus entre ces parties, de décomposition et de reconstitution, introduit naturellement la notion de niveau.

Un bassin versant, par exemple, peut être considéré comme un tout défini par un certain nombre de caractéristiques globales (e.g. le débit à l'exutoire, la superficie, ...) dont les variations ou la constance peuvent être observées et décrites dans diverses conditions d'environnement. Il peut aussi être vu comme constitué par l'air, la végétation, le sol, le sous-sol, la rivière, les lacs, ..., liés entre eux par certaines relations ou fonctions. De la même manière, l'attention peut se déplacer maintenant d'un constituant considéré globalement, par exemple le sol, aux particules de sable, de limon et d'argile qui le composent, ou encore d'une de ces particules aux minéraux qui la constituent. Dans tous les cas, il s'agit d'approches situées à des niveaux différents. Il est à noter que, dans cette acception, la notion de niveau se rapporte à un même domaine du réel appréhendé, soit globalement, soit selon des découpages plus ou moins fins en éléments constitutifs.

L'idée théorique essentielle, liée à la notion de niveau, est celle de la dimension de la description, qui correspond au nombre de variables indépendantes nécessaires pour rendre compte de ce que l'on observe. En principe, plus le niveau de description sera fin, c'est-à-dire plus il fera intervenir de types d'éléments distincts, plus il nécessitera de variables. La prise en considération simultanée d'au moins deux niveaux est en fait une nécessité liée à l'idée même d'explication. Le niveau le plus fin servant de support structural, causal et donc explicatif, à ce qui, au niveau plus grossier, apparaît comme purement sémantique, c'est-à-dire, descriptif.

L'augmentation de dimensions de la description, qui résulte de cette recherche d'explication, peut entraîner des difficultés insurmontables. Rendre compte de tous les aspects, qualitatifs et quantitatifs, du comportement d'un bassin versant, par exemple, par une description complète au niveau de chaque molécule d'eau, est une entreprise impraticable. Par ailleurs, on doit constater que le niveau qui donne la meilleure impression d'explication satisfaisante n'est généralement pas le plus fin de ce que l'on peut théoriquement envisager. En fait, le réductionnisme bien compris cherche à se fonder sur une description d'un niveau pertinent minimum à partir duquel il est possible de reconstruire le phénomène global étudié. Comme l'a affirmé THOM (1974), *"ce qui doit être considéré comme but essentiel de l'activité scientifique c'est la simplification de la description, la réduction de l'arbitraire dans la description"*.

Parallèlement aux recherches explicatives qui nous entraînent vers des niveaux de description de plus en plus fins, une nécessité opposée se fait également sentir. Il s'agit du développement d'études susceptibles de justifier la réduction de dimension des descriptions, compte tenu de la complexification souvent inextricable que provoquent les changements de niveaux envisageables pour améliorer le caractère explicatif des modèles.

5.1.2 - Réductionnisme et structuralisme en modélisation hydrologique

THOM (1974) indique que l'explication du monde peut être réalisée par deux approches : (1) réductionniste (réaliste d'après CHALMERS et représentationnel ou boîte translucide d'après BUNGE) et (2) structuraliste (instrumentaliste d'après POPPER et phénoménologique ou boîte noire d'après BUNGE).

Dans l'approche réductionniste les théories décrivent, ou visent à décrire l'objet réel. L'objectif est d'établir une chaîne causale capable d'expliquer le comportement d'un phénomène. Ceci peut être fait en regardant des causes aussi bien externes qu'internes.

Dans l'approche structuraliste l'objectif est d'obtenir une bonne reproduction du comportement du système par l'intermédiaire de dispositifs ou d'instruments capables de relier une série de situations observables à une autre. Les théories structuralistes ne contiennent toutes que des variables externes observables. Ce qui est essentiel dans l'approche structuraliste n'est pas tellement la restriction aux variables observables mais l'interprétation des variables internes soit comme des auxiliaires purement calculatoires dépourvus de toute signification spécifique (physique, biologique, ...) soit comme des caractéristiques globales du système.

Le structuralisme comprend également la notion de réalité, mais dans un sens restrictif. Les constructions théoriques, qui sont conçues pour nous donner une maîtrise expérimentale du monde observable, ne seront pas jugées en termes de vérité ou de fausseté mais plutôt en termes de leur utilité en tant qu'instruments.

La démarche scientifique n'est pas aussi dichotomique que nous venons de le présenter et il existe des théories semi-phénoménologiques intermédiaires entre les deux extrêmes. Le degré de "négritude" des théories varie selon l'aspect considéré. Par conséquent, on ne peut pas dire qu'une théorie *A* est plus phénoménologique qu'une théorie *B* mais plutôt que la théorie *A* est plus phénoménologique que la théorie *B* par rapport à un aspect *X*.

Dans le contexte de l'hydrologie, le développement de MFP adopte l'approche réductionniste. Ce programme de recherche est confronté à un problème classique lié à ce type d'approche, à savoir : (1) difficultés d'établir des chaînes causales car les objets qui apparaissent comme étant à l'origine sont beaucoup plus complexes que les effets observés, (2) difficultés de choix et de justification du niveau spatial et temporel adéquat de description des sous-processus, (3) difficultés d'établir et justifier les interactions entre sous-processus et (4) difficultés d'évaluer les paramètres en raison des minima locaux ou des zones d'insensibilité de la fonction critère de calage.

Le programme de recherche concernant les MC en hydrologie, moins ambitieux que la démarche précédente, adopte l'approche structuraliste. Ce programme de recherche à son tour est confronté à un certain nombre de problèmes : (1) faible fécondité car une fois le schéma formel mis en évidence il ne permet pas d'explorer d'autres aspects encore méconnus de la réalité, restant au chercheur seulement le travail d'apporter de petites améliorations à la structure du modèle ou d'affiner des techniques complémentaires, e.g. calage, (2) difficultés de justifier un traitement global des variables et paramètres spatialement distribués et (3) difficultés de justifier l'unicité du modèle par rapport aux innombrables autres structures potentielles.

5.1.3 - Critères pour juger du mérite d'un programme de recherche

Pour évaluer l'intérêt de ces programmes de recherche du point de vue scientifique il nous faut définir des critères. D'après LAKATOS cité par CHALMERS (1988), il existe deux critères principaux pour juger des mérites d'un programme de recherche :

- le programme doit posséder un degré de cohérence qui permet d'inclure la définition d'un programme pour la recherche future. Le degré de fécondité d'un programme indique à quel point il contient en lui des opportunités objectives pour son développement ou à quel point il ouvre de nouvelles directions de recherche. Il n'est pas possible de fournir les moyens de construire une mesure quantitative du degré de fécondité d'un programme. Cependant, il est souvent possible de faire des comparaisons qualitatives entre les degrés de fécondité de programmes de recherche rivaux.

- il faut compléter les considérations sur le degré de fécondité par une évaluation de leur succès effectif. Un programme de recherche doit conduire à la découverte de phénomènes nouveaux, au moins occasionnellement. Il existe un lien intime qui rattache les prédictions nouvelles et le degré de fécondité. Les confirmations des prédictions nouvelles peuvent elles-mêmes résulter en l'ouverture de nouvelles avenues pour la recherche future et c'est là que réside en partie leur importance.

5.1.4 - Les MFP en hydrologie dans le contexte de la science

Il nous semble difficile de prévoir les avancées scientifiques en hydrologie dues aux MFP compte tenu de la jeunesse de ce programme. Seul le recul permet de caractériser correctement les opportunités objectives et le degré de fécondité d'un programme de recherche.

Nous pouvons néanmoins apporter quelques commentaires sur l'approche réductionniste adoptée par ces modèles. Tant historiquement qu'épistémologiquement, il est généralement admis que l'approche réductionniste ouvre davantage d'opportunités de développement que l'approche structurale moins féconde (e.g. POPPER, 1985 ; THOM, 1974 ; BUNGE, 1964 ; CHALMERS, 1982).

Il est souhaitable qu'une théorie représente, ou mieux qu'elle reconstitue des événements et des processus réels et non qu'elle décrive simplement ses effets macroscopiques observables. Il existe plusieurs raisons pour préférer les théories réalistes à celles phénoménologiques (BUNGE, 1964) :

- l'objectif ultime de la science n'est pas de trouver des relations entre des données observables, mais d'organiser ces données en structures plus au moins formalisées qui les subsument et les expliquent (THOM, 1974) ;
- les théories réductionnistes sont plus cohérentes avec le savoir acquis (background knowledge) alors que les théories phénoménologiques sont *ad hoc* ;
- les théories réductionnistes ne sont pas limitées aux données observables disponibles mais elles sont aptes à prédire des faits nouveaux, inattendus. Le fait que les théories peuvent conduire à des prédictions nouvelles est embarrassant pour les structuralistes naïfs. Le fait que les théories, supposées réduites à de simples dispositifs calculatoires, puissent mener à la découverte de nouvelles sortes de phénomènes observables au moyen de concepts qui sont des fictions théoriques doit en effet leur apparaître comme un étrange accident, une coïncidence remarquable ;
- dans la mesure où les réductionnistes admettent que les représentations contenues dans leurs théories correspondent à ce qui existe réellement dans le monde, ces théories présentent plus de risques que les théories structuralistes d'être falsifiées ;
- pour prévoir l'impact des changements anthropiques (e.g. le drainage, les changements de pratiques agricoles ou l'imperméabilisation due à l'urbanisation) réalisés dans la structure physique du système modélisé (e.g. bassin versant), les modèles doivent avoir une propriété essentielle, à savoir, une relation quantitative établie entre les différentes actions sur le système et les paramètres (et/ou la structure) du modèle. en particulier dans les échelles pertinentes. Un MFP, si il est correctement validé par rapport à ces aspects, peut être capable de remplir de façon adéquate cette tâche. L'attitude scientifique consiste à le démontrer et à ne pas le prendre comme un *a priori*.

Cependant, un degré de fécondité élevé n'est pas suffisant pour assurer le succès d'un programme, car on n'aura jamais une garantie absolue que les opportunités porteront leurs fruits lorsqu'on les exploitera. Tout en ayant un haut degré de fécondité, il peut se faire qu'un programme n'aboutisse à rien.

Pour ce qui concerne donc les MFP, bien que l'on puisse leur accorder un degré de fécondité a priori plus élevé rien ne nous permet de conclure aujourd'hui à leur succès effectif sur cet aspect. A notre connaissance, il n'existe pas un seul exemple comme quoi un MFP ait contribué à l'amélioration d'un aspect particulier de la connaissance du cycle de l'eau.

Le fait d'utiliser des formulations physiques dans un modèle n'est en aucun cas suffisant pour garantir son réalisme physique et n'assure pas une validation *a priori*. En ayant recours à des lois développées dans des conditions expérimentales différentes de celles rencontrées dans le milieu naturel, pour construire un MFP, le modélisateur est obligé à faire des hypothèses concernant la description du milieu, l'échelle de validité des lois employées et la façon dont ces lois "travaillent" ensemble dans le milieu naturel. Toutes ces hypothèses qui constituent la structure même du modèle doivent être validées. Or le milieu naturel ne consiste pas en une juxtaposition de colonnes homogènes de sol travaillant indépendamment les unes des autres comme le suggèrent les modèles MFP mécanistes actuels.

Ces modèles nous semblent également discutables sous l'angle du critère de cohérence avec le savoir acquis. Par exemple, l'écoulement sub-superficiel non saturé peut représenter une fraction importante (sinon la plus importante) des écoulements dans un bassin versant (dont le cas extrême est représenté par les bassins drainés artificiellement). L'écoulement superficiel (écoulement hortonien) ne peut expliquer qu'une faible composante de l'écoulement d'un bassin versant. Or la manière par laquelle on modélise les différents cheminements de l'eau dans le bassin versant aura une importance majeure dans la représentation du transport des polluants dissous et en suspension. Ceci nous amène à nous interroger sur le succès éventuel d'une modélisation du transport de polluants basée sur une représentation du cycle de l'eau qui ne prendrait pas en compte les écoulements sub-superficiels en zone non saturée.

Un autre problème auquel sont confrontés les MFP en hydrologie concerne l'identifiabilité des paramètres du modèle. En effet, les valeurs des paramètres de ce type de modèles devraient être mesurées directement sur le terrain mais le coût d'une telle opération pour tous les paramètres rendrait l'utilisation des modèles mécanistes impraticable. Il est donc nécessaire de réduire le nombre de mesures directes des paramètres sur le terrain et d'employer davantage de méthodes indirectes d'évaluation.

En dehors des incertitudes dues aux méthodes indirectes d'évaluation des paramètres, le problème de la représentation de la mesure ou de l'estimation des paramètres par rapport à l'échelle des mailles utilisées par le modèle demeure. En fait, les paramètres du modèle doivent être définis à l'échelle des unités élémentaires de discrétisation, lesquelles, par des contraintes de calcul, varient de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres, dépendant du modèle et du cas d'application. Dans la plupart des cas, l'échelle de discrétisation est largement supérieure à l'échelle usuelle des mesures. Par exemple, pour des paramètres du sol, elle peut varier de quelques centimètres à environ deux mètres maximum.

La différence entre ces échelles peut être importante dans la compréhension des relations entre la valeur du paramètre mesuré (ou estimé) et la valeur équivalente appropriée à l'échelle du modèle. Une hypothèse fondamentale des modèles mécanistes en hydrologie est que la solution des équations descriptives des phénomènes avec les paramètres à l'échelle de l'unité élémentaire de discrétisation du modèle est une approximation adéquate de la réponse réelle du système avec ses hétérogénéités à une plus petite échelle.

Si cette propriété d'équivalence ne peut pas être vérifiée dans la représentation des systèmes hétérogènes, les modèles mécanistes auront une capacité prédictive limitée. BINLEY *et al.* (1989a et

1989b), par exemple, ont étudié l'impact (théorique) de l'hétérogénéité de la conductivité hydraulique (paramètre dominant) sur la réponse du modèle SHE sur une surface réduite discrétisée très finement. Les résultats suggèrent que l'hétérogénéité et la dépendance spatiale affectent la réponse moyenne en termes de débit de pointe et de volume de l'écoulement superficiel. Par ailleurs, bien qu'un paramètre "équivalent" (*i.e.* obtenu par calage) ait pu être trouvé pour représenter la réponse pour des sols très perméables, il n'a pas pu être obtenu explicitement par une analyse statistique de la distribution (*i.e.* pas de relations entre la valeur équivalente du paramètre et les moments de la distribution statistique du paramètre).

Pour des sols peu perméables, caractérisés par un "écoulement superficiel" important, une unique valeur "équivalente" du paramètre capable de représenter les composantes superficielles et souterraines de l'écoulement n'a pu être trouvée. Comme l'a souligné BEVEN (1989), ceci est suffisant pour conclure que l'actuelle génération de modèles mécanistes du cycle de l'eau n'est rien de plus que de simples modèles conceptuels globaux, avec l'inconvénient d'avoir plusieurs paramètres à caler pour chaque maille ce qui est impossible à réaliser.

Enfin, il faut signaler les problèmes concernant les données pour la validation des MFP. Un modèle dont l'objectif est de décrire et expliquer la réalité du cycle de l'eau sur plusieurs de ses aspects exige de déterminer le domaine d'application en le soumettant rigoureusement et impitoyablement à une batterie de tests. Il faut que ces modèles, par exemple, soient validés non seulement en fonction de leur capacité à simuler la réponse globale du bassin à l'exutoire mais surtout par rapport à la justesse du réalisme physique de chacun des sous-modèles.

Dans le domaine scientifique, la production de données expérimentales pertinentes n'est certainement pas chose simple. Des résultats expérimentaux objectifs ayant une nette incidence sur notre évaluation d'énoncés scientifiques peuvent être obtenus mais ceci implique des programmes de recherche expérimentaux qui demandent des ressources financières très importantes. Il nous semble que les intérêts à court terme des principaux bailleurs de fonds de la recherche dans le domaine de l'eau sont incompatibles avec le long terme de la recherche scientifique et que ces financeurs n'ont pas la mesure exacte des ressources financières nécessaires.

5.1.5 - Les MC en hydrologie dans le contexte de la science

Comme les MC ne prétendent pas expliquer ce qui se passe réellement dans la nature, ce n'est pas une caractéristique intrinsèque d'avancer des hypothèses sur les processus physiques du cycle hydrologique. Les conséquences sont : (1) une faible interaction entre l'expérimentation et la modélisation, (2) une faible utilisation des informations autres que les séries de données hydrologiques (*e.g.* carte d'occupation du sol, type de sol, topographie, ...), (3) le risque d'orienter la recherche des processus hydrologiques vers l'amélioration de la méthodologie de développement des modèles laquelle ne peut pas augmenter la connaissance de ces processus et (4) le développement de modèles qui essentiellement ne sont pas falsifiables.

Bien que les MC ne prétendent pas donner d'explications causales, ils ne les excluent pas et l'approche structurale n'est pas incompatible avec la causalité. Dans certains cas les modèles conceptuels peuvent interagir avec des hypothèses réalistes permettant d'une part de mieux raisonner sur les vrais mécanismes hydrologiques et d'autre part d'améliorer la précision de la modélisation conceptuelle. NASCIMENTO et MICHEL (1992) donnent un exemple de cette interaction.

Le modèle GR3 est un modèle conceptuel de simulation de la transformation pluie-débit à trois paramètres développé par EDJATNO et MICHEL (1989) et testé sur plus de 120 bassins versants en France avec de bons résultats. Toutefois, dans l'étude de petits bassins versants intermittents, les

résultats du modèle apparaissaient assez décevants. Les recherches pour améliorer la précision du modèle ont conduit à inclure une sous-structure pour représenter les échanges de l'eau interbassins (un paramètre de plus). L'hypothèse réaliste avancée consiste à penser que les écoulements sub-superficiels et/ou les écoulements souterrains entre des bassins adjacents ne contribuant pas au débit à l'exutoire d'un bassin constituent un phénomène hydrologique important dans les petits bassins intermittents.

Cet exemple illustre les possibilités d'interaction entre les modèles conceptuels et les représentations fondées physiquement mais l'hypothèse avancée ci-dessus reste *ad hoc* ou tout au moins une hypothèse non validée. Il est important de signaler que malgré l'amélioration des résultats obtenue avec l'hypothèse avancée, ceci ne confère pas de signification physique au modèle qui continue à être conceptuel.

En dépit de ce type d'interaction féconde entre les MC et des hypothèses réalistes sur les processus hydrologiques, la contribution des MC à l'amélioration de la connaissance sur le cycle de l'eau reste très modeste tant du point de vue de la fécondité du programme pour la recherche future que de sa capacité de prévision de phénomènes nouveaux. Il nous semble que, jusqu'à présent, la plus grande contribution des modèles conceptuels dans le contexte de la science soit leur capacité d'aider les chercheurs à raisonner sur les processus hydrologiques complexes.

5.2 - Dans le contexte de la technologie

Selon BUNGE (1980), la technologie a pour objectifs de contrôler, transformer ou créer des choses ou des processus, naturels ou sociaux. Il affirme aussi qu'en technologie on utilise un concept opportuniste de la vérité. En fait, même en adoptant une approche réaliste, on cherche un niveau de description et d'explication de la réalité juste suffisant pour rendre compte des objectifs technologiques. Pour choisir des théories et des modèles adéquats à la solution d'un problème technologique particulier, on doit considérer d'autres critères que le "contenu de vérité" des théories scientifiques, tels que le rapport efficacité/complexité, des critères économiques, des critères liés à la précision et aux risques technologiques de différentes natures, entre autres.

En extrapolant cette réflexion, on pourrait affirmer que s'il s'avère empiriquement qu'un modèle simule avec une très bonne exactitude, sans que nous comprenions pourquoi, il n'y a aucune raison de renoncer à se servir de cet accord inexplicable à des fins pragmatiques (THOM, 1979). Dans le contexte de la technologie un critère universel permettant d'évaluer les mérites relatifs des modèles serait la capacité à résoudre des problèmes. Il est facile de voir que, même dans le contexte technologique, ce propos est contradictoire avec une affirmation antérieure établissant qu'il ne suffit pas qu'un modèle marche bien, il faut encore qu'il marche bien pour de bonnes raisons. A ce point de la réflexion il nous semble utile de regarder un peu le rapport entre la science et la technologie.

Le sens commun semble voir le rapport entre la science et la technologie comme unidirectionnel, de la science vers la technologie. En effet, à l'heure actuelle, la coopération entre les ingénieurs et les scientifiques, par exemple, pour construire des outils expérimentaux ou des codes informatiques ou pour le développement d'applications des résultats de recherche, constitue des voies de communication bien établies, dans les deux sens. La technologie a souvent joué un rôle vital pour l'émergence de nouvelles sciences ou pour la proposition de nouveaux sujets de recherche dans des domaines scientifiques déjà établis. Selon KUHN (1983), la technologie constitue une source facilement accessible de faits qui n'auraient pas pu être découverts accidentellement. Pour lui, le caractère général de la science enrichit les solutions et les résultats obtenus dans le contexte technologique et les rend plus puissants, car exploitables hors des conditions originaires de développement. BUNGE, par exemple, considère la compatibilité avec la connaissance scientifique, à un moment donné, comme critère de définition de la technologie.

Par contre, il peut y avoir des cas où ces échanges ne se font pas de façon adéquate, conduisant à une situation d'atrophie, comme par exemple quand les applications techniques prennent le dessus sur la recherche plus fondamentale. C'est une des conclusions de KLEMES (1986) concernant la modélisation en hydrologie. Il affirme que les facilités de construction des modèles, apportées par le progrès en informatique, et la concentration des recherches dans la solution de problèmes liés à l'exploitation des ressources en eau, ont conduit l'investigation scientifique à une situation d'atrophie qui, à l'heure actuelle, empêche même le développement adéquat de la technologie hydrologique.

A notre avis, cela peut être la conséquence de l'adoption, dans le contexte technologique, d'une attitude instrumentaliste naïve qui ne voit les théories que comme des instruments pour décrire la réalité au lieu de les prendre comme des constructions aptes à nous fournir progressivement une meilleure connaissance de la réalité. Une telle attitude peut conduire à un manque de spéculation et d'invention, à une attitude anti-scientifique et comme résultat à la stagnation technologique. En adoptant l'approche conceptuelle on est probablement plus susceptible de tomber dans ce piège.

Il est bien clair que l'on peut développer et utiliser des MC pour d'autres raisons, comme par exemple le constat d'une insuffisance de connaissance des processus physiques et de moyens technologiques et financiers pour adopter une approche de modélisation fondée physiquement. De plus, l'utilisation de MC dans le contexte technologique est bien justifiée, car ces modèles répondent de façon adéquate à plusieurs problèmes pratiques, comme on le verra par la suite. Par ailleurs, si ils ne permettent pas une connaissance détaillée des processus hydrologiques, une réflexion sur les phénomènes hydrologiques à l'échelle des bassins versants est toujours possible en utilisant ce type de modèles comme nous l'avons vu précédemment.

Par contre, nous estimons que les efforts de développement de nouveaux modèles conceptuels n'ont été que rarement suivis par la réalisation de tests et d'analyses d'erreurs adéquats, ainsi que d'études comparatives en nombre suffisant pour dégager les structures les plus efficaces et les solutions les plus fiables. Le manque de ce genre d'étude rend difficile l'utilisation, dans des conditions les plus correctes, des MC.

Un autre aspect à considérer de l'utilisation des MC dans le contexte technologique concerne la prévision des conséquences d'interventions anthropiques sur le fonctionnement du système. En effet, bien que l'approche conceptuelle ne soit pas incompatible avec la possibilité de prévision, il est fondamental que les MC soient validés sur cette capacité. Il y aurait le plus grand danger à d'extrapoler la validation ayant lieu sur des conditions stationnaires observées à des conditions non stationnaires. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

Pour ce qui concerne les applications technologiques des MFP, les difficultés décrites dans le paragraphe 5.1.4 pour évaluer les valeurs des paramètres des modèles montrent qu'ils restent conceptuels avec l'inconvénient de faire appel à un calage très lourd d'innombrables paramètres. Par conséquent, comme les MFP ne présentent pas une précision supérieure aux MC ils n'offrent aujourd'hui aucun intérêt d'application technologique. La question qui se pose est de savoir s'il est utopique d'envisager l'utilisation des MFP pour des applications techniques.

6 - UTILISATION ET INCERTITUDES DES MODELES EN HYDROLOGIE

Les MC et les MFP adoptent au départ une interprétation parfaitement déterministe des processus ou phénomènes hydrologiques. Cela veut dire qu'ils fournissent toujours les mêmes valeurs des variables de sortie, pour les mêmes valeurs des variables de forçage et pour un état du système et un jeu de paramètres donnés. Ce comportement parfaitement déterministe n'est pas rencontré dans le système bassin versant réel, ou du moins on n'est pas en mesure de le démontrer à partir des données

expérimentales disponibles. Est-ce que cela signifie que l'on est obligé d'abandonner la quête d'un déterminisme intrinsèque des processus hydrologiques ? A cette question les modélisateurs des MFP répondent évidemment par la négative. Chez les modélisateurs conceptuels la réponse est également négative, mais cette fois plus nuancée, car c'est justement le scepticisme concernant les possibilités d'expliquer par un modèle les processus hydrologiques, qui justifie l'adoption, par ces derniers, d'une stratégie phénoménologique comme on l'a vu dans les paragraphes précédents.

De toutes façons, pour garder une interprétation déterministe des processus hydrologiques (MFP), ou des phénomènes (MC), il faut bien considérer qu'entre les modèles et la réalité il doit y avoir un certain nombre d'inconnues. En effet, le bassin versant représenté par les modèles est différent, mais pas beaucoup, tout au moins on l'espère, du bassin réel. Les différences entre les deux bassins mettent en évidence une connaissance incomplète du modélisateur vis à vis de la réalité. La question qui s'impose par la suite concerne donc la nature de cette connaissance incomplète, à savoir : les origines, les ordres de grandeurs et les conséquences qu'elle entraîne sur la modélisation.

La connaissance incomplète, quelle que soit l'approche de modélisation, va se traduire par une incertitude sur les valeurs calculées par les modèles. En termes quantitatifs, par la différence entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. La connaissance incomplète s'assimile ainsi à l'erreur du modèle.

L'incertitude au singulier est, en effet, une synthèse des incertitudes au pluriel associées aux variables d'entrée et de sortie, aux paramètres du modèle et à l'inadéquation du modèle lui-même. Cependant, l'analyse des incertitudes est difficilement capable d'attribuer le juste poids à chacune des sources d'erreurs sur la sortie du modèle (KAUARK-LEITE, 1990). Le caractère interactif des incertitudes est mis en évidence, par exemple, pendant le calage du modèle, où l'incertitude sur les paramètres est à la fois fonction des erreurs sur les variables de forçage et de sortie, de l'inadéquation du modèle et du processus de calage.

Les erreurs sur les variables de forçage et de sortie (valeurs mesurées) ne présentent pas un caractère purement aléatoire. Par exemple, les mesures de pluie par pluviomètre ne sont pas indépendantes de la vitesse du vent, la variance des débits obtenus en passant par une courbe de tarage n'est pas stationnaire par rapport à la hauteur d'eau mesurée. Il reste encore les erreurs associées à l'interpolation ou à la description par moyenne dans l'espace des variables et des paramètres mesurés ponctuellement, que ce soit à l'échelle du bassin versant, ou à l'échelle d'une maille de discrétisation. Surtout dans le cas des MC, l'autocorrelation et l'hétéroscédasticité (non stationnarité de la variance) des erreurs à la sortie, ainsi que les difficultés pour l'identification des paramètres découlent, en partie, des incertitudes liées aux valeurs mesurées.

Dans le cas des modèles conceptuels, les incertitudes dues à l'inadéquation du modèle ont souvent pour origine un essai de conceptualisation d'une finesse non justifiée des phénomènes modélisés. Cela dépasse généralement l'information disponible dans les séries de valeurs mesurées et crée, soit de fortes interactions entre les paramètres, soit des paramètres non sensibles au phénomène modélisé. Il est évident que les efforts pour construire des modèles à peu de paramètres peuvent minorer ces problèmes mais ne constituent pas une garantie de réussite. Il faut encore que la structure du modèle, c'est à dire les équations qui décrivent les phénomènes soit adéquate. Par exemple, les réservoirs à plusieurs sorties produisent des discontinuités qui peuvent rendre difficile le processus de calage et donc augmenter l'incertitude.

Dans le cas des MFP, les problèmes d'inadéquation sont plutôt liés à l'adoption de représentations théoriques inadéquates des processus physiques, comme dans le cas d'utilisation de l'écoulement hortonien, et à une description très insuffisante du milieu où aux changements d'échelle arbitrairement introduits et incompatibles avec les conditions de développement des lois physiques concernées.

Finalemeht, les incertitudes associées aux valeurs des paramètres, pour les modèles conceptuels, sont liées aussi bien à celles discutées ci-dessus qu'à celles introduites par le processus de calage. En essayant de réduire la subjectivité du calage manuel, on adopte souvent dans le calage automatique, la minimisation des écarts quadratiques entre les valeurs calculées par le modèle et celles mesurées à la sortie du bassin versant. Or, les modèles conceptuels sont en général non linéaires par rapport aux paramètres. L'adoption du calage par moindres carrés associée aux problèmes d'autocorrelation et d'hétéroscédasticité des erreurs résulte en une augmentation du risque de maxima locaux, et peut rendre les analyses de sensibilité et d'incertitude des paramètres non valables (e.g. SOROOSHIAN et DRACUP, 1980 ; KUCZERA, 1983, ...).

En choisissant une perspective d'application technologique, l'intérêt de l'utilisateur, et plus particulièrement du décideur, d'obtenir comme sortie d'un modèle des fourchettes, des intervalles de confiance, plutôt que des valeurs absolues doit aussi être considéré. En plus, cela suppose que des méthodes appropriées à la prise en compte des incertitudes dues à la modélisation hydrologique, associées à d'autres sources d'incertitudes relatives au problème étudié soient disponibles.

6.1 - Gestion quantitative des ressources en eau

L'utilité des modèles pour la gestion quantitative des ressources en eau découle de leur capacité de simulation. La simulation, dans le sens propre à la modélisation hydrologique, concerne le calcul de la réponse d'un système hydrologique à une série d'événements, pendant un intervalle de temps établi préalablement (VIESSMAN *et al.*, 1989).

Les problèmes typiques de gestion quantitative des ressources en eau auxquels les modèles hydrologiques peuvent donner des réponses satisfaisantes sont :

- ***l'extension de séries de données hydrologiques*** : les modèles peuvent générer de longues séries de données hydrologiques, normalement de débits, soit pour permettre un traitement statistique des données, nécessaire à certaines méthodes de calcul de structures hydrauliques, et à l'analyse de risque, par exemple, soit pour permettre l'évaluation des ressources en eau pour différentes applications (e.g., l'approvisionnement en eau, l'irrigation, la génération d'énergie, ...);
- ***le diagnostic*** : on peut utiliser les modèles pour le diagnostic du fonctionnement d'une structure hydraulique de contrôle ou d'un aménagement, de l'efficacité des règles de gestion d'un aménagement, aussi bien que pour évaluer la pertinence de critères d'efficacité de différents types d'aménagement, entre autres études de diagnostic ;
- ***l'évaluation d'alternatives*** : l'intérêt des modèles concerne la possibilité de simulation de différentes alternatives à un problème particulier, par exemple, le choix entre plusieurs techniques alternatives d'assainissement ou l'évaluation de la combinaison la plus efficace de ces techniques : la décision entre la construction d'un nouveau barrage ou le changement de systèmes d'irrigation, en adoptant des techniques plus économes par rapport à la demande en ressources en eau ; l'option entre différentes solutions structurelles ou non structurelles pour la protection contre les crues ;
- ***la prévision*** : la prévision de débits, surtout, mais aussi d'autres variables hydrologiques, telles que l'état d'humidité du sol, ouvre aux modèles hydrologiques un important champ d'application, soit pour l'évaluation des ressources en eau ou la prévision de la demande, au pas de temps annuel ou mensuel (pour la gestion d'un système d'irrigation, par exemple), soit

encore pour la gestion d'un système de protection contre les crues ou d'annonce de crues, à des pas de temps beaucoup plus fins, tels que le pas de temps horaire.

Les modèles hydrologiques remplissent encore d'autres fonctions associées à la gestion quantitative des ressources en eau, telles que le traitement des données (*e.g.* simulation de débits naturels pour des bassins aménagés ; calculs de données manquantes ; ...), l'enseignement et, naturellement, la recherche.

Toutefois, les problèmes de calcul de débits ou d'autres variables hydrologiques dans le cas des bassins non jaugés, que nous venons de présenter, et la prévision des effets anthropiques, que nous allons discuter en détail par la suite, restent des problèmes importants liés à la gestion des ressources en eau, encore mal résolus par les modèles hydrologiques.

L'efficacité des modèles dans la résolution de problèmes comme ceux listés ci-dessus peut être limitée par un certain nombre de facteurs intrinsèques et extrinsèques aux modèles.

La qualité des données des variables de forçage joue un rôle important, soit dans les phases de calage et validation du modèle, soit dans la phase de simulation. En effet, le modèle est construit en respectant le principe de la continuité, c'est à dire qu'il résout l'équation du bilan en eau à l'échelle du bassin versant. Si, par une mauvaise représentation spatiale des mesures des variables de forçage ou par des erreurs trop importantes, le bilan s'avère incorrect, il sera représenté de façon erronée par le modèle.

Les modèles peuvent de plus présenter des problèmes structuraux. KAUARK-LEITE (1990) rapporte, à partir des études réalisées sur le Bassin de Melarchez, une difficulté des modèles à réservoir à représenter correctement la reprise des écoulements après des longues périodes d'étiage (*e.g.* début d'hiver). La structure de ce type de modèle, quand il adopte pour la fonction de production un réservoir à capacité inextensible pour représenter l'eau dans le sol, est inadaptée à la simulation de l'écoulement après des étiages importants car, dans ce cas, l'épaisseur de la zone non saturée du sol devient considérable en raison du rabattement de la nappe phréatique. A ce moment, cette zone constitue un réservoir tampon capable d'absorber une grande partie des premières pluies avant qu'elles ne se transforment en écoulement.

6.2 - Gestion de la qualité de l'eau

La gestion de la qualité de l'eau dans les bassins versants ruraux peut être schématisée par les activités suivantes (THOMANN, 1987) : (1) énoncé du problème, (2) évaluation des alternatives de contrôle, (3) implantation du programme de contrôle et (4) vérification du programme de contrôle.

Compte tenu du type de problème posé et de la phase où l'on se trouve dans le processus de gestion de la qualité de l'eau, les gestionnaires feront appel à des outils d'aide à la décision. Parmi les problèmes posés aux gestionnaires dont les modèles mathématiques peuvent contribuer à la solution on distingue :

Diagnostic du problème

- calcul des flux polluants : les modèles peuvent contribuer en générant des séries de débits et de concentrations de polluants, soit pour interpoler entre des mesures ponctuelles, soit sur des périodes où l'on ne dispose pas de mesures ;
- estimation du risque de dépassement d'une concentration : l'intérêt des modèles est d'une part de se substituer aux mesures dans la détermination de la distribution des probabilités au dépassement d'une certaine concentration et d'autre part de prévoir, avec une certaine avance, le dépassement d'une concentration seuil et la durée de ce dépassement ;

Énoncé du problème

- détermination et quantification des sources de pollution : l'intérêt des modèles consiste à évaluer l'importance des différentes sources de pollution (naturelles, ponctuelles et diffuses) dans un bassin versant ayant des sources multiples ;
- description de mécanismes de transport des polluants : l'intérêt des modèles consiste à utiliser leur pouvoir de généralisation du comportement d'un type de système pour étendre la description des mécanismes sans faire appel à l'expérimentation et aux mesures ;

Évaluation des alternatives

- impact des techniques agricoles sur la qualité de l'eau : l'intérêt des modèles est de pouvoir simuler différents types de techniques agricoles afin d'évaluer les effets sur la qualité de l'eau et ainsi de contribuer aux choix objectifs des techniques appropriées pour lutter contre un problème particulier.

KAUARK-LEITE (1990) a comparé les incertitudes de deux MC de simulation du transport de polluants (MES, nitrates et phosphates) à l'échelle du bassin versant expérimental de Mèlarchez. Il ressort de ce travail qu'en absence de données de débits, les MC sont un bon moyen de reconstituer les séries de débits car il peuvent être calés à partir d'une seule année de données avec une bonne précision.

Tableau 2 : Comparaison des modèles dans l'estimation des flux polluants à l'exutoire de Mèlarchez

Table 2 : Mèlarchez watershed - Flux of pollutants estimated by different models

MODÈLE	MES (kg/ha/an)			AZOTE (kgN/ha/an)			PHOSPORE (kgP/ha/an)		
	obs	cal	ic*	obs	cal	ic	obs	cal	ic
F = a Q		244	64		27,2	3,9		0,41	0,08
MC CB	214	246	72	26,5	27,5	6,0	0,40	0,27	0,19
MC HSPF		192	107		23,4	4,8		0,11	0,39

* IC : intervalle de confiance à 95%

Par contre, l'utilisation des MC testés pour expliquer davantage les variations des concentrations ne semble pas améliorer la connaissance des flux polluants par rapport à un simple modèle linéaire reliant les flux aux débits. Le tableau 2 présente les résultats obtenus pour les flux moyens annuels de MES, nitrates et phosphates à l'exutoire du bassin de Mèlarchez des deux MC, CB et HSPF², et la relation

² Les modèles CB (version pour le bassin versant du modèle CREAMS - Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System) et HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) sont des modèles conceptuels de simulation du transport de l'eau et de polluants diffus d'origine agricole à l'échelle du bassin versant.

très simple du type $F = a Q$. Le coefficient a est la concentration moyenne pondérée par les débits sur 13 ans de données (*i.e.* le rapport entre le flux moyen et le débit moyen sur toute la période).

On remarque que l'incertitude sur le flux moyen annuel des MC est supérieure à celle du modèle linéaire. La réduction de l'échantillon pour la détermination du coefficient a a montré qu'à partir de deux ans de données, l'incertitude du modèle linéaire est comparable à celle des MC testés. Autrement dit, à partir de deux années de données de concentration, le modèle linéaire donne de meilleurs résultats que les MC utilisés.

Les résultats obtenus avec la simulation des concentrations en nitrates et de matières en suspension à Mélarchez ont montré que les écarts de simulation sont très importants, tout particulièrement pendant les périodes les plus sensibles, c'est-à-dire pour les concentrations élevées. Par ailleurs, les distributions de probabilité des concentrations calculées par les MC sont très différentes de celles observées réellement. Par conséquent, les résultats de simulation de la qualité des eaux sur le bassin versant de Mélarchez ne permettent pas d'envisager l'utilisation de ces MC pour l'estimation du risque lié au dépassement d'une concentration à l'exutoire.

Les autres types d'application des modèles pour la gestion de la qualité des eaux dans un bassin versant ont une caractéristique en commun. Il s'agit du lien entre l'objectif de la modélisation et la capacité de représenter réellement le système à modéliser. En fait, qu'il s'agisse de la détermination et de la quantification des sources de polluants ou de la description des mécanismes de transport des polluants ou de l'estimation de l'impact du changement des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau, il faut qu'il y ait une liaison établie entre les sources de pollution, les mécanismes de transport et les pratiques agricoles avec la représentation du système par le modèle. Il nous semble que les MC actuels sont loin de pouvoir assurer cette liaison car ils sont par définition dépourvus de réalisme physique. Pour envisager l'utilisation des modèles pour ce type d'application, qu'il s'agisse des MFP ou MC, il faut que les modèles, soit validés non seulement en fonction de leur capacité à représenter le comportement global du bassin à l'exutoire mais surtout par rapport à la justesse du réalisme physique de chacun des sous-modèles, c'est-à-dire qu'ils décrivent réellement les sources de pollution, les mécanismes de transport et les pratiques agricoles.

7 - QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LA MODELISATION EN HYDROLOGIE

7.1 - Validation des modèles

Quel que soit l'objectif d'utilisation des modèles : en science ou en technologie, il est impératif de valider leur domaine application en les soumettant à une batterie de tests.

En réalité, on ne trouve dans la littérature que des modèles qui semblent "bien marcher" et comme les modèles qui ne "marchent" pas ne sont pas publiés on peut "seulement" conclure, par tautologie, que les modèles fonctionnent bien. Par ailleurs, étant donné que la performance d'un modèle tend à être interprétée comme un jugement sur le modélisateur lui-même, sa compétence et son talent, ses publications tendent à être biaisées par l'optimisme. Tout se passe comme si les auteurs de modèles, se confondant avec ceux-ci, se trouvaient blessés dans leur existence s'il y avait infirmation des principes de base sur lesquels repose leur modélisation. Des évaluations critiques des modèles sont à l'heure actuelle très rares, voire inexistantes.

Comme l'a fort bien souligné KLEMES (1986), si on veut assurer au moins une modeste crédibilité aux modèles mathématiques de simulation, un minimum d'évaluation de ces outils est nécessaire sous peine de voir les sciences de l'eau rejoindre l'alchimie et l'astrologie dans les annales du dilettantisme.

Ces tests comprennent : (1) des critères qualitatifs (notamment graphiques), (2) des critères statistiques quantitatifs (e.g. coefficient d'efficacité, coefficient de corrélation, ...) et (3) une analyse des incertitudes. Par ailleurs, ces tests peuvent être enrichis par l'analyse comparative des modèles qui peut nous renseigner sur le niveau de simplification adéquat pour une application particulière ainsi que sur la précision relative des modèles "rivaux" pour répondre à une question donnée. Les quelques analyses comparative des modèles en hydrologie (e.g. NAEF, 1981, KAUARK-LEITE, 1990 et EDIJATNO, 1991) ont apporté des informations importantes concernant la précision et la complexité des modèles.

Il nous semble important que cette validation soit réalisée également par type d'application envisagée car ainsi on donnerait aux utilisateurs un moyen de faire leur choix en fonction du rapport coût de modélisation/précision requise.

Comme l'activité de construction des modèles est très dynamique et évolue dans le temps pour un même modèle et dans l'espace avec des modèles "rivaux", il nous semble intéressant que la communauté scientifique en hydrologie, d'une façon concertée et coordonnée, par exemple par un institut de recherche hydrologique nationalement reconnu, établisse un cadre général pour la validation des modèles. Il s'agit : (1) de définir les critères qualitatifs et quantitatifs les plus pertinents en fonction de chaque domaine et du type d'application, (2) de définir les méthodes les plus pertinentes pour l'analyse des incertitudes et (3) de mettre à disposition des jeux de données, des informations, des codes informatiques de modèles (dans les cas où ils sont du domaine public), des algorithmes de calage et des résultats antérieurs de modélisation qui puissent être utilisés par l'ensemble des chercheurs pour la validation des modèles.

Bien évidemment, il ne s'agit pas là d'établir des règles méthodologiques pour guider les choix et les décisions des scientifiques, mais de définir des règles pour évaluer le degré de succès que les différents programmes de recherche en modélisation hydrologique atteignent en fonction de leurs objectifs.

7.2 - Simulation des actions anthropiques

Une complexité additionnelle pour la modélisation en hydrologie découle du fait que les bassins versants ne sont pas stationnaires au cours du temps en ce qui concerne leurs caractéristiques physiques, surtout en raison d'interventions humaines. Être capable d'expliquer et de prévoir les effets sur le régime hydrologique d'interventions telles que le drainage agricole, l'urbanisation, le déboisement, le remembrement agricole, le changement des pratiques agricoles, ... est essentiel pour la gestion adéquate des ressources. Ce sont des tâches difficiles à remplir pour les modèles hydrologiques en général. Essayons de dégager les principales difficultés liées à la réalisation de ces objectifs.

Pour aborder le problème en utilisant des MC ou des MFP, on trouve dans la littérature, essentiellement trois méthodologies :

- Changer certains paramètres ou certaines fonctions ou encore ajouter de nouvelles fonctions dans la structure du modèle censés représenter les processus hydrologiques que l'on admet au départ susceptibles de changer avec l'intervention sur le bassin versant, en utilisant le maximum d'informations hydrologiques, cartographiques et autres disponibles. Réaliser des simulations, en utilisant des séries de variables de forçage connues et évaluer les changements sur les variables de sortie. Plusieurs scénarios peuvent être envisagés et étudiés.
- Découper dans le temps la série des données d'entrée et de sortie en deux sous séries, une antérieure et l'autre postérieure à l'intervention, quand cette intervention est bien définie dans le temps, ou en plusieurs sous-séries, en fonction de l'historique des interventions dans le cas

de changements progressifs. Caler le modèle pour chaque sous-série et évaluer les changements des valeurs des paramètres, en essayant d'identifier les plus sensibles aux non-stationnarités et les mettre en rapport avec les causes supposées de ces non-stationnarités. Simuler les sous-séries après l'intervention en utilisant le jeu des paramètres obtenu par calage avant l'intervention. Analyser la non-stationnarité des erreurs de simulation et essayer de l'associer à celles supposées induites par le changement du bassin versant.

- Appliquer la méthode décrite ci-dessus en utilisant d'autres bassins versants voisins, soumis aux mêmes conditions climatiques mais restés inchangés pendant la période d'étude. Ces bassins, dit témoins, jouent le rôle de référence d'état stationnaire, pour, par exemple, pouvoir être sûr que les paramètres du modèle ont bien changé en raison des non-stationnarités induites sur le bassin étudié.

La première méthode est assez fréquemment rencontrée dans la littérature, quand il s'agit d'études réalisées en utilisant un MFP. L'hypothèse de départ admet que les fonctions ou les paramètres sur lesquels on intervient dans le modèle, ont un réalisme physique. Sans avoir démontré au préalable cette hypothèse, l'exercice s'avère plutôt une étude de sensibilité des paramètres du modèle. Une application aveugle serait très hasardeuse et dépourvue de toute valeur scientifique.

La deuxième et la troisième méthodes conviennent plutôt aux MC. La deuxième a pour limite les difficultés de calage de ce type de modèle, car elle fait implicitement l'hypothèse qu'il est toujours possible de trouver le jeu de paramètres optimum et que les paramètres du modèle sont indépendants par rapport aux variables de forçage. Or, une grande série de publications en hydrologie rapporte justement les problèmes d'unicité et de dépendance des paramètres des variables de forçage (e.g. SOROOSHIAN et DRACUP, 1980 ; KUCZERA, 1983 ; KAUARK-LEITE, 1990 ; ...). Dans ce cas, il peut devenir difficile d'associer les changements des paramètres à la non-stationnarité originaires du bassin versant. D'autre côté, admettons que l'on dispose d'un modèle simple qui décrive assez grossièrement (erreur standard forte), mais correctement (biais faible) les processus décrit à l'exutoire d'un bassin versant. Si ce modèle est incapable de percevoir un impact de certaines actions anthropiques, c'est que celles-ci sont inférieures à l'erreur du modèle.

La troisième méthode est une prolongation de la deuxième en vue justement d'essayer d'éliminer les ambiguïtés décrites ci-dessus. L'hypothèse centrale de la méthode est que le bassin témoin a gardé un comportement stationnaire pendant les années d'étude, ce qu'il faut démontrer préalablement et qui, d'un point de vue méthodologique, peut conduire au même problème d'incertitude sur l'unicité des valeurs des paramètres.

La deuxième et la troisième méthodes présupposent aussi que l'étude sera conduite en continu et non par événements. Cela nous semble une condition essentielle, car le modèle est amené à prendre en compte l'ensemble des effets d'interventions sur le bassin, répercutés sur les données mesurées. Cela élimine aussi la subjectivité du choix des événements à étudier. Il y a plus de risque, dans l'étude par événement, que les conclusions soient biaisées par des choix qui, même en essayant de garder toute objectivité, favorisent certaines hypothèses ou certains phénomènes par rapport à d'autres. Cependant, il s'avère généralement difficile de trouver de longues séries de données originaires de bassins versants à comportement non-stationnaire. En effet, on note une tendance à interrompre les mesures hydrologiques dans des bassins soumis à des interventions importantes, capables de générer la non stationnarité.

Les méthodes décrites ci-dessus ont été mises au point avec le but d'expliquer la non-stationnarité induite sur un bassin versant par des changements de certaines de ses caractéristiques physiques. Elles ne considèrent pas le problème de rendre le modèle capable de prévoir les conséquences d'une intervention de cette nature sur le bassin versant, c'est en effet un résultat a posteriori. Prévoir, dans ce cas, semble une tâche difficile pour les MC, car ils permettent rarement l'explication de leurs

paramètres par des caractéristiques physiques du bassin versant. Dans le cas des MFP, le problème demeure le même si l'on ne démontre pas le réalisme physique, bien qu'approché, des représentations adoptées, chose pas encore faite, à notre connaissance pour ces modèles.

Du côté des MC, les possibilités de succès dans des études de non stationnarité, à notre avis, passent d'une part par l'utilisation de modèles à peu de paramètres, condition nécessaire pour réduire les incertitudes du calage et à garantir au modélisateur une bonne compréhension du comportement du modèle et d'autre part par l'utilisation de méthodes robustes d'identification des paramètres et d'analyse d'incertitudes.

7.3 - Le rôle de la simplicité dans la modélisation en hydrologie

La simplicité dans la modélisation est une notion importante à préciser qui peut être résumée par la question : est-ce que la simplicité est un critère métascientifique obligatoire de toute démarche scientifique de modélisation ? Il nous semble encore une fois que cela dépend de l'objectif de la modélisation.

La tâche de simplification de la description des théories scientifiques implique forcément l'omission des complexités du système modélisé mais ne consiste pas à ne pas les prendre en compte. Un modèle complexe peut amener à des prévisions qui sont difficiles ou même impossibles à tester empiriquement à un moment donné. Cependant, ce modèle peut s'avérer très utile pour le perfectionnement des moyens techniques d'investigation. Il s'écoulera un nombre imprévisible d'années avant qu'il puisse apparaître une seule preuve des hypothèses avancées. Toutefois, la prolifération de ces modèles peut promouvoir le développement de tests empiriques et révéler un besoin de nouveaux développements théoriques. Par conséquent, bien que la minimalité soit un critère à respecter dans la construction des modèles, on doit veiller à ne pas freiner le développement scientifique en interdisant toute complexité invérifiable à un moment donné. Par contre, cette complexité doit être maniée avec prudence pour ne pas renvoyer *sine die* le jugement d'un modèle par l'expérimentation.

Le critère de la simplicité joue un rôle différent dans le cas de modèles développés dans un but technologique. Comme on l'a vu précédemment, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de modèles applicables qui aient réussi à dépasser l'approche conceptuelle. Face à la connaissance actuelle des processus physiques du cycle hydrologique et à la qualité de l'information usuellement disponible (e.g. les séries de données hydrologiques), les recommandations généralement rencontrées dans la littérature concernant le développement des MC (e.g. GUPTA et SOROOSHIAN, 1982) semblent difficilement capables de garantir l'efficacité de la modélisation.

Identifier tous les processus physiques élémentaires du cycle hydrologique qui peuvent avoir lieu dans un bassin versant et attribuer à chacun une description analytique conduira, certainement, à des structures très complexes, employant un nombre très élevé de paramètres. Une conceptualisation déséquilibrée des processus physiques peut encore résulter de cette démarche, car on aura une tendance à trop détailler ceux qui sont bien connus (e.g. l'interception) et à trop simplifier ceux qui sont méconnus (e.g. l'écoulement sub-superficiel). D'autre part, la surparamétrisation risque de compenser, dans le modèle, des sous-structures inadéquates par d'autres sous-structures aussi inadéquates, sans qu'il soit possible de trouver où est l'erreur de conceptualisation. La surparamétrisation rend aussi presque impossible les analyses de sensibilité et d'incertitudes, indispensables à la validation du modèle.

Le modélisateur a effectivement peu de directives et de critères pour trouver parmi le grand nombre de structures utilisables dans le développement d'un MC, les plus efficaces. NASH et SUTCLIFFE (1970) proposent que l'on teste toutes (ou presque toutes) les structures possibles, en utilisant des critères numériques pour juger de la qualité de la représentation du phénomène, par le modèle. C'est encore une

raison pour que l'on essaye de garder un modèle simple. En effet, il s'avère impossible d'utiliser cette démarche rigoureuse en essayant de construire un modèle trop complexe.

8 - CONCLUSION

Modèles fondés physiquement ou modèles conceptuels ?

La question s'impose, car source d'un débat important dans le domaine de l'hydrologie. C'est d'ailleurs, pour une large mesure, l'interrogation de fond qui a conduit notre réflexion tout au long de cet exposé. Il nous semble, encore une fois, qu'une réponse à cette question, qui essaie d'aller au delà d'une option excessivement pragmatique ou d'un constat d'état de crise dans la recherche en hydrologie, demande une définition du contexte d'utilisation des modèles.

Dans le domaine de la recherche, la démarche réductionniste qui sous-tend la construction de modèles MFP est historiquement (notamment en physique) plus féconde, compte tenu de la quantité et du contenu des questions posées et de l'ouverture d'opportunités de développement de théories et d'expérimentation concernant les processus physiques du cycle hydrologique. Cependant, un degré de fécondité élevé n'est pas suffisant pour assurer le succès d'un programme de recherche.

Le système naturel dans lequel se produisent les mouvements hydriques est presque complètement inconnu et le sera probablement pour très longtemps, à moins que l'on ne dispose de "scanners" capables de représenter très finement les bassins versants dans toute leur épaisseur. Même pour les bassins versants représentatifs et expérimentaux, on est loin d'une adéquate représentation de ces systèmes, capable de fournir les conditions aux limites exigées par les formulations mathématiques des processus physiques ou de prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques du sol, par exemple. Le développement des moyens informatiques et des techniques de mesure et d'observation seront toujours indispensables à ce programme de recherche. Cependant, ces acquis seront insuffisants pour combler le besoin de constructions théoriques concernant les processus physiques et le choix du niveau adéquat de description de la complexité du système naturel. Construire, sur la base d'une représentation illusoire de ce système, un modèle théorique, est une déclaration de principe qui s'apparente à une tromperie pure et simple.

Une démarche scientifique exige que l'on soumette les hypothèses au contrôle qui consiste à comparer leurs conséquences à la réalité des faits observables. Les MFP mécanistes actuels, par exemple, semblent bâtis dans un contexte où l'on estime pouvoir se dispenser de cette nécessité.

La démarche des modèles conceptuellement réalistes qui renonce à l'idée de décrire finement le fonctionnement complexe du cycle de l'eau, nous semble une voie intéressante à poursuivre. En essayant de trouver des généralisations à partir d'une analyse "géographique" de la complexité, elle peut fournir un cadre fécond pour guider la recherche expérimentale en hydrologie. Un danger demeure toutefois dans cette approche. Il s'agit de vouloir faire coller la nature à la représentation faite par le modélisateur qui, n'oublions pas, reste conceptuelle. Le modèle doit être surtout un outil d'aide au chercheur pour raisonner sur les phénomènes.

Même si ils n'excluent pas des explications causales des phénomènes hydrologiques reproduits par des formulations empiriques, les MC semblent moins féconds pour faire progresser la connaissance scientifique en hydrologie, au delà d'un aperçu global des phénomènes. Cependant, une démarche qui essaie d'augmenter les références physiques, chimiques, biologiques de sous-processus inclus dans le MC peut être envisagée. Il faut d'abord admettre que l'on connaît de façon très rudimentaire le fonctionnement du bassin versant. Ensuite, il faut essayer de voir si l'on peut reproduire son

comportement par des structures simples. Enfin, il ne faut introduire des complications conceptuelles que si elles apparaissent inévitables pour rendre compte des phénomènes réels. Si cette démarche nous entraîne vers des modèles conceptuellement réalistes, un nouveau degré de généralisation des MC aura été obtenu. Sinon, il serait dangereux d'y introduire des références physiques, chimiques, biologiques de force. On risquerait de tourner en rond et de s'interdire toute possibilité de contredire les hypothèses initiales.

Dans le contexte technologique, les MC sont les seuls à donner des réponses adéquates à un certain nombre de problèmes posés. Néanmoins, la précision des réponses fournies, et donc leur utilité pour les applications pratiques, est conditionnée par la démarche utilisée dans le développement de ces modèles. A la créativité pour imaginer et tester différentes solutions structurales il faut associer l'emploi intelligent du critère de minimalité ainsi qu'une validation rigoureuse des solutions les plus prometteuses, dans les différentes conditions d'application.

Les MFP, disponibles aujourd'hui, pour des applications technologiques, restent conceptuels, ne présentant pas de réalisme physique. Etant donné leur niveau de complexité élevé, le grand nombre de paramètres à estimer ou à caler, les exigences en termes de données et le fait qu'ils ne se montrent pas plus performants que les MC, leur utilisation dans le contexte technologique n'est pas justifiable. Les utiliser en tant que modèles fondés physiquement peut conduire à des conclusions fallacieuses.

Pour augmenter la connaissance en hydrologie il nous semble fondamental qu'une symbiose s'installe entre modélisateurs, expérimentateurs et scientifiques du milieu naturel afin de conjuguer leurs efforts dans l'étude du cycle de l'eau dans toutes ses dimensions : théoriques et expérimentations de terrain. L'accent doit être mis, à notre avis, sur la compréhension des processus hydrologiques fondamentaux et des mécanismes (physiques, chimiques et biologiques) qui sont à la base. Le but principal de cette démarche consiste à identifier des généralités ressemblant à des lois, dans des situations simples et qui continuent à s'appliquer dans toutes les situations quelle que soit leur complexité.

Comme l'a affirmé KLEMES (1982), "le progrès dans la modélisation fondée physiquement (causal modeling) ne peut résulter que de l'amélioration de la connaissance hydrologique et non de la manipulation causalement inspirée (causally inspired) du peu de connaissance que nous avons".

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement Claude MICHEL, hydrologue au CEMAGREF, pour les discussions très fructueuses que nous avons depuis plusieurs années et sans lesquelles cet article n'aurait pu être écrit.

Nous voudrions également exprimer notre gratitude à Jean-Claude DEUTSCH, Directeur du CERGRENE, et à Brigitte VINÇON-LEITE, chercheur au CERGRENE, pour les remarques formulées.

Enfin, cet article a pu être réalisé grâce au soutien de la SAFEGE Ingénieurs Conseils et du CERGRENE (Centre d'Enseignement et Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement de l'École Nationale des Ponts et Chaussées).

BIBLIOGRAPHIE

1. ABBOTT, M. B. et al. - (1986a). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, Vol. 87, 45-59.
2. ABBOTT, M. B. et al. - (1986b). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, Vol. 87, 61-77.
3. BACHELARD, G. - (1938). *La Formation de l'Esprit Scientifique*. J. Vrin, Paris, 256 p.
4. BACHELARD, S. - (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In DELATTRE, P et M. THELLIER (ed), Actes du Colloque "Elaboration et Justification des Modèles : Applications en Biologie", Tome I, Maloine Editeur, Paris, 3-19.
5. BEVEN, K. - (1987). Towards a New Paradigm in Hydrology. In *Water for the Future : Hydrology in Perspective*. Proceedings of the IAHS Rome Symposium, IAHS Publ. n° 164, 393-403.
6. BEVEN, K. - (1989). Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, Vol. 105, 157-172.
7. BEVEN, K. J. et M. J. KIRKBY - (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, N° 1, 43-69.
8. BEVEN, K. J. et O'CONNELL, P. E. - (1982). On the Role of Physically-Based Distributed Modelling in Hydrology. Institut of Hydrology, Rep. n° 81, 36 p.
9. BINLEY, A., J. ELGY et K. BEVEN - (1989a). A Physically Based Model of Heterogeneous Hillslopes; 1. Runoff Production. *Water Resources Research*, Vol. 25. N° 6, 1219-1226.
10. BINLEY, A., K. BEVEN et J. ELGY - (1989b). A Physically Based Model of Heterogeneous Hillslopes; 2. Effective Hydraulic Conductivities. *Water Resources Research*, Vol. 25. N° 6. 1227-1233.
11. BUNGE, M. - (1961). The weight of simplicity in the construction and assaying of scientific theories. *Philosophy of Science*, v. 28, 120 p.
12. BUNGE, M. - (1964). Phenomenological Theories. In BUNGE, M. (ed.), *The Critical Approach*, Free Press, New York.
13. BUNGE, M. - (1980). *Epistemologia: Curso de Actualización*. Ariel, Barcelona. 246 p.
14. CHALMERS, A. F. - (1988). *Qu'est-ce que la science ?* Éditions de la Découverte. Paris, 238 p.
15. CHALMERS, A. F. - (1991). *La Fabrication de la Science*. La Découverte, Paris, 167 p.
16. CLARK, R. T. - (1973). *Mathematical Models in Hydrology*. FAO Irrigation and drainage paper n.19. UNO-FAO, Rome.

17. DELATTRE, P. - (1979). Le problème de la justification des modèles dans le cadre du formalisme des systèmes de transformations. *In*. DELATTRE, P et M. THELLIER (ed), Actes du Colloque "Elaboration et Justification des Modèles : Applications en Biologie", Tome I, Maloine Editeur, 97-128.
18. DOOGE, J. C. - (1986). Looking for Hydrologic Laws. *Water Resources Research*, Vol. 22, N° 9, 46S-58S.
19. DOOGE, J. C. I. - (1988). Hydrology past and present. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, N° 1, 5-26.
20. EDJATNO - (1991). Mise au Point d'un Modèle Élémentaire Pluie-Débit au Pas de Temps Journalier, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, CEMAGREF, Antony, 625 p.
21. EDJATNO et MICHEL, C. - (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, N° 2, 113-121.
22. FLEMING, G. - (1979). Deterministic models in hydrology. FAO irrigation and drainage paper n. 32. UNO-FAO. Rome.
23. GUPTA, V. K. et S. SOROOSHIAN - (1982). Parameter estimation problems caused by model structure: case of conceptual rainfall-runoff models. Technical Report No. ESYS-CIT-82-011, Department of Systems Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 134 p.
24. JACQUET, J. - (1984). Modélisation et stratégie de la mesure dans l'eau et dans l'air. *La Houille Blanche*, N°1/2, 67-78.
25. KAUARK-LEITE, L. A. - (1990). Réflexions sur l'Utilité des Modèles Mathématiques dans la Gestion de la Pollution Diffuse d'Origine Agricole. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - CERGRENE, Paris, 449 p.
26. KLEMES, V. - (1982). Empirical and causal models in hydrology. *In* : Scientific basis of water-resource management. National Academy Press, Washington, D. C., 95-104.
27. KLEMES, V. - (1986). Dilettantism in Hydrology : Transition or Destiny ? *Water Resources Research*, Vol. 22, N° 9, 177S-188S.
28. KLEMES, V. - (1988). A Hydrological Perspective. *Journal of Hydrology*, Vol. 100, 3-28.
29. KUCZERA, G. - (1983). Improved parameter inference in catchment models: 1. Evaluating parameter uncertainty. *Water Resources Research*, Vol 19, N° 5, 1151-1162.
30. KUHN, T. S. - (1983). La Structure des revolutions scientifiques. Flammarion, Paris, 284 p.
31. KUNDZEWICZ, Z. W. et DUCKSTEIN, L. - (1990). Symbiosis Between Systems Engineering and Hydrology. *Water Resources Management*, Vol. 4, 161-173.
32. MAIONE, U. - (1988). Present and future of water resources in developed countries. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 26, N° 2, 101-115.

33. NAEF, F. - (1981). Can we model the rainfall-runoff process today?. *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 26, 281-289.
34. NASCIMENTO, N. O. et MICHEL, C. - (1992). Some epistemological aspects of the development and use of hydrologic conceptual models. In GRAILLOT, D., SCHILLING, W., EINFALT, T.(ed), Proceedings of the 4th European Junior Scientist Course "Assessment of Modeling Uncertainties and Measurement Errors in Hydrology", Ecole des Mines de Sait-Etienne. Saint-Victor-sur-Loire, 245-264.
35. NASH, J. E. et SUTCLIFFE, J. V. - (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models. Part I, A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, n. 3, 282-290.
36. POPPER, K. R. - (1985). Conjectures et Réfutations. La Croissance du Savoir Scientifique. Payot, Paris, 605 p.
37. ROCHE, M. -(1986). Dictionnaire Français d'Hydrologie de Surface. Masson, Paris, 288 p.
38. ROCHE, P. A. - (1988). Les modèles. In : VALIRON, F. (ed), Gestion des Eaux : Automatisation, Informatisation et Télégestion, Tome III, 138-166.
39. SOROOSHIAN, S. et J. A. DRACUP - (1980). Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff model : correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, Vol 16, N° 2, 430-442.
40. THOM, R. - (1974). Modèles mathématiques de la morphogénèse. Union Générale d'Éditions, Paris.
41. THOM, R. - (1979). Modélisation et Scientificité. In. DELATTRE, P et M. THELLIER (ed), Actes du colloque "Elaboration et Justification des Modèles : Applications en Biologie", Tome I, Maloine Editeur, Paris, 21-29.
42. THOMANN, R. V. - (1987). Systems analysis in water quality management - A 25 year retrospect. In : BECK, M. B. (ed), Systems analysis in water quality management, Pergamon, Oxford, 1-14.
43. TODINI, E. and WALLIS, J. R. - (1977). Using C.L.S. for daily or longer periode rainfall-runoff modelling. In: *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*, Wiley, New York.
44. VISSMAN, W. et al. - (1989). Introduction to Hydrology, Harper & Row Publ., 780 p.

Annexes du Chapitre 2

Annexe 2.1 - La routine de désagrégation des ETP décadaires de GR3J - (d'après EDIJATNO, 1991)

Le modèle fonctionnant au pas de temps journalier, il a été nécessaire de désagréger les données décadaires. Pour cela on a choisi de représenter les variations temporelles à l'intérieur d'une décade par un arc de parabole calé à l'aide des deux décades adjacentes comme l'indique la figure 6 (voir l'annexe 16.1).

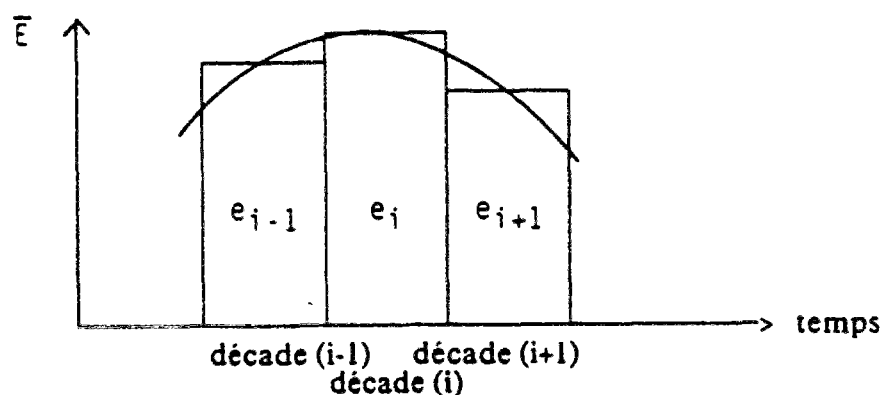


Figure 6 : La désagrégation de l'ETP

$$E_t = \alpha t^2 + \beta t + \gamma \quad \text{valable pour la décade } i.$$

On cale α , β , γ de façon que :

$$\sum_{t \in (i-1)} E_t = e_{i-1}$$

$$\sum_{t \in (i)} E_t = e_i$$

et

$$\sum_{t \in (i+1)} E_t = e_{i+1}$$

e_{i-1} , e_i , e_{i+1} étant les évaporations décadaires.

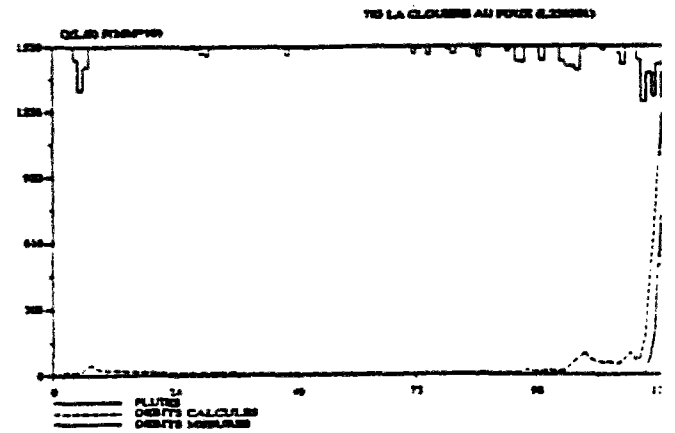
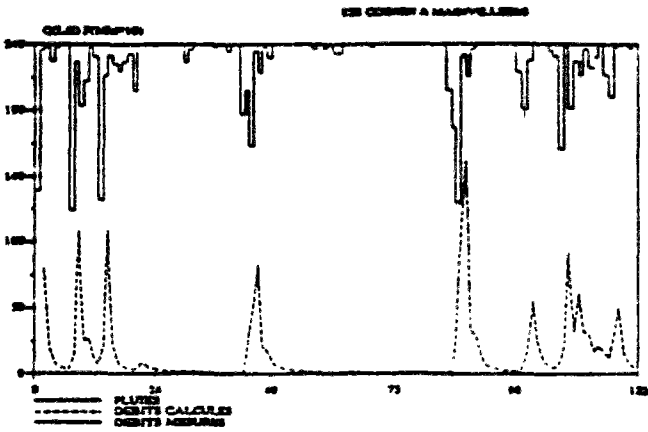
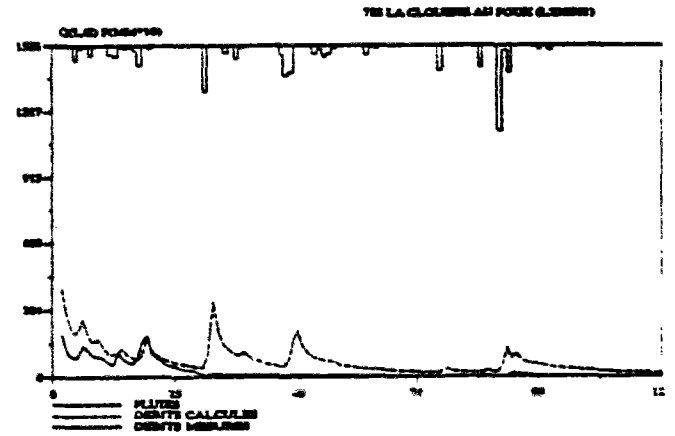
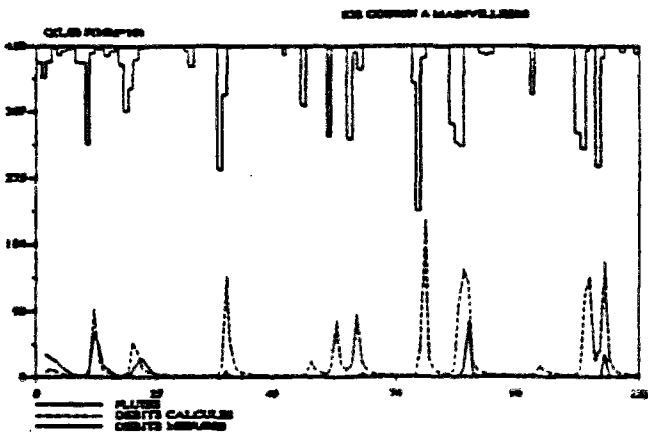
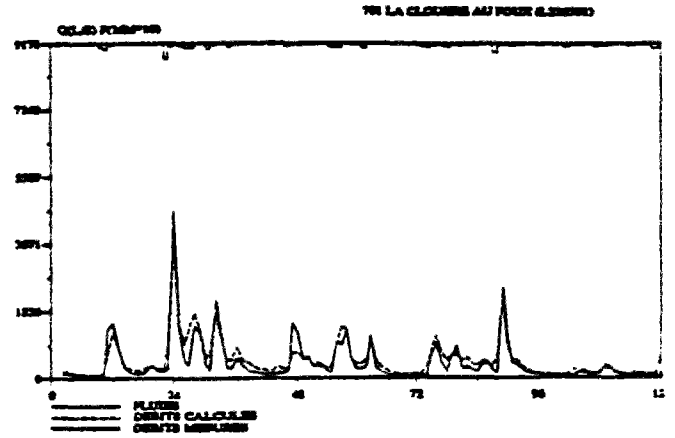
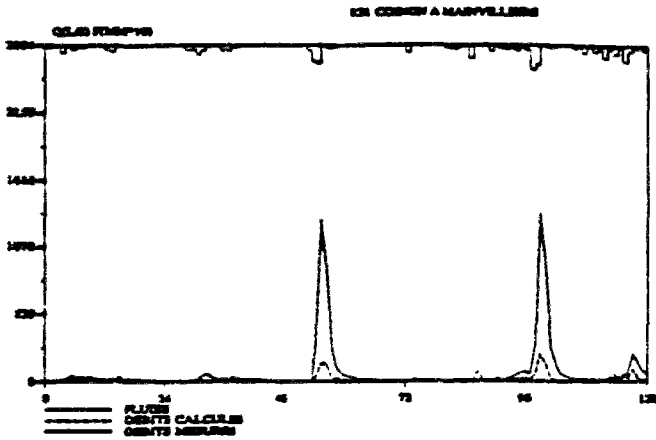
On retient ensuite l'expression de E_t uniquement pour la décade centrale i .

On répète de façon glissante (et cyclique) ce processus.

Annexe 2.2 - HYDROGRAMMES DE SIMULATION version originale de GR3J

v.0-bv40

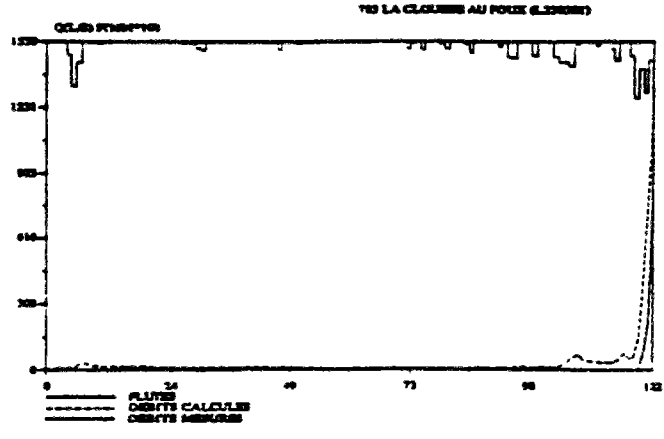
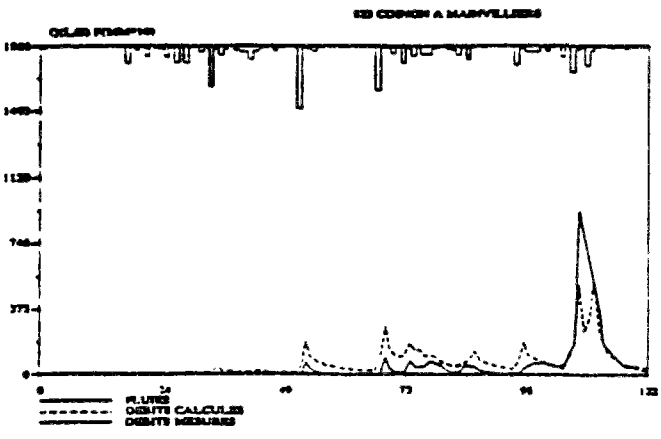
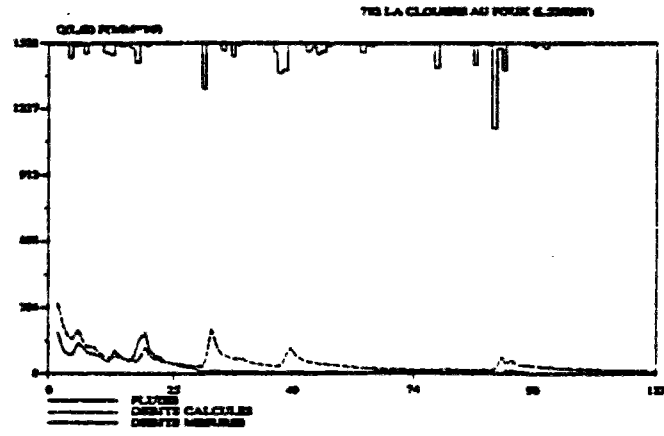
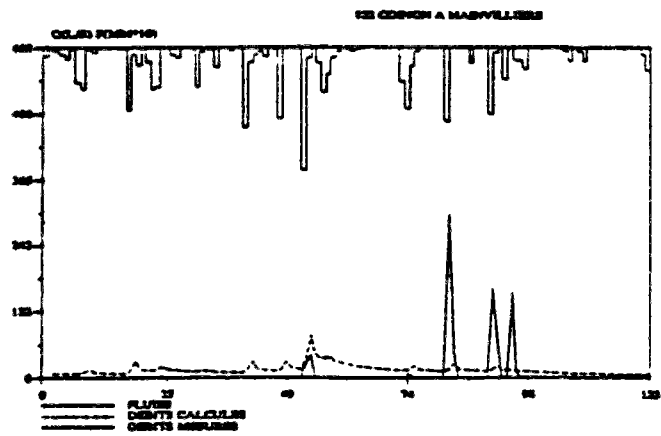
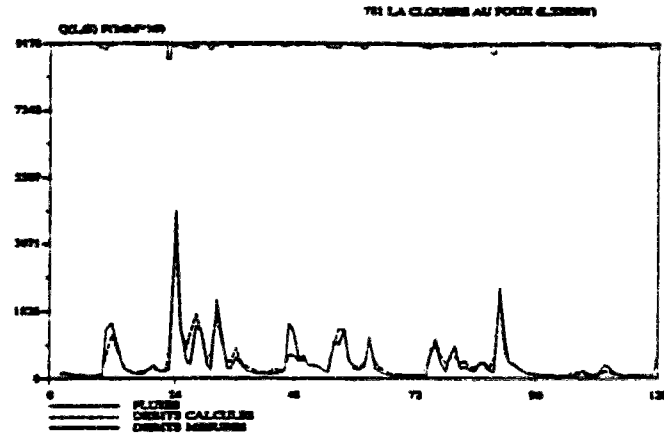
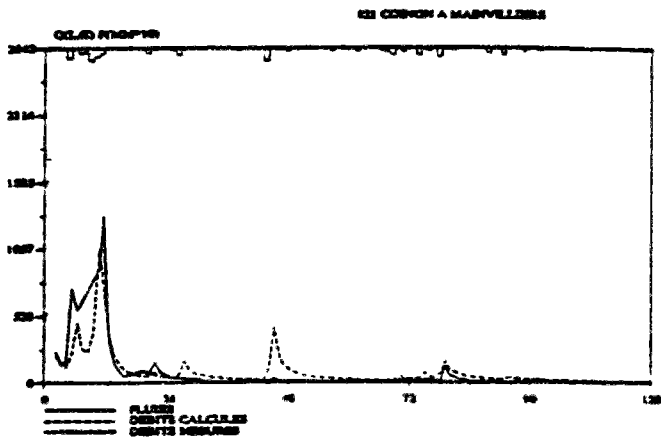
v.0-bvb6



Annexe 2.3 - HYDROGRAMMES DE SIMULATION version EDIJATNO de GR3J

v.E-bv40

v.E-bvb6



Annexes du Chapitre 3

Annexe 3.1 - Modifications de GR3J au Niveau du Rendement et au Niveau du Transfert

A3.1.1 - Modifications au niveau du rendement

L'une des conclusions de l'analyse de la version 2 (voir chapitre 2) nous a conduit à formuler quelques propositions concernant le rendement. On a d'abord envisagé de nouvelles équations de rendement (point 1, à la fig. A3.1.1), dans l'approche initiale de l'étude :

$$dS = \frac{1}{\exp[D \cdot (1 - S/A)]} dP \quad \text{pour le rendement de la pluie et}$$

$$dS = [1 - \exp(-D \cdot S/A)] dE \quad \text{pour celui de l'évaporation.}$$

La version 4, en utilisant les équations de rendement ci-dessus, essaie de produire des pertes significatives par évaporation. Cependant, les résultats (tableau A3.1.1) sont tout à fait comparables à ceux de la v. 2 (tableau 2.8b), sans presque rien apporter de nouveau.

**Tableau A3.1.1 - Résultats du Calage de GR3J
version 4**

STA (8 b.v.)	critères					paramètres			
	<i>NASH</i> %	<i>BILN</i> %	<i>CRU</i> %	<i>DRC</i>	<i>DRET</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
moyenn	60,2	-34,7	71,5	1,58	-0,29	5,74	3,01	-0,20	1,07
e									
s	24,3	38,6	21,1	0,64	0,27	0,92	1,35	0,39	0,58

STA = statistiques sur 8 bassins versants ; *BILN* = rapport des volumes ; *CRU* = rapport des crues annuelles moyennes ; *DRC* = rapport des durées des crues ; *DRET* = rapport des durées d'étiage.

L'un des problèmes de la v. 4 vient de la symétrie entre les deux courbes de rendement par rapport à l'axe $x = y$: si le paramètre D prend des valeurs élevées, pour produire des taux d'évaporation importants, la réponse du modèle aux pluies devient elle aussi trop rapide. Il s'agit bien d'une caractéristique de la fonction exponentielle utilisée. La figure A3.1.2 illustre ce comportement.

Pour permettre une compréhension plus approfondie du problème, on a procédé à un calage (version 5) en utilisant les équations de la v. 4, et en retenant deux paramètres pour les rendements : D , pour celui de l'évaporation et un cinquième, E , remplaçant D dans l'équation du rendement de la pluie. Les résultats sont présentés dans le tableau A3.1.2.

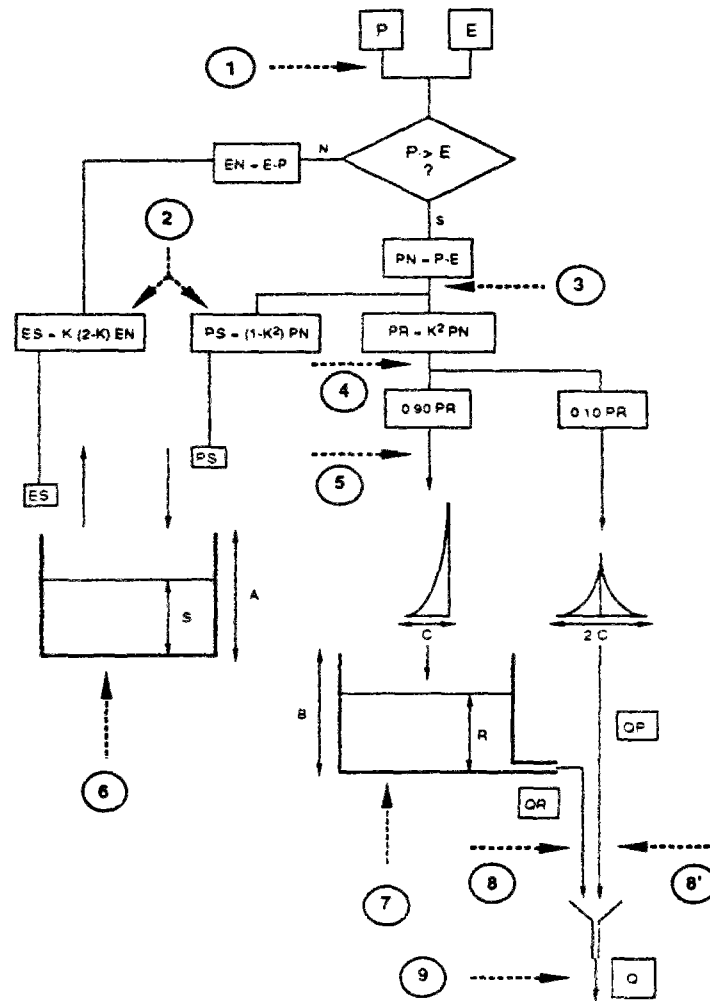


Fig. A3.1.1 - Propositions de changement selon le point d'intervention dans l'architecture de GR3J

Tableau A3.1.2 - Résultats du Calage de GR3J
Version 5

STA (8 bv)	critères					paramètres				
	NASH %	BILN %	CRU' %	DRC	DRET	a	b	c	d	ln(E)
m	62,4	-39,4	71,4	1,7	-0,29	6,16	3,08	-0,17	1,56	1,54
s	24,1	41,4	20,5	0,78	0,30	0,65	1,32	0,41	2,60	0,97

STA = statistiques sur 8 bassins versants ; BILN = rapport des volumes ; CRU' = rapport des crues annuelles moyennes ; DRC = rapport des durées des crues. DRET = rapport des durées d'étage.

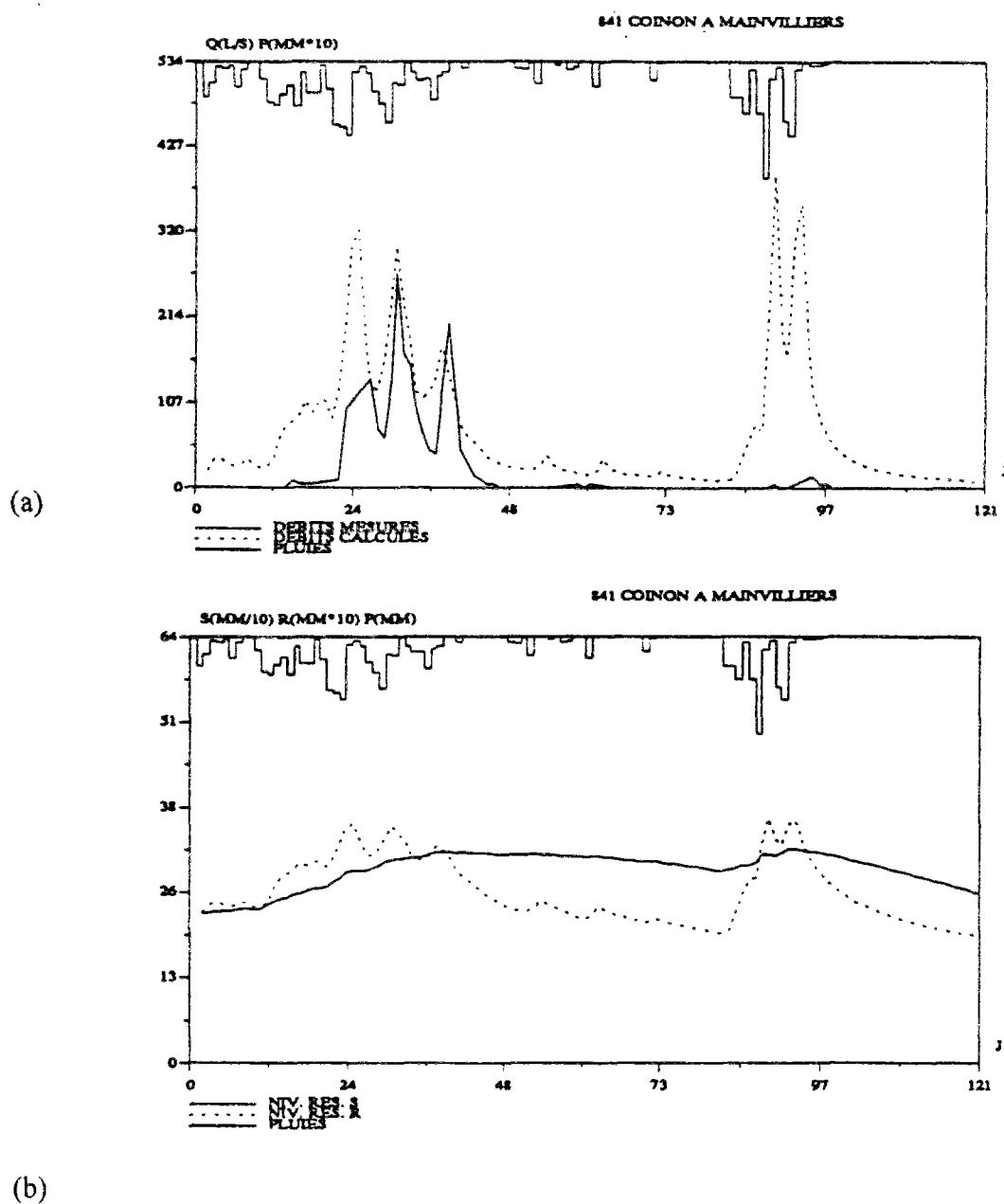


Fig. A3.1.2 - BV40, résultats de simulation :
 (a) P , Q_{obs} et Q_{calc} (par jour, de Janvier à Avril, 1984) ;
 (b) variables d'état S et R (par jour, de Janvier à Avril, 1984).

En moyenne, la symétrie entre les deux courbes de rendement a été préservée. Néanmoins, l'écart-type du paramètre D est très élevé. Cela est dû aux bassins BV40 et BV42 pour lesquels D a pris les valeurs invraisemblables de 1.703 et 45, respectivement, tandis que E est égal à 3. Donc, une nouvelle fois, ce que l'on affirme dans l'analyse des résultats de la v.4 n'est valable que pour certains bassins

On a essayé trois autres versions, v.6, v.7 et v.8 (tableau A3.1.3) basées sur un traitement soustractif au niveau du réservoir-sol (point 2 à la fig. A3.1.1), dans une même logique d'intervention sur le rendement. Cette approche, dont les résultats sont présentés dans le tableau A3.1.4, peut être interprétée d'un point de vue conceptuel comme la représentation d'une diminution plus importante de l'humidité du sol pour les bassins intermittents, vis-à-vis des bassins pérennes. D'un point de vue purement mathématique elle équivaut à une augmentation de l'évaporation.

Tableau A3.1.3 - Traitements Soustractifs sur le Réservoir-sol
Descriptions des Versions

VER	PI	TYPE DE TRAITEMENT
v.6	6	perte journalière constante; paramètre D
v.7	6	perte journalière fonction de $S = D.S/A$
v.8	6	perte journalière fonction de $S = D.A/S$

où VER = version et PI = point d'intervention sur l'architecture du modèle (figure 3.3)

Tableau A3.1.4 - Résultats du Calage de GR3J Versions 6, 7 et 8
valeurs moyennes et écart-type sur 8 bassins versants

VER	STA (8 bv)	critères					paramètres			
		NASH %	BILN %	CRU %	DRC	DRET	a	b	c	d
v. 6	m	65,2	-14,5	70,5	1,28	-0,17	5,51	2,79	-0,16	0,13
	s	23,3	27,3	15,7	0,40	0,17	0,60	1,85	0,42	0,53
v. 7	m	65,5	-27,4	69,2	1,51	-0,24	5,64	3,00	-0,14	0,34
	s	23,1	45,0	14,5	0,87	0,27	0,65	1,36	0,44	0,83
v. 8	m	59,9	9,8	64,7	0,92	-0,03	4,92	1,50	-0,25	0,59
	s	24,3	38,6	20,6	0,29	0,21	0,90	4,33	0,37	1,19

VER = versions du modèle ; STA = statistiques sur 8 bassins versants ; BILN = rapport des volumes ; CRU = rapport des crues annuelles moyennes ; DRC = rapport des durées des crues ; DRET = rapport des durées d'étiage

Le critère de NASH moyen reste toujours inférieur à celui de la version EDIATNO (tableau 2.9). Les crues y sont moins bien représentées, malgré une amélioration du critère de durée des crues et des étiages. Aucun bassin n'a présenté de résultats meilleurs que ceux de la version EDIATNO, sauf le BVC0 dans le cas de la v.8.

On a finalement envisagé une autre solution concernant le rendement du modèle, qui présente la nouveauté de toucher en même temps au transfert. Dans cette version (v.9), on considère qu'une partie de l'évaporation a pour origine le réservoir de routage. On essaye de représenter, d'un point de vue conceptuel, les pertes d'eau par évaporation qui se produisent pendant l'écoulement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau A3.1.5.

Dans cette solution, le paramètre D ne varie que dans une fourchette de 0 à 1. L'évaporation qui est appliquée au réservoir de routage vaut $ER = D \cdot ET$ et celle qui est appliquée au réservoir-sol, vaut $ES = ET - ER$, où ET est l'évaporation totale.

Ces résultats montrent l'inadéquation de la v.9. La perte d'eau par évaporation au niveau du réservoir de routage améliore le bilan, mais produit une augmentation excessive de la valeur du paramètre B , ce qui diminue la qualité de la représentation des crues. Le critère de NASH, bien qu'il soit meilleur que celui de la version originale, est encore trop faible.

Tableau A3.1.5 - Résultats du Calage de GR3J
Version 9 - valeurs moyennes et écart-type sur 8 bassins versants

VER	STA (8 bv)	critères					paramètres			
		NASH %	BILN %	CRU %	DRC	DRET	a	b	c	d
v. 6	m	62,0	-2,0	66,2	1,51	-0,10	5,78	5,38	-0,21	2,78
	s	24,1	24,5	22,1	0,92	0,17	0,62	2,73	0,35	4,16

VER = versions du modèle ; STA = statistiques sur 8 bassins versants ; BILN = rapport des volumes ; CRU = rapport des crues annuelles moyennes ; DRC = rapport des durées des crues ; DRET = rapport des durées d'étiage.

En conclusion générale de ce paragraphe, on dira que si les interventions sur le rendement ont apporté des améliorations par rapport à la version originale, cela n'a pas été le cas quand on les a comparées avec la version EDIATNO. Ces interventions affectent une partie vraisemblablement synthétique et efficace dans la fonction de production du modèle. Le paramètre A se situe toujours aux environs de 200 mm, avec un écart-type très petit.

3.3.3 - Traitements soustractifs sur la pluie

En considérant les conclusions des paragraphes précédents, le traitement soustractif appliqué à la pluie mérite d'être étudié de plus près. On envisage ici de répondre à deux questions simultanément :

- a quel type de traitement soustractif ? et
- b où le placer de la façon la plus efficace dans l'architecture du modèle?

Six versions différentes ont été ainsi testées (tableau A3.1.6) dont les résultats globaux sont présentés dans le tableau A3.1.7.

Tableau A3.1.6 - Traitement Soustractif sur la Pluie.
Description des Versions

VER	PI	TYPE DE TRAITEMENT
v.10	3	perte journalière constante; paramètre D
v.11	4	perte journalière constante; paramètre D
v.12	5	perte journalière constante; paramètre D
v.13	1	perte journalière fonction de $S = D.A/(A + S)$
v.14	1	perte journalière fonction de $S = D.(A + S)/A$
v.15	4	perte journalière fonction de $S = D.A/(A + S)$

où VER = version et PI = point d'intervention sur l'architecture du modèle (figure 3.3)

Avec les versions v.13, v.14 et v.15 on revient à l'hypothèse que la perte à introduire est une fonction de l'état d'humidité du sol supposé représenté par la variable d'état S .

Les résultats sont *grosso modo* très équivalents à ceux obtenus par EDIJATNO. Les pertes au point 4 (v.11 et v.15) et les pertes variables en fonction de S (v.13, et v.15) ont présenté les résultats les plus performants. On note que comme pour la version EDIJATNO, le bilan reste toujours très négatif, c'est à dire que les débits calculés par le modèle sont supérieurs, en moyenne, aux débits observés.

Pour le moment, il n'est pas évident qu'un traitement différent de celui proposé dans la version EDIJATNO apporte une amélioration nette.

En regardant tous les résultats obtenus jusqu'à maintenant, il apparait clairement que l'on peut partager les bassins versants étudiés en trois groupes. Dans le groupe 1 sont réunis les bassins qui répondent généralement de façon favorable (améliorations des critères) aux changements conçus selon une logique de perte d'eau, c'est le cas des BV40 et BV42. Dans le groupe 2 se trouvent les bassins qui sont déjà correctement représentés par GR3J version originale et qui ont une tendance à présenter de petites améliorations ou à être détériorés par nos propositions de changement, c'est le cas des BVA9, BVB6, BVB7 et BVB9. Finalement, dans le groupe 3 sont les BVB8 et BVC0 qui sont peu sensibles aux changements d'une façon générale. On reviendra sur ce point dans les prochains paragraphes.

Tableau A3.1.7 - Résultats du Calage de GR3J - Versions de 10 à 15
valeurs moyennes et écart-type sur 8 bassins versants

VER	STA (8 bv)	critères					paramètres			
		<i>NASH</i> %	<i>BILN</i> %	<i>CRU</i> %	<i>DRC</i>	<i>DRET</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
v. 10	<i>m</i>	68,5	18,9	76,7	1,28	-0,25	5,44	3,22	0,22	0,56
	<i>s</i>	22,6	35,2	17,1	0,51	0,26	0,59	1,11	0,38	0,96
v. 11	<i>m</i>	69,2	-19,3	77,9	1,30	-0,18	5,72	3,60	-0,30	0,60
	<i>s</i>	22,2	28,5	15,2	0,45	0,18	0,72	0,82	0,35	0,99
v. 12	<i>m</i>	67,7	-20,0	77,2	1,48	-0,14	5,54	3,35	-0,28	0,86
	<i>s</i>	22,7	40,7	16,8	0,93	0,18	0,62	1,02	0,35	0,35
v. 13	<i>m</i>	69,0	-27,6	77,4	1,45	-0,25	5,65	3,31	-0,20	0,74
	<i>s</i>	22,1	36,2	16,5	0,68	0,24	0,58	1,17	0,41	0,89
v. 14	<i>m</i>	68,5	-29,7	76,8	1,47	-0,28	5,69	3,32	-0,20	0,43
	<i>s</i>	22,1	35,0	16,0	0,61	0,25	0,58	1,16	0,40	0,62
v. 15	<i>m</i>	69,4	-20,8	78,1	1,33	-0,19	5,77	3,60	-0,29	0,51
	<i>s</i>	22,2	26,9	15,5	0,46	0,17	0,74	0,87	0,35	1,11

VER = versions du modèle ; STA = statistiques sur 8 bassins versants ; *BILN* = rapport des volumes ; *CRU* = rapport des crues annuelles moyennes ; *DRC* = rapport des durées des crues ; *DRET* = rapport des durées d'étiage.

3.3.4 - Traitement soustractif au niveau du transfert

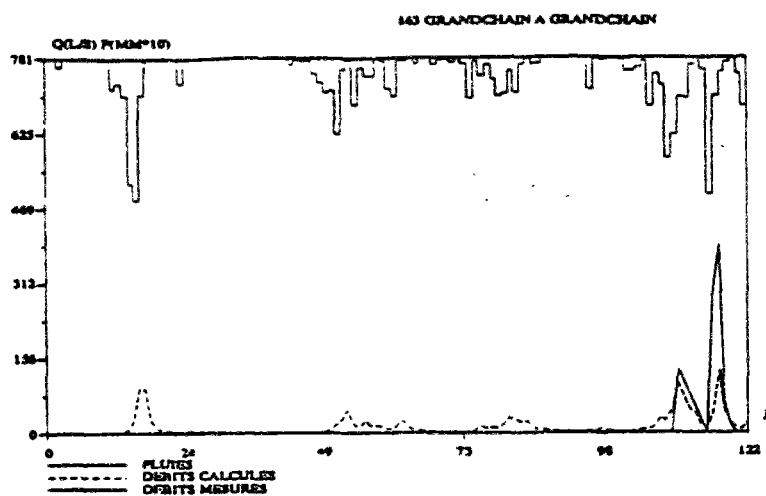
L'un des problèmes présentés par les versions antérieures est un bilan en eau plutôt négatif, et s'explique par le fait que le modèle continue à générer des débits quand les cours d'eau sont secs. Il a donc paru intéressant d'étudier la possibilité d'un traitement soustractif au niveau du transfert. Quinze solutions ont été proposées (tableau A3.1.8). Les résultats globaux les plus significatifs se trouvent dans le tableau A3.1.9.

Le tableau A3.1.9 montre que les solutions sont très équivalentes entre elles. On remarque que les pertes varient en fonction du niveau *R* du réservoir de routage et apportent une petite amélioration au modèle par rapport aux pertes constantes. Quand on les compare avec la version EDIATNO, on observe une amélioration du critère de NASH moyen d'environ 2%, ainsi qu'une meilleure représentation des crues et - ce qui est important dans le cas présent - des étiages. Les bassins les plus sensibles à ces versions sont BV40 et BV42, avec des variations positives respectives du critère de NASH de 5,5% (v.28) et de 20,4% (v.18) et le BVB9, avec une diminution de ce critère de 9,0% (v.28).

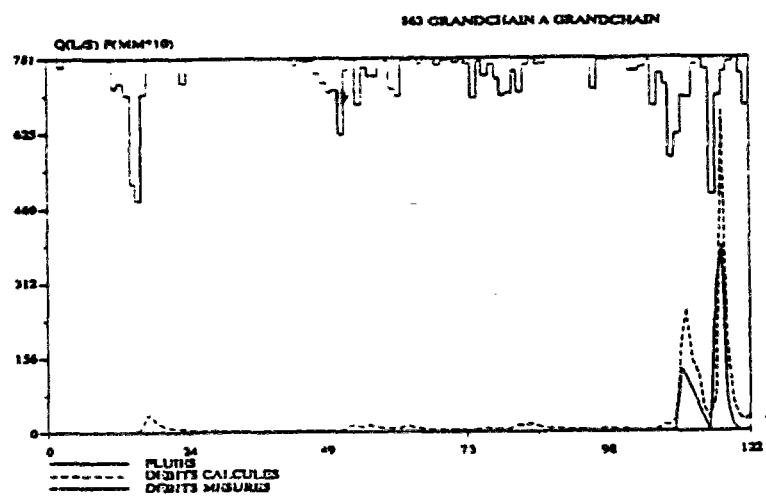
Ces versions sont effectivement capables d'éliminer presque entièrement la génération d'écoulement, par le modèle, quand le cours d'eau est à sec. Cependant, les réponses aux pluies sont parfois trop importantes (fig. A3.1.3).

Tableau A3.1.8 - Traitement Soustractif sur le Transfert
Description des Versions

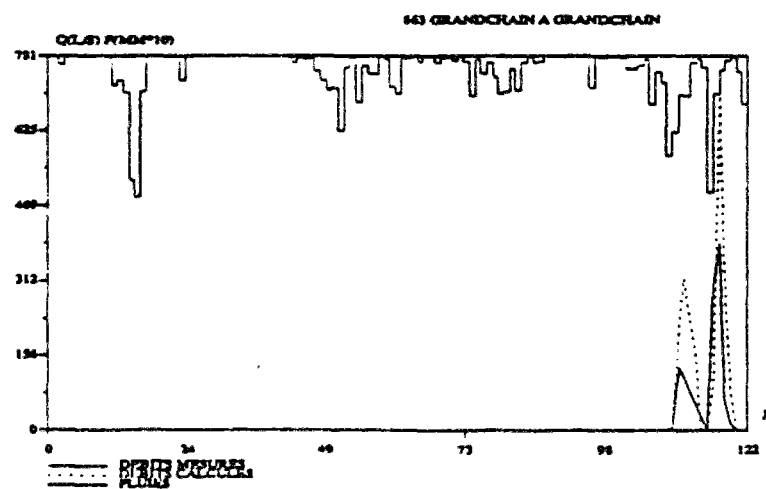
VER	PI	TYPE DE TRAITEMENT
v.16	9	perte journalière constante, paramètre D
v.17	9	perte journalière fonction de $R = D.B/(B + R)$
v.18	9	perte journalière fonction de $R = D.(B + R)/B$
v.19	9	perte journalière fonction de $S = D.A/(A + S)$
v.20	9	perte journalière fonction de $S = D.(A + S)/S$
v.21	8	perte journalière constante, paramètre D
v.22	8	perte journalière fonction de $R = D.B/(B + R)$
v.23	8	perte journalière fonction de $R = D.(B + R)/B$
v.24	8	perte journalière fonction de $S = D.A/(A + S)$
v.25	8	perte journalière fonction de $S = D.(A + S)/S$
v.26	7	perte journalière constante, paramètre D
v.27	7	perte journalière fonction de $R = D.B/(B + R)$
v.28	7	perte journalière fonction de $R = D.(B + R)/B$
v.29	7	perte journalière fonction de $S = D.A/(A + S)$
v.30	7	perte journalière fonction de $S = D.(A + S)/S$



(a)



(b)



(c)

Fig. A3.1.3 - BV42, résultats de simulation de Septembre à Décembre, 1986
 P , Q_{obs} et Q_{calc} - jours: (a) v. originale; (b) v.EDIJATNO; (c) v.18.

Tableau A3.1.9 - Résultats du Calage de GR3J - Versions 16, 18, 23, 26, 28
valeurs moyennes et écart-type sur 8 bassins versants

VER	STA (8 bv)	critères					paramètres			
		NASH %	BILN %	CRU %	DRC	DRET	a	b	c	d
v. 16	m	70,2	12,4	77,6	0,96	0,05	5,64	3,94	0,31	0,38
	s	22,6	13,2	18,0	0,16	0,12	0,66	0,66	0,31	0,45
v. 18	m	70,4	11,9	77,5	0,97	0,05	5,64	3,92	-0,30	0,27
	s	22,6	13,2	17,9	0,16	0,13	0,67	0,66	0,31	0,33
v. 23	m	69,82	-5,4	78,1	1,27	-0,05	5,64	3,90	-0,27	0,09
	s	22,6	29,5	17,9	0,66	0,17	0,66	0,67	0,34	0,45
v. 26	m	68,7	-10,0	76,5	1,39	-0,04	5,58	3,56	-0,29	0,36
	s	22,0	40,1	14,8	0,81	0,16	0,82	0,76	0,32	0,37
v. 28	m	69,1	-10,0	75,9	1,35	-0,05	5,66	3,47	-0,25	0,23
	s	22,0	38,6	14,8	0,74	0,16	0,84	0,78	0,37	0,25

VER = versions du modèle ; STA = statistiques sur 8 bassins versants ; BILN = rapport des volumes ; CRU = rapport des crues annuelles moyennes ; DRC = rapport des durées des crues ; DRET = rapport des durées d'étiage.

Annexe 3.2 - RESULTATS DE CALAGE

versions 31 à 41

v.31

PARAMETRES FIXES :														0.90	0.00	0.00	5.00	3.00	3.00								
NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECK4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RK	TX									
BV 40	Coinon a Mainvilliers													80-84	S=	45	Pa=	600									
4	6.030.05	2.720.10	-0.270.06	0.900.02	84.9	9.9	92.51.12	0.13.22.67.34.920.62																			
BV 42	Grandchain a Grandchain													84-87	S=	12	Pa=	600									
4	5.910.07	2.200.19	0.140.24	1.250.04	67.0	-8.5	75.31.46	-0.02.22.64.37.960.54																			
BV a9	Le Rimbaud a Destrou													83-88	S=	1	Pa=	1138									
4	4.350.20	5.070.14	-0.570.03	-0.100.03	84.8	-11.7	89.20.96	-0.11.04.95.28.930.74																			
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)													77-82	S=	19	Pa=	759									
4	5.840.09	3.190.11	-0.030.04	0.390.10	86.9	-3.0	77.30.87	-0.05.23.84.33.980.60																			
BV b7	La Gaubretiere au Mureau (M510431)													74-78	S=	33	Pa=	620									
4	5.670.11	3.420.14	-0.200.05	-0.040.04	74.5	-6.9	82.31.05	-0.18.16.84.28.930.71																			
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)													78-82	S=	7	Pa=	763									
4	5.790.16	4.210.21	-0.690.09	0.080.24	60.2	-1.0	56.61.28	-0.05.21.75.31.800.60																			
BV b9	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)													76-80	S=	16	Pa=	546									
4	5.610.10	4.520.20	0.290.19	1.060.08	91.1	18.2103.30.99	0.21.08.77.25.800.76																				
BV c0	LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)													74-78	S=	29	Pa=	783									
4	6.580.30	3.550.28	-0.700.07	-0.320.09	18.4	-2.1	51.22.00	-0.09.21.74.28.970.72																			

v.32

PARAMETRES FIXES :														0.98	0.00	0.00	5.00	4.00	4.00								
NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECK4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RK	TX									
BV 40	Coinon a Mainvilliers													80-84	S=	45	Pa=	600									
4	6.090.00	2.020.10	-0.240.05	0.710.02	84.1	10.2101.90.87	0.02.21.69.00.970.00																				
BV 42	Grandchain a Grandchain													84-87	S=	12	Pa=	600									
4	6.140.06	1.600.15	0.400.03	1.000.00	74.6	-24.0	83.11.81	-0.14.24.64.00.990.00																			
BV a9	Le Rimbaud a Destrou													83-88	S=	1	Pa=	1138									
4	4.250.19	4.980.14	-0.530.03	-0.090.03	83.9	-9.0	91.40.94	-0.08.03.97.28.950.00																			
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)													77-82	S=	19	Pa=	759									
4	5.790.08	3.130.11	-0.010.04	0.300.08	87.5	-4.5	80.60.89	-0.05.21.87.06.990.00																			
BV b7	La Gaubretiere au Mureau (M510431)													74-78	S=	33	Pa=	620									
4	5.770.09	3.470.12	-0.220.04	-0.110.03	75.4	-11.5	86.01.11	-0.18.15.86.28.940.00																			
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)													78-82	S=	7	Pa=	763									
4	5.680.12	4.110.20	-0.700.11	0.070.18	62.6	5.1	61.01.24	0.00.18.79.29.840.00																			
BV b9	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)													76-80	S=	16	Pa=	546									
4	5.360.06	4.330.01	-0.110.20	0.970.07	88.7	8.5106.01.01	0.13.05.82.00.850.00																				
BV c0	LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)													74-78	S=	29	Pa=	783									
4	6.320.22	3.680.27	-0.700.07	-0.300.08	17.7	2.7	53.91.86	-0.04.16.79.28.970.00																			

v.33

PARAMETRES FIXES :														0.90	0.00	0.00	5.00	3.00	3.00								
NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECK4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RK	TX									
BV 40	Coinon a Mainvilliers													80-84	S=	45	Pa=	600									
4	6.010.05	3.080.10	-0.320.05	0.940.03	84.6	21.2	94.90.86	0.17.22.69.33.880.62																			
BV 42	Grandchain a Grandchain													84-87	S=	12	Pa=	600									
4	5.960.06	2.580.17	0.120.20	1.320.04	70.6	3.6	79.51.30	0.01.24.66.36.940.56																			
BV a9	Le Rimbaud a Destrou													83-88	S=	1	Pa=	1138									
4	4.350.20	5.070.14	-0.570.03	-0.100.03	84.8	-11.7	89.20.96	-0.11.04.95.28.930.74																			
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)													77-82	S=	19	Pa=	759									
4	5.840.09	3.250.11	-0.040.04	0.450.10	87.1	-0.2	77.50.87	-0.01.23.84.33.980.60																			
BV b7	La Gaubretiere au Mureau (M510431)													74-78	S=	33	Pa=	620									
4	5.670.11	3.420.14	-0.200.05	-0.040.04	74.5	-6.9	82.31.05	-0.18.16.84.28.930.71																			
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)													78-82	S=	7	Pa=	763									
4	5.790.15	4.220.21	-0.690.09	0.090.26	60.2	0.1	56.71.28	-0.03.21.75.31.800.60																			
BV b9	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)													76-80	S=	16	Pa=	546									
4	5.630.09	4.670.19	0.260.17	1.020.08	90.7	19.0104.80.98	0.22.08.78.25.790.76																				
BV c0	LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)													74-78	S=	29	Pa=	783									
4	6.580.30	3.550.28	-0.700.07	-0.320.09	18.4	-2.1	51.22.00	-0.09.21.74.28.970.72																			

Annexe 3.2 - suite

PARAMETRES FIXES : 0.98 0.00 0.00 5.00 4.00 4.00

NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RX	TX
4	6.110.04	2.190.14	-0.270.05	0.720.01	83.8	12.8103.50.80	0.03.22.70.00.960.00							80-84	S=	45	Pa=	600
4	6.150.05	1.870.13	0.360.17	1.050.00	76.3	-20.7	85.01.68-0.16.25.67.00.980.00							84-87	S=	12	Pa=	600
4	4.250.19	4.980.14	-0.530.03	-0.090.03	83.9	-9.0	91.40.94-0.08.03.97.28.950.00							83-88	S=	1	Pa=	1138
4	5.790.08	3.140.11	-0.010.04	0.340.09	87.6	-2.4	81.10.89-0.02.21.87.00.990.00							77-82	S=	19	Pa=	759
4	5.770.09	3.470.12	-0.220.04	-0.110.03	75.4	-11.5	86.01.11-0.18.15.86.28.940.00							74-78	S=	33	Pa=	620
4	5.660.12	4.120.19	-0.700.11	0.110.16	62.7	7.8	61.11.24	0.02.18.79.26.840.00						78-82	S=	7	Pa=	763
4	5.370.06	4.420.07	-0.120.00	0.950.06	88.6	8.1106.11.00	0.14.05.83.00.830.00							76-80	S=	16	Pa=	546
4	6.320.22	3.680.27	-0.700.07	-0.300.08	17.7	2.7	53.91.86-0.04.16.79.28.970.00							74-78	S=	29	Pa=	763

v.34

PARAMETRES FIXES : 0.96 0.00 0.00 4.00 5.00 5.00

NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RX	TX
4	5.920.05	1.820.17	-0.260.05	1.130.05	82.1	19.6103.00.70	0.07.17.73.00.981.00							80-84	S=	45	Pa=	600
4	6.120.00	1.550.23	0.400.03	1.360.03	74.5	-28.2	77.81.84-0.19.22.67.00.991.00							84-87	S=	12	Pa=	600
4	5.370.24	4.690.10	-0.510.03	0.660.22	83.5	10.9	88.30.78	0.02.01***.07.961.00						83-88	S=	1	Pa=	1138
4	5.730.07	3.120.11	-0.020.04	0.480.13	87.1	-4.9	82.30.92-0.02.18.89.00.991.00							77-82	S=	19	Pa=	759
4	5.440.06	3.250.12	-0.170.04	0.000.15	75.2	5.2	87.40.90-0.07.11.89.27.950.51							74-78	S=	33	Pa=	620
4	5.550.12	4.120.20	-0.690.10	0.220.24	63.2	11.5	62.21.22	0.07.15.82.23.840.65						78-82	S=	7	Pa=	763
4	5.300.09	4.420.16	-0.130.01	1.340.09	85.5	-3.8	77.21.22	0.12.04.85.00.821.00						76-80	S=	16	Pa=	546
4	3.610.31	2.460.34	-0.520.06	-0.170.05	36.6	19.5	67.31.33	0.20.01.98.27***.0.51						74-78	S=	29	Pa=	763

v.35

PARAMETRES FIXES : 0.90 0.00 0.00 5.00 3.00 3.00

NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RX	TX
4	6.180.07	3.920.10	-0.370.05	1.450.05	82.5	25.1	89.20.83	0.20.29.73.31.780.64						80-84	S=	45	Pa=	600
4	6.240.04	3.730.07	-0.080.11	2.170.04	69.1	13.4	79.10.89	0.03.34.73.34.840.61						84-87	S=	12	Pa=	600
4	3.380.25	4.840.08	-0.550.03	0.070.46	85.2	6.3	86.20.88-0.01.02***.00.941.00							83-88	S=	1	Pa=	1138
4	5.900.07	3.390.10	-0.050.04	0.750.14	87.1	2.0	77.40.89	0.04.25.84.30.980.64						77-82	S=	19	Pa=	759
4	5.830.08	3.630.13	-0.250.04	-0.270.06	75.8	-17.6	86.21.10-0.22.16.81.28.920.70							74-78	S=	33	Pa=	620
4	5.810.13	4.230.21	-0.690.09	0.090.41	60.3	-0.1	56.61.28-0.03.22.75.30.800.62							78-82	S=	7	Pa=	763
4	5.500.12	5.020.17	0.210.14	1.410.08	90.4	23.8104.90.86	0.26.07.81.16.740.96							76-80	S=	16	Pa=	546
4	6.810.24	3.240.32	-0.690.07	-0.940.21	17.5	10.1	50.21.56-0.04.21.60.28.990.60							74-78	S=	29	Pa=	763

v.36

PARAMETRES FIXES : 0.90 0.00 0.00 0.00 3.00 3.00

NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RX	TX
4	5.990.01	2.670.03	-0.360.00	0.840.00	82.7	-13.0	92.20.75-0.11.26.76.00.911.00							80-84	S=	45	Pa=	600
4	6.500.07	2.470.11	-0.070.15	1.040.02	62.0	-93.0	86.92.19-0.33.38.71.00.941.00							84-87	S=	12	Pa=	600
4	3.370.00	4.830.02	-0.550.02	0.020.00	85.2	7.1	86.60.86-0.02.02***.00.941.00							83-88	S=	1	Pa=	1138
4	5.900.00	3.180.00	-0.050.03	0.280.00	87.8	1.4	80.00.93	0.02.25.84.00.981.00						77-82	S=	19	Pa=	759
4	5.830.08	3.630.13	-0.250.04	-0.270.06	75.8	-17.6	86.21.10-0.22.16.81.28.920.70							74-78	S=	33	Pa=	620
4	5.580.01	4.180.00	-0.690.05	0.170.00	62.7	21.4	57.51.21	0.07.19.79.00.831.00						78-82	S=	7	Pa=	763
4	6.250.07	4.050.02	0.430.08	0.050.01	81.5	-49.7	76.61.44-0.23.12.71.12.850.98							76-80	S=	16	Pa=	546
4	6.810.24	3.240.32	-0.690.07	-0.940.21	17.5	10.1	50.21.56-0.04.21.60.28.990.60							74-78	S=	29	Pa=	763

v.37

Annexe 3.2 - suite

v.38

PARAMETRES FIXES :															0.90	0.00	0.00	10.00	3.00	3.00
NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RK	TX		
BV 40	Coinon & Mainvilliers													80-84	S=	45	Pa=	600		
4	6.130.03	2.130.12	-0.110.07	0.990.03	83.2	6.9	89.71.23	0.11.19.60	35.960.00					84-87	S=	12	Pa=	600		
BV 42	Grandchain & Grandchain													83-88	S=	1	Pa=	1138		
4	6.230.08	1.720.28	0.320.38	1.250.03	57.4-17.0	62.91.97	-0.06.20.56	40.980.00						77-82	S=	19	Pa=	759		
BV a9	Le Rimbaud & Destrou													74-78	S=	33	Pa=	620		
4	3.96-.99	4.82-.99	-0.55-.99	-0.60-.99	83.9	0.5	85.20.85	-0.06.03.96	28.950.00					76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)													78-82	S=	7	Pa=	763		
4	5.880.08	3.080.12	-0.010.04	0.360.10	96.8	-5.3	75.80.89	-0.06.23.82	33.990.00					76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b7	La Gaubretiere au Mureau (M510431)													74-78	S=	33	Pa=	620		
4	5.36-.99	3.36-.99	-0.19-.99	-0.12-.99	74.1	-1.9	82.30.93	-0.15.15.84	28.930.00					78-82	S=	7	Pa=	763		
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)													76-80	S=	16	Pa=	546		
4	5.84-.99	4.20-.99	-0.69-.99	-0.12-.99	60.1	-5.3	56.71.33	-0.09.22.75	31.800.00					74-78	S=	29	Pa=	763		
BV b9	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.840.07	4.150.20	0.380.13	0.720.07	88.4	-3.8104.51	17.0.06.07	71.26.840.00						74-78	S=	29	Pa=	763		
BV c0	LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.87-.99	2.92-.99	-0.70-.99	-0.60-.99	16.0	33.7	44.61.17	0.12.12.76	28.990.00											

v.39

PARAMETRES FIXES :															0.96	0.00	0.00	5.00	4.00	4.00
NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RK	TX		
BV 40	Coinon & Mainvilliers													80-84	S=	45	Pa=	600		
4	6.230.05	1.970.12	-0.220.05	0.760.03	83.9	5.1101.90	90-0.03.24.67	00.971.00						84-87	S=	12	Pa=	600		
BV 42	Grandchain & Grandchain													83-88	S=	1	Pa=	1138		
4	6.170.06	1.680.14	0.320.28	1.470.03	75.9-28.5	83.81.76	-0.21.25.65	00.981.00						77-82	S=	19	Pa=	759		
BV a9	Le Rimbaud & Destrou													74-78	S=	33	Pa=	620		
4	4.230.19	5.000.14	-0.540.03	-0.090.03	84.1	-9.2	90.90.94	-0.09.03.97	28.940.53					78-82	S=	7	Pa=	763		
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)													76-80	S=	16	Pa=	546		
4	5.800.07	3.140.11	-0.020.04	0.380.10	87.5	-4.1	80.60.91	-0.04.21.87	00.991.00					74-78	S=	33	Pa=	620		
BV b7	La Gaubretiere au Mureau (M510431)													78-82	S=	7	Pa=	763		
4	5.770.09	3.480.12	-0.220.04	-0.110.03	75.5-11.5	85.61.12	-0.18.15.86	28.930.48						76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.660.13	4.110.20	-0.690.09	0.140.20	62.6	8.1	60.81.22	0.02.18.79	26.840.51					76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b9	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.360.09	4.420.16	-0.100.20	1.040.08	87.1	0.3	77.21.11	0.12.05.83	00.821.00					74-78	S=	29	Pa=	763		
BV c0	LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	6.300.22	3.640.27	-0.700.07	-0.290.08	17.7	4.1	53.51.83	-0.03.15.79	28.970.54											

v.40

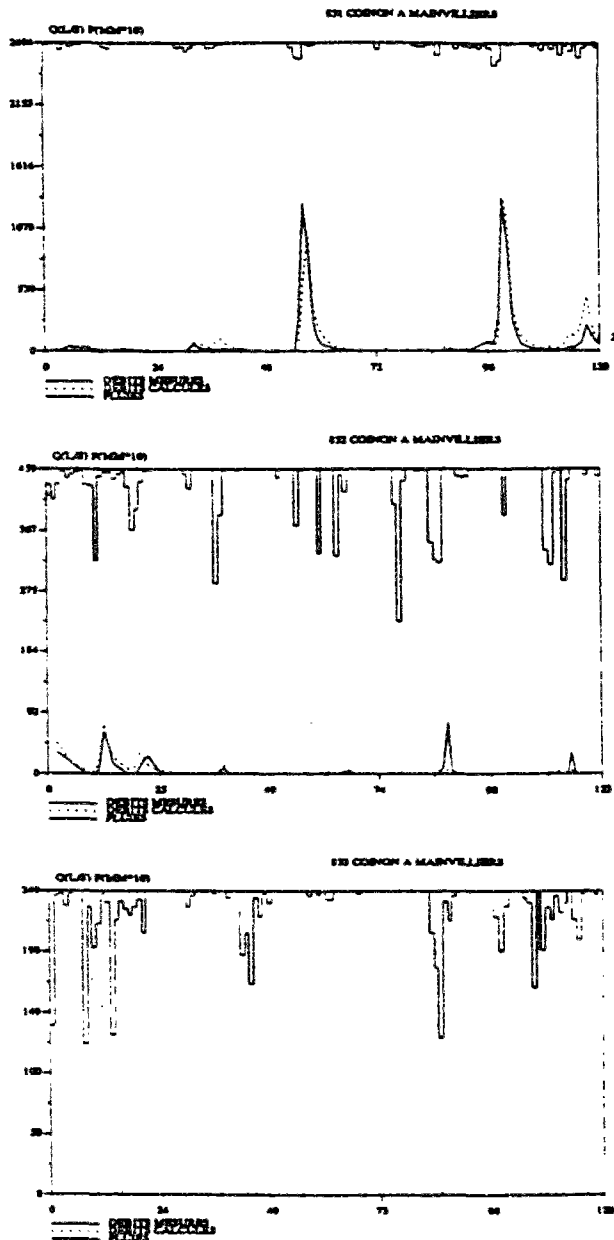
PARAMETRES FIXES :															0.90	0.00	0.00	5.00	10.00	0.00
NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RK	TX		
BV 40	Coinon & Mainvilliers													80-84	S=	45	Pa=	600		
4	5.050.04	3.660.05	-0.310.09	2.490.03	79.3	8.6	78.41.04	0.05.00***	00.730.00					84-87	S=	12	Pa=	600		
BV 42	Grandchain & Grandchain													83-88	S=	1	Pa=	1138		
4	6.250.03	1.840.25	-0.010.15	1.940.08	66.9-25.6	84.91.57	-0.23.41.97	00.990.00						77-82	S=	19	Pa=	759		
BV a9	Le Rimbaud & Destrou													74-78	S=	33	Pa=	620		
4	3.140.08	4.740.10	-0.570.03	0.390.42	82.2	12.6	86.30.80	0.02.00***	19.950.00					78-82	S=	7	Pa=	763		
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)													76-80	S=	16	Pa=	546		
4	5.100.04	3.610.07	-0.120.05	0.730.00	76.9	-7.0	94.40.95	0.05.00***	00.970.00					74-78	S=	33	Pa=	620		
BV b7	La Gaubretiere au Mureau (M510431)													78-82	S=	7	Pa=	763		
4	4.970.00	3.810.06	-0.280.05	0.160.06	71.6	22.7	81.60.87	0.07.00***	00.890.00					76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	4.800.04	4.340.15	-0.700.11	0.510.04	59.1	28.5	73.41.20	0.24.00***	00.830.00					76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b9	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.040.06	4.390.14	0.090.22	2.240.12	87.7	45.0101.40	53.0.26.00***	00.800.00						74-78	S=	29	Pa=	763		
BV c0	LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.08-.99	2.59-.99	-0.61-.99	-0.28-.99	15.0	45.9	55.21.14	0.27.00***	25***0.00											

v.41

PARAMETRES FIXES :															0.90	0.00	0.00	5.00	10.00	10.00
NP	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	X4	ECX4	NASH	BILN	CRU	DRC	DRET	SN	SX	RN	RK	TX		
BV 40	Coinon & Mainvilliers													80-84	S=	45	Pa=	600		
4	4.230.04	3.630.03	-0.290.10	1.670.00	72.2	35.2	56.40.67	0.16.00***	00.750.00					84-87	S=	12	Pa=	600		
BV 42	Grandchain & Grandchain													83-88	S=	1	Pa=	1138		
4	5.060.01	8.929.33	-0.100.32	0.390.37	37.3	9.4	29.42.03	-0.19.00***	01.070.00					77-82	S=	19	Pa=	759		
BV a9	Le Rimbaud & Destrou													74-78	S=	33	Pa=	620		
4	3.380.12	5.190.12	-0.620.03	-0.120.03	83.6	-8.9	89.20.98	-0.10.00***	27.910.00					78-82	S=	7	Pa=	763		
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)													76-80	S=	16	Pa=	546		
4	4.970.06	3.650.14	-0.130.05	0.420.13	76.9	-7.3	93.70.92	0.03.00***	00.970.00					74-78	S=	33	Pa=	620		
BV b7	La Gaubretiere au Mureau (M510431)													78-82	S=	7	Pa=	763		
4	5.180.04	3.740.15	-0.280.05	0.060.03	72.8	14.4	89.50.87	0.04.00***	23.910.00					76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.020.09	4.260.21	-0.690.11	0.000.25	60.9	18.3	75.91.35	0.20.00***	25.850.00					76-80	S=	16	Pa=	546		
BV b9	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.030.05	4.340.13	-0.160.15	1.100.08	81.2	20.5109.90	79.0.18.00***	00.790.00						74-78	S=	29	Pa=	763		
BV c0	LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)													74-78	S=	29	Pa=	763		
4	5.450.05	3.860.28	-0.700.07	-0.250.04	18.0	16.7	65.31.94	0.16.00***	24.970.00											

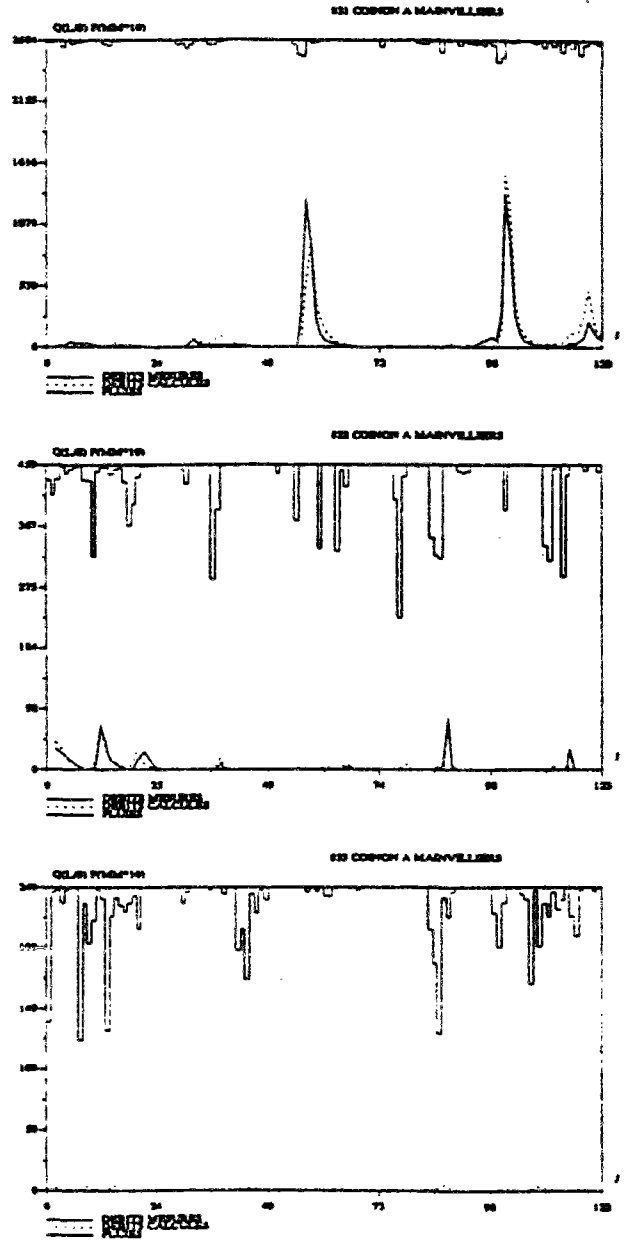
Annexe 3.2 - suite

bv40



(a)

bv40



(b)

BV40, résultats de simulation de Janvier à Décembre, 1983
 P , Q_{obs} et Q_{calc} - jours: (a) v. 32; (b) v.34.

Annexe 3.3 - ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES version 32

PARAMETRES FIXES : 0.98 0.00 0.00 5.00 4.00 4.00

BV 40 Coinon a Mainvilliers 80-84 S= 45 Pa= 600
 (intermittent)

VALEURS OPTIMALES : ln(A)= 6.09 ln(B)= 2.02 ln(C)= -0.24
 ln(X4)= 0.71 ln(X5)= 0.00 ln(X6)= 0.00
 ecarts-types des transformees des parametres:
 X1: 0.00 X2: 0.10 X3: 0.05 X4: 0.02
 Matrice des correlations des parametres:
 1.00000 0.44732 0.30559 -0.40799
 0.44732 1.00000 0.37086 -0.60979
 0.30559 0.37086 1.00000 0.31548
 -0.40799 -0.60979 0.31548 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1981-1984

duree de mise en route: 365 jours
 critere de Nash(var.expliquee): 84.1 %
 erreur de bilan (/module M): 10.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 101.93 %
 rapport des durees ou Q>4*M: 60/ 69
 rapport des durees ou Q<M/4: 1035/ 1005

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
 0 0 0 0 57 134 304 414 509 657 766 897 9511000100010001000100010001000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
 54 58 57 53 47 41 32 28 27 36 44 52
 10 7 6 6 5 4 3 3 5 6 8 10

.....

BV 42 Grandchain a Grandchain 84-87 S= 12 Pa= 600
 (intermittent)

VALEURS OPTIMALES : ln(A)= 6.14 ln(B)= 1.60 ln(C)= 0.40
 ln(X4)= 1.00 ln(X5)= 0.00 ln(X6)= 0.00
 ecarts-types des transformees des parametres:
 X1: 0.06 X2: 0.15 X3: 0.03 X4: 0.00
 Matrice des correlations des parametres:
 1.00000 -0.05757 -0.60553 -0.40885
 -0.05757 1.00000 -0.60708 -0.12293
 -0.60553 -0.60708 1.00000 0.05749
 -0.40885 -0.12293 0.05749 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1985-1987

duree de mise en route: 365 jours
 critere de Nash(var.expliquee): 74.6 %
 erreur de bilan (/module M): -24.0 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 83.07 %
 rapport des durees ou Q>4*M: 67/ 37
 rapport des durees ou Q<M/4: 824/ 968

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
 0 0 0 0 16 53 159 312 434 526 693 90210001000100010001000100010001000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
 57 58 57 58 50 45 37 35 34 38 45 51
 5 3 3 3 2 5 5 7 4 7 8 7

Annexe 3.3 - suite

```

.....
BV a9          Le Rimbaud & Destrou          83-88 S= 1 Pa=1138
.....
VALEURS OPTIMALES :          ln(A)= 4.25   ln(B)= 4.98   ln(C)= -0.53
                               ln(X4)= -0.09   ln(X5)= 0.00   ln(X6)= 0.00
ecarts-types des transformees des parametres:
X1: 0.19 X2: 0.14 X3: 0.03 X4: 0.03
Matrice des correlations des parametres:
1.00000 -0.23323 0.32716 -0.15725
-0.23323 1.00000 -0.81269 -0.80239
0.32716 -0.81269 1.00000 0.46850
-0.15725 -0.80239 0.46850 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1984-1988
duree de mise en route .....: 365 jours
critere de Nash(var.expliquee) .....: 83.9 %
erreur de bilan (/module M) .....: -9.0 %
rapport des crues annuelles moyennes: 91.43 %
rapport des durees ou Q>4*M .....: 89/ 95
rapport des durees ou Q<M/4 .....: 738/ 880

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
74 188 267 310 351 384 417 449 485 524 562 599 645 696 765 831 900 962 9951000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
78 75 57 42 38 16 11 14 19 57 69 74
12 12 19 22 24 15 10 17 16 23 18 11

```

```

.....
BV b6          LA CLOUERE AU POUX (L230301)    77-82 S= 19 Pa= 759
.....
VALEURS OPTIMALES :          ln(A)= 5.79   ln(B)= 3.13   ln(C)= -0.01
                               ln(X4)= 0.30   ln(X5)= 0.00   ln(X6)= 0.00
ecarts-types des transformees des parametres:
X1: 0.08 X2: 0.11 X3: 0.04 X4: 0.08
Matrice des correlations des parametres:
1.00000 -0.13492 0.06461 -0.66079
-0.13492 1.00000 -0.26376 -0.32939
0.06461 -0.26376 1.00000 0.02405
-0.66079 -0.32939 0.02405 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1978-1982
duree de mise en route .....: 365 jours
critere de Nash(var.expliquee) .....: 87.5 %
erreur de bilan (/module M) .....: -4.5 %
rapport des crues annuelles moyennes: 80.64 %
rapport des durees ou Q>4*M .....: 119/ 133
rapport des durees ou Q<M/4 .....: 939/ 1022

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
0 0 0 0 33 152 235 300 350 406 441 516 583 653 764 869 993100010001000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
76 80 79 71 61 50 38 30 28 42 54 66
6 3 2 8 9 10 6 3 4 12 15 15

```

Annexe 3.3 - suite

```

.....
BV b7          La Gaubretiere au Mureau (M510431)      74-78 S= 33 Pa= 620
.....
VALEURS OPTIMALES :          ln(A)= 5.77   ln(B)= 3.47   ln(C)= -0.22
                              ln(X4)= -0.11  ln(X5)= 0.00   ln(X6)= 0.00
ecarts-types des transformees des parametres:
X1: 0.09 X2: 0.12 X3: 0.04 X4: 0.03
Matrice des correlations des parametres:
 1.00000 -0.11044 0.28945 -0.83184
-0.11044 1.00000 -0.41373 -0.39633
 0.28945 -0.41373 1.00000 -0.06976
-0.83184 -0.39633 -0.06976 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1975-1978
duree de mise en route .....: 365 jours
critere de Nash(var.expliquee) .....: 75.4 %
erreur de bilan (/module M) .....: -11.5 %
rapport des crues annuelles moyennes: 85.95 %
rapport des durees ou Q>4*M .....: 92/ 83
rapport des durees ou Q<M/4 .....: 579/ 808

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
 0 0 4 103 192 266 356 433 476 534 623 708 760 800 884 960 9931000100010000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
 64 72 71 63 51 39 30 23 24 32 41 54
 10 9 10 11 12 11 6 6 6 10 16 15

```

```

.....
BV b8          LE VERMEIL A LEZAT (O184741)           78-82 S= 7 Pa= 763
.....
VALEURS OPTIMALES :          ln(A)= 5.68   ln(B)= 4.11   ln(C)= -0.70
                              ln(X4)= 0.07   ln(X5)= 0.00   ln(X6)= 0.00
ecarts-types des transformees des parametres:
X1: 0.12 X2: 0.20 X3: 0.11 X4: 0.18
Matrice des correlations des parametres:
 1.00000 -0.17653 -0.40087 -0.67038
-0.17653 1.00000 -0.60523 -0.43711
-0.40087 -0.60523 1.00000 0.46270
-0.67038 -0.43710 0.46270 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1979-1982
duree de mise en route .....: 365 jours
critere de Nash(var.expliquee) .....: 62.6 %
erreur de bilan (/module M) .....: 5.1 %
rapport des crues annuelles moyennes: 61.05 %
rapport des durees ou Q>4*M .....: 57/ 46
rapport des durees ou Q<M/4 .....: 523/ 521

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
 0 0 0 12 99 190 302 374 418 466 543 613 705 807 950100010001000100010000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
 68 73 71 63 53 42 31 27 26 36 50 63
 10 3 3 5 7 7 7 5 4 10 12 10

```

Annexe 3.3 - suite

```

.....
BV b9          LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)          76-80 S= 16 Pa= 546
.....
VALEURS OPTIMALES :          ln(A)= 5.36   ln(B)= 4.33   ln(C)= -0.11
                               ln(X4)= 0.97   ln(X5)= 0.00   ln(X6)= 0.00
ecarts-types des transformees des parametres:
X1: 0.06 X2: 0.01 X3: 0.20 X4: 0.07
Matrice des correlations des parametres:
 1.00000 -0.13359 -0.52872 -0.78720
-0.13359 1.00000 0.10859 0.00832
-0.52872 0.10859 1.00000 0.45578
-0.78720 0.00832 0.45578 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1977-1980
duree de mise en route .....: 365 jours
critere de Nash(var.expliquee) .....: 88.7 %
erreur de bilan (/module M) .....: 8.5 %
rapport des crues annuelles moyennes: 105.96 %
rapport des durees ou Q>4*M .....: 82/ 81
rapport des durees ou Q<M/4 .....: 1134/ 944

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
 0 125 256 371 462 548 614 654 694 744 782 812 865 925 972 9881000100010001000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
 62 62 50 32 25 19 11 11 14 28 41 46
 14 11 7 7 7 6 4 6 6 21 22 20

```

```

.....
BV c0          LE FRANCOLO A BALISTRA (Y982501)          74-78 S= 29 Pa= 763
.....
VALEURS OPTIMALES :          ln(A)= 6.32   ln(B)= 3.68   ln(C)= -0.70
                               ln(X4)= -0.30   ln(X5)= 0.00   ln(X6)= 0.00
ecarts-types des transformees des parametres:
X1: 0.22 X2: 0.27 X3: 0.07 X4: 0.08
Matrice des correlations des parametres:
 1.00000 0.23333 -0.39045 -0.94392
 0.23333 1.00000 -0.81952 -0.49375
-0.39045 -0.81952 1.00000 0.53088
-0.94392 -0.49375 0.53088 1.00000

criteres de performance du modele GR3 sur la periode : 1975-1978
duree de mise en route .....: 365 jours
critere de Nash(var.expliquee) .....: 17.7 %
erreur de bilan (/module M) .....: 2.7 %
rapport des crues annuelles moyennes: 53.89 %
rapport des durees ou Q>4*M .....: 67/ 36
rapport des durees ou Q<M/4 .....: 646/ 708

DISTRIBUTION DES VALEURS DE S :
 0 0 0 60 146 227 292 361 446 529 578 669 756 882 94410001000100010001000

MOYENNES ET ECARTS TYPES MENSUELS DE 100*S/A :
 58 65 65 63 55 43 28 22 26 36 53 63
 17 11 8 6 6 5 3 5 7 11 13 9

```


Annexe 3.4 - Les Problèmes qui Persistent

A3.4.1 - Revenir à trois paramètres ?

GR3J, par la v. 32 est devenu un modèle à 4 paramètres. En observant le comportement des paramètres, on remarque que le paramètre A est très bien identifié pour tous les bassins versants et qu'il présente, en plus, un faible écart-type pour les 8 bassins ce qui permet de justifier un essai du modèle en le gardant fixe. On l'a, donc, transformé en paramètre fixe ayant pour valeur $a = 5,68$. Il s'agit de la valeur de la moyenne de a calculée sur les 8 bassins. Les résultats globaux de cet essai sont présentés dans le tableau A3.4.1.

Cette solution à 3 paramètres, plus simple, est sensiblement moins satisfaisante. En termes de valeurs moyennes des critères elle est comparable à la version EDIATNO. Ces résultats nous amènent à conclure que, puisqu'il existe des bassins pour lesquels la version originale GR3J marche convenablement, il pourrait être imprudent de leur appliquer une mesure peu appropriée telle que celle qui consisterait à fixer le paramètre A . Pour les autres bassins les 4 paramètres restent probablement nécessaires. On retient donc la version v.32.

**Tableau A3.4.1 - Résultats du Calage de GR3J
revenir à trois paramètres ?**

VER	STA (8 bv)	critères					paramètres			
		NASH %	BILN %	CRU %	DRC	DRET	a	b	c	d
	m	68,9	0,38	82,4	1,15	-0,02	5,68	3,38	-0,79	0,36
	s	21,8	6,55	17,8	0,29	0,08	0,01	0,96	1,38	0,48

VER = versions du modèle ; STA = statistiques sur 8 bassins versants ; BILN = rapport des volumes ; CRU = rapport des crues annuelles moyennes ; DRC = rapport des durées des crues ; DRET = rapport des durées d'étiage.

A3.4.2 - Séquences sèches-humides au long de l'année.

Une représentation inadéquate de la reprise des écoulements au début des périodes humides de l'année est une limitation souvent attribuée aux modèles à réservoirs (voir chapitre 1). La séquence des mois à faible précipitation conduit à une diminution généralement importante du niveau du réservoir-sol et quand les premières pluies d'hiver arrivent, la plus grande partie du volume d'eau est utilisée pour ramener ce réservoir au niveau moyen de période humide, ce qui fréquemment interdit une réponse rapide du modèle. Ce comportement est aussi observé dans le cas du modèle GR3J v. 32, comme on peut le constater dans la figure A3.4.1.

Au début de Septembre 1977, le niveau du réservoir-sol, pour le BVB9, est inférieur à 100 mm. La séquence des pluies observées entre ce mois et la fin Décembre amène S à 140 mm, mais le modèle représente mal les crues de la période. Le début de l'année 1979 est caractérisé par des pluies très importantes, le modèle représente fidèlement les crues observées. Après Février les pluies sont moins importantes et éparpillées dans le temps. Vers le 25 Mai, le niveau de $S = 70$ mm, le modèle ne répond pas aux pluies du 26 au 27 Mai, qui présentent un volume total de 53 mm. Au 27 Mai, $S = 104$ mm.

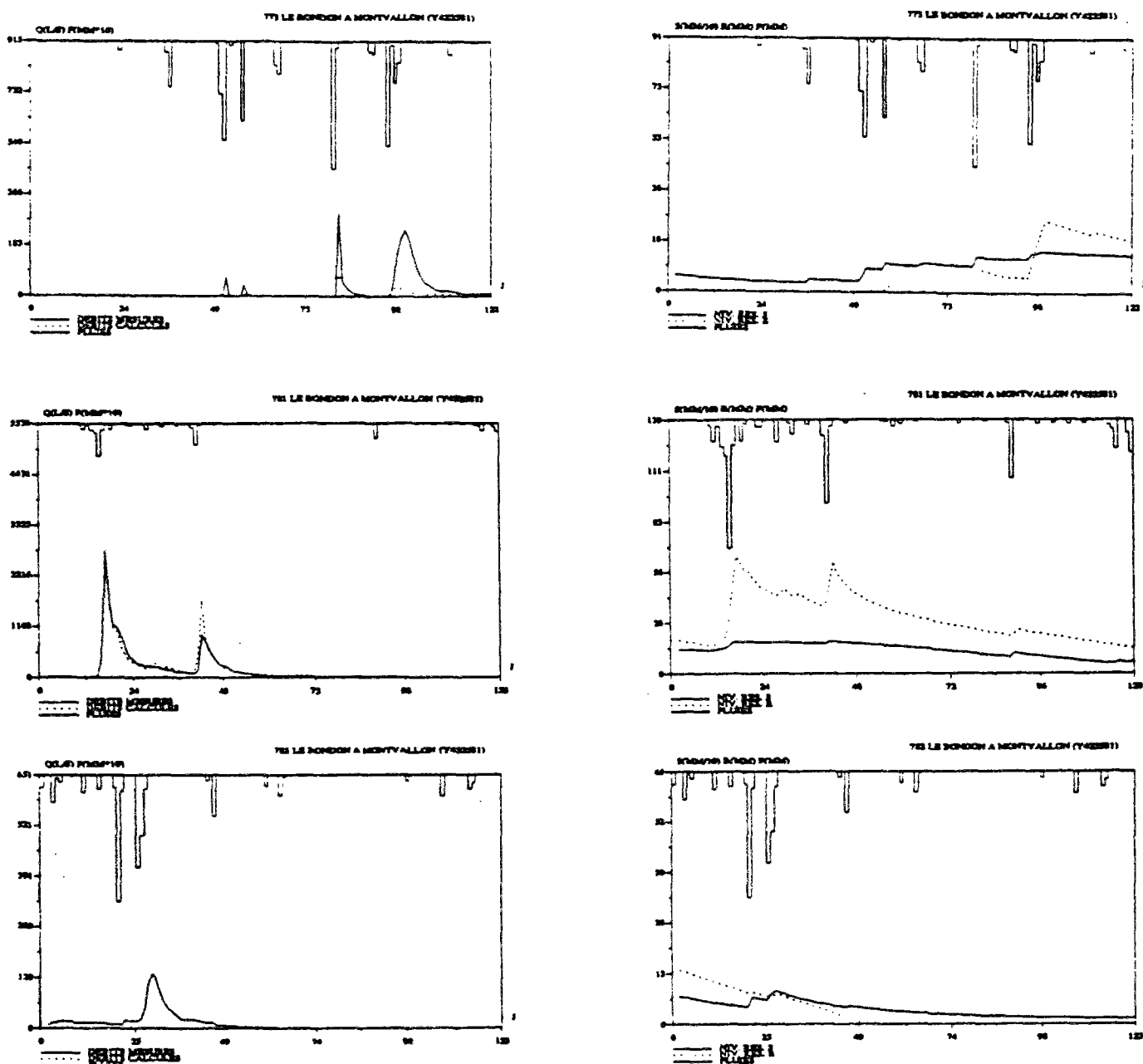


Fig. A3.4.1 - BVB9, résultats de simulation de Septembre 1977 à Août, 1978
 P , Q_{obs} et Q_{calc} - jours, P , S et R - jours

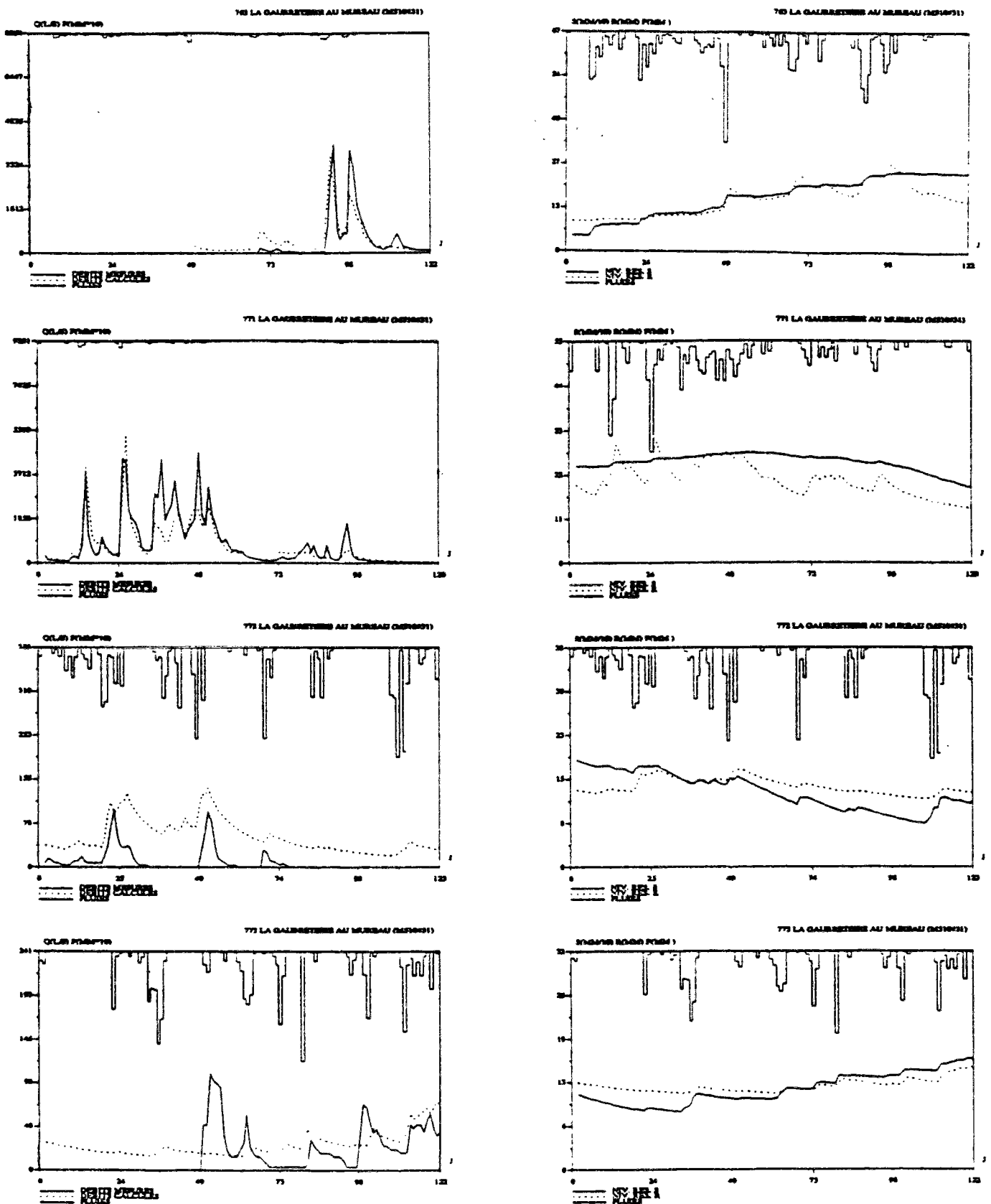


Fig. A3.4.2 - BVB7, résultats de simulation de Septembre 1976 à Décembre 1977
 P , Q_{obs} et Q_{calc} - jours, P , S et R - jours.

Cependant, l'effet peut être inverse, quand le bassin est soumis à de longues périodes pluvieuses (figure A3.4.2). Dans ce cas, on observe l'effet sur le modèle d'une longue séquence de mois pluvieux. Entre Septembre 1976 et Avril 1977, la représentation des débits, pour le BVB7, est correcte. Le réservoir-sol passe d'un niveau de 50 mm (début Septembre 1976) à un niveau de 200 mm (fin Avril 1977) comme résultat d'une séquence de pluies très importantes au début de 1977. Comme les mois suivants sont assez humides, le niveau de S reste presque toujours au dessus de 100 mm et le niveau de R ne tombe jamais à zéro. Le modèle représente un bassin pérenne au cours de cette période.

Le caractère non linéaire de la relation pluie-débit dans les bassins versants est fortement lié à la variation de l'humidité de sol dans le temps et au rapport entre la capacité d'infiltration et l'intensité de la pluie. Ce phénomène reste à mieux connaître et à mieux représenter par les modèles.

A3.4.3 - Le problème de la validation du modèle

Les essais réalisés ont suivi la méthodologie de construction des modèles décrite au chapitre 1 sauf l'application expérimentale qui concerne la validation. Cela est dû surtout à la taille des séries disponibles et au comportement intermittent du phénomène étudié. Dans certains cas on ne dispose pas plus d'une douzaine d'événements.

Cette étape de la modélisation est à envisager dès que l'on dispose de séries de données adéquates à la réalisation d'une telle tâche.

Annexe 3.5 - LES 121 BASSINS VERSANTS

Tableau A. 3.5 - Caractéristiques et durées des séries des données hydrologiques de calage
(SUP : superficie du bassin versant ; PAM : précipitation annuelle moyenne)

No.	Nom de bassin versant	période	SUP	PAM
1	LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)	76-80	16	546
2	L'ORGEVAL AU THEIL	81-83	104	661
3	LE VACON A BARBAS	73-77	35	983
4	LA MEURTHE A DAMELEVIÈRES	73-77	2404	1054
5	LA MORTAGNE A GERBEVILLER	73-77	439	1085
6	LA VEZOUZE A LUNEVILLE	73-77	559	696
7	LA MEURTHE A FRAIZE	73-77	69	1048
8	LE RABODEAU A MOYENMOUTIER	73-77	153	1086
9	LA MEURTHE A RAON L'ETAPE	74-77	727	1067
10	LA SEINE A BAR-SUR-SEINE	73-77	2340	720
11	LE COET-DAN A NAIZIN	83-86	12	899
12	L'ORGEVAL A MELARCHEZ	78-82	7	661
13	RU DU FOUR A RONCHERES	81-83	6	630
14	RU DU FOUR A RONCHERES	84-86	6	630
15	RU DU FOUR A PERRIAUX	82-85	3	630
16	REAL COLLOBRIER A PONT DE FER	77-80	71	1138
17	CANNER	81-85	33	727
18	ELVON A LEMUD	81-85	16	706
19	CHERISEY	83-85	17	706
20	ELLE A PONT-TY-NADAN	70-74	580	963
21	VALESCURE AUX BOURDINS	77-79	9	1279
22	MAURETS AUX BOURDINS	77-79	9	1176
23	L'ETHELIN A CHATILLON-SUR-LOIRE	81-85	27	650
24	LE POULAIN A POULAINES	81-84	22	688
25	LE NE A ST.FORT-SUR-LE NE	75-79	529	910
26	LE LIEUTEL A VICQ	83-85	71	605
27	LE LEZERT A LA BANCALIE	73-77	27	1039
28	LA PETITE BARGUELONNE A MONTCUQ	77-81	62	866
29	CHAPOUILLET A CHASSIGNOLLES	78-82	67	830
30	LA COURMERAN A BOISSONNEAU	69-73	16	753
31	L'OSSE A MIELAN-CASTEX	71-75	10	870
32	LE LAGOIN A ARESSY	73-77	76	1174
33	LA COUZE AU SOULIER	82-86	64	1046
34	LA BRAME A LA PERRIERE	84-86	235	854
35	L'ARDOUR A FORGEFER	83-86	131	983
36	MICHELBAH A MICHELBAH	78-82	3	1050
37	MORTAGNE A STE. HELENE	77-81	100	989
38	ANDON A CLERY-GRAND	79-81	61	700
39	BORSIN A SAVIGNY	79-81	7	790
40	VERNISSON A NOGENT-SUR-VERNISSON	80-84	68	653
41	PUISEAUX A ST. HILAIRE	81-85	94	653
42	BIESME AU CLAON	81-83	71	923
43	COINON A MAINVILLIERS	80-84	45	578
44	CHARENTONNE A FERRIERES ST.HILAIRE	78-82	257	726
45	GRANCHAIN A GRANCHAIN	84-87	12	734
46	SOULEUVRE A CARVILLE	83-87	115	1020
47	JARLOT A L'HERMITAGE PLOUGONVEN	81-85	44	1006
48	LANGELIN A BRIEC DE L'ODET	82-84	6	1136
49	COET ORGAN A KERDEC-EN-QUISTINIC	78-82	48	950
50	ARON A BERNADAIS GD FOUGERAY	84-88	119	809
51	AFF SUPERIEUR A PAIMPONT PONT DU SECRET	77-81	30	886
52	ARZON A CHOMELIX PONT/DL	81-84	76	800

Annexe 3.5 - suite

53	TEYSSONNE A LA NOAILLERIE	81-85	23	834
54	DRAGNE A VANDENESSE	79-83	115	1130
55	IXEURE A LA FERMETE	80-84	115	912
56	ANDOUX A MARINGUES	80-84	60	700
57	NERE A AUBIGNY-SUR-NERE	80-84	79	788
58	OLIVET A BEAUMONT-VILLAGE	77-81	76	680
59	RHONE A NOGENT LE ROTROU	80-84	79	776
60	ESCOTAIS A ST. PATERNE RACAN	81-83	76	680
61	DONNEAU A MESANGER	83-87	79	724
62	DIVATTE A LANDEMONT	83-87	60	734
63	FALLERON A FALLERON	80-84	31	913
64	CHAMBON A DONIA	83-87	61	905
65	VOLP A STE. CROIX-VOLVESTRE	83-87	91	973
66	BANDIAT A FEUILLADE	78-82	333	941
67	EYRAUD A BITAREL	78-80	74	801
68	BAHUS A EUGENIE-LES-BAINS	82-86	49	935
69	MENDIALCU A HASPAREN	77-81	18	1990
70	AUME A LONGRE	75-77	90	871
71	BREUCHIN A PROISELIERE	77-80	123	1871
72	OGNON A FOURGUENONS	81-84	74	1892
73	RAHIN A PLANCHER-BAS	81-83	33	2188
74	ROSEMONTAISE A ROSEMONT	77-80	7	2012
75	RUPT A DUNG	77-81	42	1090
76	FURIEUSE A SALINS-LES-BAINS	82-86	43	1353
77	BRENNE A SELLIERES	77-81	37	1261
78	VEYLE A LENT	80-84	34	958
79	REDON A MARGENCEL	77-81	31	1200
80	IRE A DOUSSARD	81-85	27	1200
81	GLUEYRE A TISONECHE	85-87	71	1250
82	JABRON A SOUSPIERRE	78-82	85	930
83	MONDONY A AMELIE-LES-BAINS	82-86	32	800
84	BATAILLER A LA VERRERIE	81-83	9	950
85	MOLE AU DESTEL	83-87	44	950
86	VERNE AUX CABRIS	77-79	38	950
87	GARDE A GRIMAUD	83-87	18	950
88	PETROSO A PONT-DE-BALA	79-83	53	801
89	HELPE MINEUR A ETROEUNGT	81-84	175	918
90	HELPE MINEUR A MAROILLES	81-85	275	889
91	HELPE MAIEUR A LIESSIES	81-85	187	800
92	HELPE MAIEUR A TAISNIERES	81-85	320	800
93	SAMBRE A MAUBEUGE	84-87	1075	835
94	QUEFFLEUTH A LESQUIPOU-PLOURIN L.M	81-85	88	1006
95	LA COUSANCES A AUBREVILLE	81-83	166	997
96	CHAUSSEY A MANEVILLE-LA PIPARD	83-87	52	785
97	SEUGNE A PONS	79-83	882	920
98	SAULDRE A SALBRIS	82-86	1200	772
99	CELE AUX AMIS DU CELE	79-83	1190	1022
100	ARGENS AUX ARCS	83-87	1730	854
101	CHARENTE A SURIS	80-83	110	895
102	CHARENTE A ST. SAVIOL	75-79	492	855
103	CHARENTE A CHENON	79-83	1071	872
104	BONNIEURE A VILLEBETTE	76-80	203	912
105	TARDOIRE A MONTBRON	78-82	389	951

Annexe 3.5 - suite

106	TARDOIRE A COULGENS	78-82	1200	926
107	CHARENTE A LUXE	77-79	3000	897
108	AUME AUX MARAIS 2	79-83	452	818
109	CHARENTE A CHALONNES	78-82	3750	878
110	TREZENCE A TOURNAY	76-79	75	856
111	BOUTONNE AU VERT	80-83	523	908
112	LE RIMBAUD A DESTROU	83-88	1	1138
113	HERAULT A MOULIN DE BERTRAND	77-81	1090	1531
114	LE RUISSEAU DU VAUBARNIER	83-88	2	1083
115	LE MARAVAL A COGOLINS	83-88	6	1098
116	L'OGNON A VILLENEUVE LES SORINIERES	84-87	147	745
117	LA BOULOGNE A LA VACHERIE	84-87	193	800
118	LA LOGNE A LA ROUSIERE	84-87	130	800
119	LA CLOUERE AU POUX (L230301)	77-82	19	759
120	LA GAUBRETIERE AU MUREAU (M510431)	74-78	33	620
121	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)	78-82	7	763

Annexe 3.6 - RESULTATS DE CALAGE

121 bassins versants - versions 32

Tableau A. 3.6 - Résultats de Calages - GR3J
121 bassins versants - v. 32

PARAMETRES FIXES :		0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BV	SA	LNB	SB	LNC	SC	LND	SD	LN5	S5	NASH	BIL	CRU	TQX	TON	SN	SX	RN	RX	TX
BV 09				LE BONDON A MONTVALLON (Y422581)															
525	9	430	9	9	34	49	7	0	0	897	-19	79	135	97	0	90	0	86	0
BV 00				L'ORGEVAL AU THEIL															
551	18	364	21	-6	15	-18	5	0	0	831	4	97	90	79	14	93	34	89	0
BV 01				LE VACON A BARBAS															
586	13	296	20	85	5	-4	3	0	0	706	-5	80	105	64	25	95	40	98	0
BV 02				LA MEURTHE A DAMELEVIERES															
605	8	463	10	105	5	-2	3	0	0	923	2	98	100	73	29	94	34	80	0
BV 03				LA MORTAGNE A GERBEVILLER															
691	9	494	11	58	8	16	9	0	0	674	0	62	42	50	44	82	32	80	0
BV 04				LA VEZOUBE A LUNEVILLE															
587	6	377	11	123	3	0	6	0	0	881	1	88	100	129	22	94	35	88	0
BV 05				LA MEURTHE A FRAIZE															
578	28	663	20	20	90	-40	5	0	0	668	1	117	150	21	40	99	32	55	0
BV 06				LE RABODEAU A MOYENMOUTIER															
601	12	559	10	69	8	-17	2	0	0	902	3	102	105	174	35	98	33	67	0
BV 07				LA MEURTHE A RAON L'ETAPE															
577	19	544	16	81	19	-17	4	0	0	882	3	110	94	76	33	98	33	70	0
BV 08				LA SEINE A BAR-SUR-SEINE															
583	8	491	10	136	4	-13	2	0	0	936	0	89	107	69	16	94	30	71	0
BV 09				LE COET-DAN A NAIZIN															
558-99	522-99	-84-99	-18-99	0-99	768	-1	73	67	60	19	95	28	62	0					
BV 10				L'ORGEVAL A MELARCHEZ															
502	13	278	14	-10	4	-21	3	0	0	805	-7	91	109	77	6	98	34	99	0
BV 11				RU DU FOUR A RONCHERES															
546	24	282	62	91	9	23	21	0	0	877	-5	70	95	78	9	92	19	95	0
BV 11				RU DU FOUR A RONCHERES															
547	25	305	37	73	9	-6	6	0	0	639	-11	64	83	74	14	91	32	90	0
BV 12				RU DU FOUR A PERRIAUX															
556	24	276	22	14	23	11	20	0	0	793	-12	84	93	56	14	93	23	97	0
BV 13				REAL COLLOBRIER A PONT DE FER															
559	4	421	10	-45	3	45	0	0	0	931	7	91	138	120	0	96	5	96	0
BV 14				CANNER															
535	14	347	14	-36	4	-14	3	0	0	517	10	58	85	116	13	98	31	96	0
BV 15				ELVON A LEMUD															
465	13	341	16	-39	5	-3	4	0	0	679	10	75	116	162	1	99	28	94	0
BV 16				CHERISEY															
525	52	400	40	-25	34	-32	13	0	0	758	9	85	94	74	19	97	31	82	0
BV 17				ELLE A PONT-TY-NADAN															
656	12	520	10	31	26	-8	2	0	0	876	7	90	104	80	41	90	31	77	0
BV 18				VALESCURE AUX BOURDINS															
561	10	455	12	-47	4	2	34	0	0	968	2	98	81	99	0	98	26	96	0
BV 19				MAURETS AUX BOURDINS															
580	12	468	12	-46	5	-3	6	0	0	928	1	93	84	102	1	96	27	92	0
BV 20				L'ETHELIN A CHATILLON-SUR-LOIRE															
567	16	312	18	4	13	-19	4	0	0	858	2	76	99	118	12	93	32	95	0
BV 21				LE POULAIN A POULAINES															
504	7	234	0	-6	9	38	8	0	0	720	4	65	139	133	2	94	0	100	0
BV 22				LE NE A ST.FORT-SUR-LE NE															
552	6	508	8	-9	15	0	9	0	0	919	-6	99	79	75	6	97	27	72	0
BV 23				LE LIEUTEL A VICQ															
692-99	400-99	-92-99	-8-99	0-99	396	12	50	42	157	37	62	35	72	0					
BV 24				LE LEZERT A LA BANCALIE															
636	13	447	13	10	16	-14	3	0	0	824	-6	96	86	43	32	92	34	89	0
BV 25				LA PETITE BARGUELONNE A MONTCUQ															
520	8	471	8	-5	12	-24	2	0	0	916	-5	91	107	88	10	98	29	87	0
BV 26				CHAPOUILLET A CHASSIGNOLLES															
589	17	476	20	-38	11	-27	4	0	0	587	5	68	67	52	32	94	35	75	0
BV 27				LA COURMERAN A BOISSONNEAU															
573	23	268	23	2	17	-7	5	0	0	580	-30	54	156	67	12	90	35	95	0
BV 28				L'OSSE A MIELAN-CASTEX															
534	14	338	25	-17	6	-12	5	0	0	682	-6	69	93	67	17	96	37	98	0
BV 29				LE LAGOIN A ARESSY															
651	17	391	13	30	18	-4	3	0	0	876	10	87	108	608	50	88	37	95	0

Annexe 3.6 - suite

BV 30	LA COUZE AU SOULIER	82-86	S=	64	Pa=1046
588 19 441 15	-14 12 -28 3 0 0 850	3 91 94 98 23 95 30 87 0			
BV 31	LA BRAME A LA PERRIERE	84-86	S=	235	Pa= 854
535 18 441 21	-17 21 -9 4 0 0 654	9 81 60 91 9 96 30 81 0			
BV 32	L'ARDOUR A FORGEFER	83-86	S=	131	Pa= 983
637 20 522 20	-26 24 -16 4 0 0 856	4 87 127 164 42 91 30 70 0			
BV 33	MICHELBAACH A MICHELBAACH	78-82	S=	3	Pa=1050
507 15 380 14	-31 4 -22 3 0 0 806	0 77 119 111 14 100 37 97 0			
BV 34	MORTAGNE A STE. HELENE	77-81	S=	100	Pa= 989
623 15 577 13	-15 29 -23 3 0 0 791	1 58 77 100 56 95 35 64 0			
BV 35	ANDON A CLERY-GRAND	79-81	S=	61	Pa= 700
441 35 498 22	-7 44 -24 6 0 0 731	10 84 115 250 8 100 33 74 0			
BV 36	BORSIN A SAVIGNY	79-81	S=	7	Pa= 790
500 28 364 26	0 20 -6 6 0 0 804	-1 79 100 95 19 99 35 94 0			
BV 37	VERNISSON A NOGENT-SUR-VERNISSON	80-84	S=	68	Pa= 653
598 5 388 8	55 3 31 3 0 0 909	1 92 81 104 16 84 23 81 0			
BV 38	PUISEAUX A ST. HILAIRE	81-85	S=	94	Pa= 653
608 16 445 20	52 10 -9 3 0 0 872	3 83 82 101 22 89 30 75 0			
BV 39	BIESME AU CLAON	81-83	S=	71	Pa= 923
591 23 421 18	5 23 -7 4 0 0 893	-4 96 90 59 33 96 36 92 0			
BV 40	COINON A MAINVILLIERS	80-84	S=	45	Pa= 578
578 5 186 12	-19 5 64 2 0 0 837	0 99 104 98 12 72 0 98 0			
BV 41	CHARENTONNE A FERRIERES ST.HILAIRE	78-82	S=	257	Pa= 726
639 9 456 11	-10 14 -3 2 0 0 587	13 49 851540 39 84 34 71 0			
BV 42	GRANCHAIN A GRANCHAIN	84-87	S=	12	Pa= 734
568 7 164 0	40 2 98 2 0 0 715	-19 83 174 89 13 69 0 99 0			
BV 43	SOULEUVRE A CARVILLE	83-87	S=	115	Pa=1020
529 11 419 12	54 4 -4 3 0 0 887	-1 106 88 64 12 99 32 87 0			
BV 44	JARLOT A L'HERMITAGE PLOUGONVEN	81-85	S=	44	Pa=1006
579 16 613 10	-50 9 -15 3 0 0 883	3 18 50 116 28 97 30 59 0			
BV 45	LANGELIN A BRIEC DE L'ODET	82-84	S=	6	Pa=1136
462 54 600 36	-54 40 -9 8 0 0 842	-1 65 78 73 2 100 29 62 0			
BV 46	COET ORGAN A KERDEC-EN-QUISTINIC	78-82	S=	48	Pa= 950
558 21 638 16	-39 25 -10 4 0 0 873	0 79 89 50 18 99 28 57 0			
BV 47	ARON A BERNADAIS GD FOUGERAY	84-88	S=	119	Pa= 809
543 8 351 12	54 2 37 4 0 0 929	4 90 87 99 11 98 5 93 0			
BV 48	AFF SUPERIEUR A PAIMPONT PONT DU SECRET	77-81	S=	30	Pa= 886
576 14 413 17	36 18 -9 3 0 0 915	-2 86 102 80 17 92 31 86 0			
BV 49	ARZON A CHOMELIX PONT/DL	81-84	S=	76	Pa= 800
623 32 529 22	4 47 -36 4 0 0 658	-4 74 68 4 27 89 34 74 0			
BV 50	TEYSSONNE A LA NOAILLERIE	81-85	S=	23	Pa= 834
597 23 504 21	54 8 -29 4 0 0 776	-4 106 60 33 33 96 33 79 0			
BV 51	DRAGNE A VANDENESSE	79-83	S=	115	Pa=1130
542 16 441 14	29 25 -18 3 0 0 912	-1 90 111 55 32 99 37 88 0			
BV 52	IXEURE A LA FERMETE	80-84	S=	115	Pa= 912
559 10 392 12	15 13 -8 2 0 0 889	-4 111 71 74 22 97 35 91 0			
BV 53	ANDOUX A MARINGUES	80-84	S=	60	Pa= 700
550 9 403 10	14 11 -4 2 0 0 851	-18 92 68 6 19 87 36 86 0			
BV 54	NERE A AUBIGNY-SUR-NERE	80-84	S=	79	Pa= 788
610 11 444 12	8 21 -13 2 0 0 835	6 99 96 240 25 90 33 80 0			
BV 55	OLIVET A BEAUMONT-VILLAGE	77-81	S=	76	Pa= 680
568 11 256 30	40 3 -4 3 0 0 818	-3 73 101 136 15 90 32 99 0			
BV 56	RHONE A NOGENT LE ROTROU	80-84	S=	79	Pa= 776
639 7 546 10	-71 21 -10 1 0 0 622	6 0 11 470 36 84 31 55 0			
BV 57	ESCOTAIS A ST. PATERNE RACAN	81-83	S=	76	Pa= 680
573 11 328 20	36 26 -5 3 0 0 904	8 80 145 274 16 85 35 95 0			
BV 58	DONNEAU A MESANGER	83-87	S=	9	Pa= 724
516 9 284 22	40 4 29 9 0 0 754	5 73 108 102 5 93 0 98 0			
BV 59	DIVATTE A LANDEMONT	83-87	S=	0	Pa= 734
541 17 349 19	7 11 -20 5 0 0 671	-2 78 114 86 15 98 34 97 0			
BV 60	FALLERON A FALLERON	80-84	S=	31	Pa= 913
517 16 289 27	-48 4 7 19 0 0 819	6 81 108 130 7 99 29 99 0			
BV 61	CHAMBCON A DONIA	83-87	S=	61	Pa= 905
552 9 385 10	-11 6 3 18 0 0 843	4 76 114 103 9 98 29 91 0			
BV 62	VOLP A STE. CROIX-VOLVESTRE	83-87	S=	91	Pa= 973
616 14 339 12	-2 9 -14 2 0 0 600	6 81 67 95 20 83 35 95 0			

Annexe 3.6 - suite

BV 63	BANDIAT A FEUILLADE										78-82	S=	333	Pa=	941				
670	10	529	11	-14	16	-12	2	0	0	798	8	83	146	82	46	86	34	70	0
BV 64	EYRAUD A BITAREL										78-80	S=	74	Pa=	801				
585	20	375	20	5	23	-15	5	0	0	918	4	101	86	89	23	86	36	84	0
BV 65	BAHUS A EUGENIE-LES-BAINS										82-86	S=	49	Pa=	935				
537	16	339	18	-1	11	16	20	0	0	911	-2	96	88	86	7	96	23	96	0
BV 66	MENDIALCU A HASPAREN										77-81	S=	18	Pa=	1990				
667	21	375	17	-25	5	-18	3	0	0	799	14	79	93	489	58	95	39	97	0
BV 67	AUME A LONGRE										75-77	S=	90	Pa=	871				
588	7	434	8	-7	9	0	10	0	0	914	8	93	108	104	10	97	29	84	0
BV 68	BREUCHIN A PROISELIERE										77-80	S=	123	Pa=	1871				
574	52	523	20	29	65	-21	7	0	0	824	-1	87	77	81	55	100	41	87	0
BV 69	OGNON A FOURGUENONS										81-84	S=	74	Pa=	1892				
535	60	521	18	-14	16	-36	6	0	0	831	2	77	108	86	37	100	38	90	0
BV 70	RAHIN A PLANCHER-BAS										81-83	S=	33	Pa=	2188				
610	53	536	22	-27	15	-45	7	0	0	886	-3	92	88	60	58	100	39	90	0
BV 71	ROSEMONT A ROSEMONT										77-80	S=	7	Pa=	2012				
584	42	544	20	-4	24	-18	6	0	0	845	0	108	71	39	54	100	39	90	0
BV 72	RUPT A DUNG										77-81	S=	42	Pa=	1090				
467	26	438	22	8	24	-10	6	0	0	725	2	106	75	81	4	100	35	90	0
BV 73	FURIEUSE A SALINS-LES-BAINS										82-86	S=	43	Pa=	1353				
537	34	447	18	-22	7	-22	4	0	0	763	7	107	74	90	30	100	38	97	0
BV 74	BRENNE A SELLIERES										77-81	S=	37	Pa=	1261				
522	27	309	28	-14	10	-4	7	0	0	798	3	87	83	97	21	99	41	98	0
BV 75	VEYLE A LENT										80-84	S=	34	Pa=	958				
602	16	440	14	-1	8	-7	3	0	0	888	-3	89	89	89	30	96	35	90	0
BV 76	REDON A MARGENCEL										77-81	S=	31	Pa=	1200				
639	16	486	16	-26	13	19	17	0	0	714	2	95	82	27	50	90	34	79	0
BV 77	IRE A DOUSSARD										81-85	S=	27	Pa=	1200				
644	71	513	22	-54	10	-39	7	0	0	461	11	74	52	55	75	99	37	88	0
BV 78	GLUEYRE A TISONECHE										85-87	S=	71	Pa=	1250				
0547	555	15	-19	12	0	120	0	0	0	786	1	99	83	35	0	100	34	83	0
BV 79	JABRON A SOUSPIERRE										78-82	S=	85	Pa=	930				
693	20	480	20	-6	15	-24	4	0	0	737	14	88	81	237	28	76	31	77	0
BV 80	MONDONY A AMELIE-LES-BAINS										82-86	S=	32	Pa=	800				
693	43	424	50	-32	28	-51	7	0	0	636	-12	78	83	42	42	82	35	96	0
BV 81	BATAILLER A LA VERRERIE										81-83	S=	9	Pa=	950				
726	13	159	20	-25	7	-31	3	0	0	541	3	69	100	83	14	39	30	97	0
BV 82	MOLE AU DESTEL										83-87	S=	44	Pa=	950				
448	22	460	20	-33	10	-33	5	0	0	437	-4	47	89	66	0	99	27	87	0
BV 83	VERNE AUX CABRIS										77-79	S=	38	Pa=	950				
0-99	563-99	-96-99	137-99	0-99	795	-11	108	103	101	0	100	4	83	0					
BV 84	GARDE A GRIMAUD										83-87	S=	18	Pa=	950				
680	20	462	14	-17	11	-40	4	0	0	713	-3	79	105	83	26	87	30	90	0
BV 85	PETROSO A PONT-DE-BALA										79-83	S=	53	Pa=	801				
548	24	416	31	-28	18	-12	8	0	0	616	5	58	130	108	1	93	28	91	0
BV 86	HELPE MINEUR A ETROEUNGT										81-84	S=	175	Pa=	918				
575	20	390	26	44	7	-9	4	0	0	582	12	95	60	106	30	94	37	90	0
BV 87	HELPE MINEUR A MARCILLES										81-85	S=	275	Pa=	889				
554	21	380	23	59	8	-16	4	0	0	655	10	95	57	86	28	97	37	93	0
BV 88	HELPE MAJEUR A LIESSIES										81-85	S=	187	Pa=	800				
572	17	452	20	62	10	-24	4	0	0	720	-4	101	58	44	31	96	34	78	0
BV 89	HELPE MAJEUR A TAISNIERES										81-85	S=	320	Pa=	800				
563	14	477	17	66	10	-26	3	0	0	793	-3	103	71	52	29	97	33	75	0
BV 90	SAMBRE A MAUBEUGE										84-87	S=	1075	Pa=	835				
582	23	465	21	55	7	-22	4	0	0	681	4	112	54	63	38	91	34	76	0
BV 91	QUEFFLEUTH A LESQUIPOU-PLOURIN L.M										81-85	S=	88	Pa=	1006				
633	9	574	9	-41	14	17	9	0	0	797	2	61	95	78	42	95	31	64	0
BV 92	LA COUSANCES A AUBREVILLE										81-83	S=	166	Pa=	997				
484	25	497	20	-8	32	-11	5	0	0	896	-1	105	83	86	11	100	33	79	0
BV 93	CHAUSSEY A MANEVILLE-LA PIPARD										83-87	S=	52	Pa=	785				
336-99	828-99	-80-99	26-99	0-99	275	0	0	50	100	0	100	22	28	0					
BV 94	SEUGNE A PONS										79-83	S=	882	Pa=	920				
599	6	477	10	79	15	1	10	0	0	955	0	86	89	103	21	92	31	80	0
BV 95	SAULDRE A SALBRIS										82-86	S=	1200	Pa=	772				
602	12	431	12	105	5	-14	2	0	0	903	6	98	97	144	24	90	31	82	0

Annexe 3.6 - suite

BV 96	CELE AUX AMIS DU CELE	79-83	S= 1190	Pa=1022
573 17 448 12	61 5 -24 3 0 0 908	0 94 102 84 34 98 37 88	0	
BV 97	ARGENS AUX ARCS	83-87	S= 1730	Pa= 854
602 9 495 10	40 6 -8 2 0 0 730	14 76 91 797 6 81 27 66	0	
BV 98	CHARENTE A SURIS	80-83	S= 110	Pa= 895
560 11 407 11	0 5 -25 2 0 0 905	4 88 100 98 22 98 35 94	0	
BV 99	CHARENTE A ST. SAVIOL	75-79	S= 492	Pa= 855
602 9 385 8	63 2 -16 2 0 0 904	11 88 93 179 20 96 32 90	0	
BV a0	CHARENTE A CHENON	79-83	S= 1071	Pa= 872
628 12 494 10	73 10 -17 2 0 0 938	7 97 94 96 35 91 33 80	0	
BV a1	BONNIEURE A VILLEBETTE	76-80	S= 203	Pa= 912
611 10 451 8	73 6 -5 2 0 0 920	-1 98 87 70 28 93 31 77	0	
BV a2	TARDOIRE A MONTBRON	78-82	S= 389	Pa= 951
625 11 486 11	40 4 -18 2 0 0 868	11 85 1331152 36 92 35 83	0	
BV a3	TARDOIRE A COULGENS	78-82	S= 1200	Pa= 926
665 6 424 12	79 17 64 2 0 0 905	-1 84 119 83 33 73 15 75	0	
BV a4	CHARENTE A LUXE	77-79	S= 3000	Pa= 897
613 16 457 17	102 8 0 15 0 0 953	2 89 114 102 28 86 31 71	0	
BV a5	AUME AUX MARAIS 2	79-83	S= 452	Pa= 818
558 9 520 10	96 3 4 13 0 0 958	-7 99 100 69 9 96 27 79	0	
BV a6	CHARENTE A CHALONNES	78-82	S= 3750	Pa= 878
612 15 482 12	133 4 -7 3 0 0 959	2 98 92 79 26 90 31 81	0	
BV a7	TREZENCE A TOURNAY	76-79	S= 75	Pa= 856
535 15 496 19	-6 21 -3 6 0 0 874	0 84 93 86 6 100 27 77	0	
BV a8	BOUTONNE AU VERT	80-83	S= 523	Pa= 908
558 12 553 9	67 11 -22 3 0 0 949	0 99 94 86 18 98 31 76	0	
BV a9	LE RIMBAUD A DESTROU	83-88	S= 1	Pa=1138
487 15 484 13	-49 3 -25 3 0 0 841	-8 95 91 79 0 100 28 96	0	
BV b0	HERAULT A MOULIN DE BERTRAND	77-81	S= 1090	Pa=1531
633 30 496 20	11 24 -31 6 0 0 886	0 103 92 116 25 97 30 94	0	
BV b1	LE RUISSEAU DU VAUBARNIER	83-88	S= 2	Pa=1083
660 12 490 8	-48 2 -35 3 0 0 857	7 81 96 99 18 90 29 89	0	
BV b2	LE MARAVAL A COGOLINS	83-88	S= 6	Pa=1098
636 4 344 12	-40 3 7 6 0 0 650	-3 63 80 71 6 71 25 89	0	
BV b3	L'OGNON A VILLENEUVE LES SORINIERES	84-87	S= 147	Pa= 745
575 34 346 41	40 7 -12 9 0 0 740	-1 70 94 79 14 93 33 94	0	
BV b4	LA BOULOGNE A LA VACHERIE	84-87	S= 193	Pa= 800
540 30 326 25	4 17 -1 20 0 0 704	2 74 87 81 7 95 31 95	0	
BV b5	LA LOGNE A LA ROUSSEIRE	84-87	S= 130	Pa= 800
542 33 325 24	15 20 -6 10 0 0 750	-3 78 100 73 8 96 32 96	0	
BV b6	LA CLOUERE AU POUX (L230301)	77-82	S= 19	Pa= 759
529 21 289 38	13 13 31 20 0 0 846	0 68 88 95 11 98 8 99	0	
BV b7	LA GAUBRETIERE AU MUREAU (M510431)	74-78	S= 33	Pa= 620
544 10 345 11	-20 4 -18 3 0 0 739	-13 82 111 65 4 97 28 94	0	
BV b8	LE VERMEIL A LEZAT (O184741)	78-82	S= 7	Pa= 763
566 54 410 51	-28 51 -8 15 0 0 734	0 63 109 72 15 82 32 77	0	

Traitement par GR4 de	121 BV	
CARACTERISTIQUE	MOYENNE	ECART-TYPE
critere de NASH :	79.25	12.99
bilan global :	0.4273	7.466
rapport des crues :	83.27	19.07
ratio durees crues :	0.9309	0.2403
ratio durees etia.:	1.282	1.893
ln(A) :	5.662	0.9353
ln(B) :	4.317	1.024
ln(C) :	0.9940E-01	0.4847
ln(D) :	-0.6471E-01	0.2612
ln(X5) :	0.	0.
Sa :	0.1944	0.5403
Sb :	0.1417	0.2294
Sc :	0.1094	0.2400
Sd :	0.3944E-01	0.2226
S5 :	-0.3273E-01	0.1770
remplissage min S :	0.2156	0.1525
remplissage max S :	0.9263	0.8608E-01
remplissage min R :	0.2981	0.8824E-01
remplissage max R :	0.8451	0.1216
taux Ec.Ps-Di max :	0.	0.
moy.mens. de S/A :	81 84 82 75 66 54 42 35 36 49 60 72	
Nb de BV avec 3,4,5,6 par.:	0 121 0 0	

Annexe 3.7 - RESULTATS DE CALAGE - GR4J

121 bassins versants - critères

Tableau A. 3.7 - Résultats de Calages - GR4J
critères de calage pour 121 bassins versants

CODE	NASH	BILN	CRUE	DRC	DRET	Smin	Smax	Rmin	Rmax	TX
1	92.20	10.00	104.00	0.94	1.17	0.00	0.92	0.01	0.82	1.00
2	84.40	-2.00	95.00	0.93	0.64	0.10	0.91	0.36	0.89	0.63
3	70.50	4.00	79.00	1.03	0.93	0.27	0.94	0.32	0.97	0.33
4	92.40	0.00	97.00	1.05	0.75	0.34	0.93	0.32	0.75	0.44
5	64.50	-4.00	83.00	0.45	0.52	0.49	0.83	0.28	0.70	0.61
6	87.80	3.00	87.00	1.06	1.51	0.28	0.93	0.30	0.84	0.35
7	70.90	0.00	137.00	2.00	0.21	0.31	0.96	0.37	0.66	0.48
8	90.30	0.00	104.00	1.10	0.94	0.30	0.97	0.33	0.67	0.47
9	89.20	0.00	112.00	0.94	0.53	0.27	0.98	0.33	0.69	0.46
10	92.20	0.00	105.00	1.14	0.63	0.14	0.92	0.30	0.71	0.43
11	79.40	-4.00	75.00	0.62	0.52	0.13	0.94	0.29	0.60	0.65
12	79.50	0.00	88.00	0.99	0.88	0.02	0.98	0.34	0.99	0.66
13	89.10	0.00	75.00	0.98	0.93	0.13	0.94	0.08	0.95	0.15
14	64.70	0.00	65.00	0.80	0.79	0.13	0.92	0.22	0.89	0.68
15	80.70	-5.00	89.00	0.89	0.71	0.17	0.93	0.08	0.95	0.99
16	93.70	15.00	98.00	1.26	1.40	0.01	0.97	0.03	0.95	1.00
17	52.10	4.00	58.00	0.90	0.95	0.10	0.98	0.32	0.94	0.68
18	66.80	17.00	78.00	1.17	1.88	0.01	1.00	0.12	0.92	0.98
19	78.70	-2.00	84.00	0.94	0.60	0.07	0.96	0.35	0.85	0.69
20	89.90	0.00	92.00	1.20	0.35	0.40	0.88	0.31	0.74	0.49
21	95.50	3.00	103.00	0.83	1.03	0.01	0.98	0.14	0.92	0.95
22	93.10	-1.00	92.00	0.86	1.05	0.01	0.97	0.21	0.88	0.86
23	85.10	0.00	74.00	0.93	1.01	0.07	0.92	0.35	0.96	0.68
24	73.40	5.00	68.00	1.45	1.43	0.04	0.95	0.01	0.99	1.00
25	90.90	-1.00	105.00	0.85	0.85	0.10	0.96	0.22	0.70	0.77
26	57.20	0.00	104.00	0.58	0.71	0.31	0.47	0.47	0.86	0.47
27	80.60	0.00	96.00	0.82	0.52	0.26	0.91	0.34	0.88	0.50
28	88.70	0.00	93.00	0.95	0.96	0.05	0.98	0.29	0.87	0.73
29	63.30	-3.00	70.00	0.63	0.16	0.21	0.92	0.38	0.77	0.59
30	59.80	0.00	55.00	1.24	1.18	0.10	0.91	0.15	0.96	0.90
31	68.20	2.00	68.00	0.89	0.86	0.14	0.96	0.31	0.97	0.56
32	86.80	9.00	86.00	1.13	6.34	0.51	0.87	0.34	0.93	0.62
33	84.20	0.00	88.00	0.80	0.76	0.10	0.94	0.34	0.89	0.67
34	67.70	-3.00	79.00	0.63	0.76	0.09	0.95	0.30	0.76	0.65
35	89.70	0.00	93.00	1.18	1.07	0.35	0.90	0.32	0.67	0.56
36	80.60	1.00	74.00	1.19	1.02	0.06	1.00	0.37	0.98	0.59
37	81.30	0.00	56.00	0.54	1.00	0.46	0.93	0.36	0.65	0.52
38	77.90	4.00	82.00	1.08	2.06	0.03	1.00	0.34	0.72	0.65
39	81.30	6.00	78.00	0.97	1.13	0.18	0.99	0.25	0.91	0.67
40	89.70	4.00	96.00	0.94	1.35	0.23	0.87	0.17	0.75	0.77
41	88.20	1.00	86.00	0.89	0.88	0.20	0.87	0.30	0.72	0.56
42	89.80	-2.00	96.00	1.00	0.62	0.33	0.96	0.34	0.89	0.51
43	82.60	6.00	96.00	1.06	1.00	0.16	0.87	0.00	0.92	0.00
44	62.00	2.00	44.00	0.46	4.40	0.42	0.83	0.32	0.58	0.58

Annexe 3.7 - suite

45	69.80	-18.00	81.00	1.61	0.86	0.23	0.87	0.00	0.93	0.00
46	88.00	0.00	107.00	0.98	0.71	0.14	0.98	0.29	0.84	0.60
47	92.50	1.00	51.00	0.63	1.09	0.20	0.97	0.29	0.56	0.60
48	86.40	-2.00	69.00	0.93	0.75	0.02	1.00	0.28	0.59	0.70
49	89.90	0.00	85.00	0.95	0.58	0.13	0.99	0.27	0.54	0.78
50	91.50	7.00	93.00	0.88	1.05	0.19	0.98	0.11	0.90	0.97
51	91.90	2.00	85.00	1.00	0.91	0.15	0.92	0.27	0.83	0.69
52	60.10	-2.00	62.00	0.50	0.07	0.10	0.85	0.36	0.81	0.55
53	74.30	-4.00	102.00	0.36	0.23	0.19	0.94	0.36	0.82	0.54
54	90.80	-1.00	85.00	1.16	0.50	0.24	0.98	0.37	0.87	0.57
55	89.30	0.00	114.00	0.74	0.83	0.21	0.96	0.32	0.89	0.57
56	86.50	-6.00	95.00	0.68	0.35	0.20	0.87	0.32	0.84	0.51
57	86.20	0.00	98.00	0.96	1.30	0.22	0.88	0.34	0.77	0.64
58	82.50	10.00	75.00	0.99	1.79	0.15	0.90	0.11	0.99	0.83
59	74.30	2.00	15.00	0.22	1.00	0.32	0.83	0.30	0.49	0.63
60	90.10	14.00	80.00	1.40	3.38	0.16	0.84	0.30	0.94	0.66
61	76.80	4.00	75.00	1.15	1.04	0.09	0.94	0.07	0.97	0.99
62	67.10	-2.00	76.00	1.11	0.81	0.09	0.97	0.36	0.97	0.65
63	82.40	9.00	88.00	1.06	1.38	0.10	0.99	0.12	0.99	0.94
64	83.30	8.00	79.00	1.08	1.15	0.12	0.97	0.18	0.88	0.93
65	60.70	-1.00	78.00	0.70	0.61	0.16	0.80	0.38	0.95	0.55
66	83.90	0.00	86.00	1.31	0.10	0.44	0.84	0.34	0.67	0.48
67	92.30	-2.00	98.00	0.86	0.55	0.18	0.84	0.38	0.83	0.52
68	92.20	0.00	99.00	0.92	0.96	0.11	0.96	0.12	0.94	0.98
69	81.60	1.00	76.00	0.93	1.61	0.49	0.94	0.49	0.97	0.48
70	90.20	6.00	90.00	1.10	1.05	0.15	0.95	0.25	0.80	0.59
71	81.70	0.00	84.00	0.77	0.44	0.47	0.99	0.42	0.87	0.41
72	82.60	-1.00	71.00	1.03	0.48	0.17	1.00	0.41	0.93	0.56
73	84.30	-2.00	84.00	0.79	0.31	0.18	1.00	0.42	0.94	0.57
74	84.70	-3.00	108.00	0.71	0.24	0.37	1.00	0.39	0.88	0.51
75	73.10	0.00	105.00	0.82	0.82	0.03	1.00	0.34	0.87	0.55
76	77.80	-1.00	103.00	0.76	0.51	0.22	1.00	0.43	0.97	0.51
77	79.60	3.00	89.00	0.84	1.03	0.25	0.98	0.35	0.97	0.55
78	90.40	2.00	89.00	0.93	1.17	0.29	0.95	0.31	0.86	0.57
79	71.60	0.00	95.00	0.79	0.30	0.56	0.90	0.30	0.69	0.54
80	51.60	-1.00	75.00	0.52	0.03	0.59	0.99	0.54	0.96	0.50
81	83.10	-4.00	113.00	0.83	0.43	0.05	0.98	0.33	0.85	0.71
82	80.60	-2.00	90.00	0.73	0.23	0.19	0.73	0.35	0.79	0.61
83	60.00	-3.00	86.00	0.54	0.49	0.01	0.93	0.36	0.99	0.70
84	48.50	-5.00	54.00	0.86	0.28	0.06	0.40	0.45	0.99	0.52
85	44.10	-3.00	45.00	0.80	0.62	0.00	0.99	0.27	0.88	0.86
86	68.40	0.00	63.00	0.53	0.03	0.30	0.66	0.49	0.98	0.49
87	63.70	-5.00	70.00	0.88	0.52	0.07	0.84	0.36	0.94	0.65
88	61.60	13.00	58.00	1.19	1.17	0.01	0.94	0.22	0.89	0.87
89	59.70	0.00	93.00	0.62	0.44	0.30	0.92	0.38	0.86	0.52
90	68.10	-1.00	94.00	0.65	0.42	0.22	0.96	0.40	0.92	0.50
91	68.40	-2.00	102.00	0.52	0.44	0.19	0.96	0.36	0.79	0.58
92	77.20	-1.00	102.00	0.63	0.55	0.17	0.97	0.36	0.78	0.57
93	69.40	0.00	112.00	0.46	0.40	0.28	0.89	0.37	0.78	0.53
94	81.60	1.00	66.00	0.85	0.87	0.51	0.94	0.29	0.59	0.63
95	89.10	0.00	105.00	0.83	0.90	0.06	1.00	0.31	0.75	0.61
96	69.30	-2.00	0.00	0.50	1.00	0.10	0.99	0.21	0.24	0.68

Annexe 3.7 - suite

97	95.20	3.00	87.00	0.91	1.21	0.28	0.90	0.28	0.77	0.66
98	91.80	0.00	98.00	0.97	0.71	0.21	0.87	0.33	0.82	0.53
99	90.00	0.00	94.00	0.94	0.87	0.18	0.98	0.38	0.89	0.51
100	77.00	0.00	74.00	1.00	0.17	0.19	0.67	0.34	0.69	0.60
101	90.50	0.00	84.00	0.98	0.72	0.11	0.98	0.37	0.96	0.59
102	90.60	2.00	86.00	0.88	1.16	0.16	0.94	0.36	0.90	0.53
103	95.20	0.00	97.00	0.97	0.49	0.27	0.89	0.34	0.80	0.54
104	92.10	0.00	98.00	0.85	0.75	0.29	0.91	0.29	0.73	0.56
105	89.70	2.00	82.00	1.33	4.55	0.29	0.91	0.37	0.83	0.49
106	90.60	-1.00	83.00	1.21	0.88	0.43	0.80	0.15	0.69	0.67
107	95.40	2.00	87.00	1.14	1.03	0.33	0.85	0.27	0.66	0.52
108	94.90	-4.00	103.00	1.02	0.74	0.14	0.95	0.24	0.76	0.63
109	95.80	-1.00	98.00	0.85	0.63	0.28	0.88	0.31	0.78	0.51
110	88.90	0.00	88.00	0.95	0.95	0.05	1.00	0.21	0.71	0.80
111	93.80	0.00	98.00	0.83	0.75	0.10	0.98	0.31	0.75	0.58
112	84.00	0.00	83.00	0.88	0.85	0.00	1.00	0.23	0.93	0.87
113	87.50	2.00	99.00	0.84	1.06	0.05	0.97	0.30	0.95	0.69
114	83.80	-2.00	81.00	0.82	0.64	0.04	0.90	0.33	0.91	0.73
115	65.20	1.00	63.00	0.87	0.79	0.08	0.72	0.16	0.83	0.95
116	74.80	-1.00	68.00	1.00	0.82	0.11	0.93	0.33	0.95	0.58
117	70.60	2.00	74.00	0.95	0.89	0.08	0.95	0.24	0.93	0.81
118	75.40	0.00	78.00	1.00	0.90	0.07	0.95	0.25	0.94	0.80
119	84.80	4.00	69.00	0.91	1.02	0.18	0.97	0.09	0.99	0.94
120	74.50	-7.00	83.00	1.02	0.68	0.02	0.97	0.28	0.93	0.75
121	76.30	1.00	64.00	1.06	0.78	0.11	0.83	0.29	0.70	0.72

S_{min} : valeur minimum de S/A - S_{max} : valeur maximum de S/A

R_{min} : valeur minimum de R/B - R_{max} : valeur maximum de R/B

TX : taux d'écoulement pseudo-direct

Annexe 3.8 - RESULTATS DE CALAGE - GR4J

121 bassins versants - paramètres

Tableau A. 3.8 - Résultats de Calages - GR4J
analyse de sensibilité des paramètres A, B, C et D pour les 121 bassins versants

CODE.	ln(A)	E-T A	ln(B)	E-T B	ln(C+.5)	E-T C	ln(D)	E-T D
1	5.22	0.07	4.49	0.11	0.14	0.06	1.15	0.11
2	5.40	0.14	3.48	0.26	-0.01	0.18	-0.15	0.07
3	5.95	0.10	2.94	0.19	0.81	0.05	0.18	0.09
4	6.22	0.06	4.86	0.08	1.04	0.04	0.16	0.07
5	7.03	0.08	5.51	0.12	0.59	0.08	0.42	0.12
6	6.07	0.05	3.99	0.07	1.18	0.03	0.22	0.05
7	5.72	0.16	5.55	0.22	0.77	0.17	-0.63	0.10
8	5.95	0.08	5.45	0.08	0.80	0.07	-0.17	0.06
9	5.66	0.14	5.37	0.15	0.87	0.13	-0.14	0.09
10	5.78	0.06	4.77	0.10	1.42	0.04	-0.07	0.04
11	5.40	0.25	5.18	0.37	-0.66	0.23	-0.12	0.13
12	4.64	0.10	2.52	0.14	-0.10	0.04	-0.04	0.08
13	5.56	0.24	2.96	0.55	0.91	0.09	0.46	0.24
14	5.43	0.17	3.09	0.36	0.69	0.09	0.12	0.12
15	5.62	0.23	2.96	0.24	0.04	0.19	0.34	0.17
16	5.73	0.04	4.39	0.10	-0.50	0.02	0.99	0.13
17	5.26	0.09	3.50	0.14	-0.39	0.05	-0.09	0.05
18	4.61	0.11	3.68	0.17	-0.45	0.05	0.25	0.10
19	4.93	0.30	3.56	0.54	-0.17	0.40	-0.30	0.16
20	6.63	0.07	5.34	0.09	0.36	0.09	-0.06	0.06
21	5.65	0.08	4.92	0.13	-0.56	0.04	0.63	0.27
22	5.75	0.08	5.04	0.15	-0.54	0.05	0.32	0.26
23	5.49	0.10	2.89	0.19	0.06	0.15	-0.10	0.07
24	5.19	0.00	2.58	0.00	-0.13	0.06	0.53	0.06
25	5.73	0.05	5.09	0.08	0.51	0.03	0.29	0.08
26	7.53	0.12	2.56	0.23	-0.32	0.15	-0.17	0.05
27	6.23	0.11	4.40	0.11	0.20	0.14	-0.03	0.13
28	4.87	0.07	4.56	0.09	0.03	0.12	-0.10	0.06
29	5.66	0.13	4.38	0.20	-0.27	0.12	-0.37	0.11
30	5.64	0.19	2.54	0.26	0.00	0.17	0.19	0.13
31	5.22	0.11	3.35	0.19	-0.21	0.06	0.07	0.19
32	6.59	0.13	4.07	0.08	0.15	0.11	0.13	0.14
33	5.53	0.13	4.01	0.17	-0.03	0.14	-0.31	0.10
34	5.35	0.15	4.68	0.21	-0.09	0.21	-0.09	0.09
35	6.24	0.15	5.18	0.17	0.00	0.22	-0.16	0.08
36	4.77	0.11	3.60	0.14	-0.31	0.04	-0.18	0.12
37	6.06	0.11	5.50	0.11	0.00	0.18	-0.27	0.06
38	4.08	0.30	4.92	0.21	-0.02	0.38	-0.29	0.13
39	4.94	0.25	3.80	0.22	-0.08	0.17	0.25	0.20
40	6.10	0.05	4.31	0.07	0.51	0.03	0.59	0.05
41	6.08	0.11	4.54	0.16	0.53	0.08	-0.02	0.07
42	5.96	0.17	4.33	0.14	0.07	0.26	0.11	0.18
43	5.64	0.00	2.84	0.00	-0.34	0.00	1.20	0.00
44	6.56	0.09	5.38	0.11	0.34	0.10	-0.01	0.06

Annexe 3.8 - suite

45	5.66	0.00	2.66	0.00	0.40	0.00	1.71	0.00
46	5.42	0.09	4.37	0.11	0.51	0.03	0.18	0.09
47	5.58	0.13	6.19	0.11	-0.21	0.09	-0.08	0.06
48	4.51	0.62	6.11	0.31	-0.35	0.37	0.15	0.48
49	5.41	0.19	6.57	0.16	-0.10	0.17	0.11	0.21
50	5.66	0.08	3.76	0.10	0.51	0.02	0.56	0.08
51	5.70	0.10	4.20	0.15	0.16	0.18	0.09	0.11
52	5.72	0.26	4.51	0.36	0.43	0.15	-0.45	0.14
53	5.70	0.18	4.60	0.20	0.65	0.10	-0.34	0.11
54	5.28	0.12	4.24	0.08	0.18	0.15	-0.14	0.10
55	5.59	0.08	3.97	0.10	0.26	0.14	0.11	0.09
56	5.50	0.08	4.10	0.12	0.44	0.03	0.18	0.06
57	6.06	0.07	4.46	0.11	0.09	0.12	-0.11	0.05
58	5.68	0.08	2.49	0.34	0.37	0.10	0.18	0.08
59	6.33	0.06	5.75	0.07	-0.09	0.11	-0.04	0.02
60	5.75	0.06	3.34	0.11	0.17	0.19	0.09	0.06
61	5.33	0.08	3.00	0.14	0.27	0.14	0.39	0.09
62	5.20	0.10	3.23	0.19	0.10	0.12	-0.12	0.10
63	5.31	0.15	3.11	0.26	-0.53	0.05	0.32	0.17
64	5.62	0.09	4.08	0.10	-0.17	0.06	0.37	0.13
65	6.08	0.09	3.27	0.12	0.00	0.10	-0.14	0.07
66	6.72	0.07	5.38	0.09	0.36	0.10	-0.14	0.06
67	5.78	0.11	3.62	0.20	0.18	0.20	-0.14	0.08
68	5.48	0.15	3.67	0.18	-0.10	0.10	0.44	0.19
69	6.48	0.16	3.58	0.16	-0.25	0.05	-0.45	0.19
70	6.13	0.07	4.56	0.10	-0.06	0.10	0.15	0.11
71	5.58	0.41	5.07	0.12	0.31	0.35	-0.21	0.28
72	4.85	0.41	4.76	0.18	0.03	0.20	-0.78	0.27
73	5.05	0.48	4.73	0.26	-0.05	0.20	-1.03	0.31
74	5.36	0.31	5.44	0.15	0.04	0.17	-0.29	0.33
75	4.53	0.25	4.59	0.18	0.06	0.24	0.00	0.25
76	5.19	0.25	4.31	0.18	-0.20	0.07	-0.47	0.22
77	5.35	0.23	3.28	0.22	-0.20	0.09	0.18	0.19
78	6.00	0.14	4.56	0.10	-0.05	0.08	0.22	0.16
79	6.53	0.16	5.41	0.16	-0.20	0.15	0.65	0.17
80	5.88	0.45	4.12	0.23	-0.33	0.10	-0.97	0.25
81	5.38	0.13	5.32	0.14	-0.22	0.07	-0.72	0.12
82	6.67	0.12	4.41	0.22	0.06	0.20	-0.36	0.11
83	5.15	0.25	3.51	0.48	-0.31	0.22	-0.44	0.39
84	6.63	0.09	0.50	0.26	-0.23	0.07	-0.10	0.05
85	3.84	0.22	4.25	0.22	-0.32	0.10	-0.27	0.13
86	7.44	0.09	3.16	0.39	-0.48	0.08	-0.50	0.21
87	6.22	0.14	3.89	0.23	0.02	0.20	-0.54	0.19
88	5.35	0.21	4.21	0.28	-0.32	0.19	0.15	0.37
89	5.82	0.16	4.05	0.19	0.27	0.26	-0.09	0.09
90	5.45	0.16	3.63	0.22	0.59	0.07	-0.21	0.11
91	5.44	0.12	4.27	0.19	0.71	0.11	-0.18	0.09
92	5.38	0.09	4.30	0.15	1.03	0.05	-0.22	0.07
93	5.68	0.17	4.31	0.20	0.60	0.08	-0.24	0.10
94	6.59	0.07	6.05	0.09	-0.25	0.14	0.67	0.11
95	4.62	0.26	5.11	0.18	0.10	0.33	0.07	0.22
96	5.01	0.27	8.80	0.24	0.07	0.13	0.24	0.19

Annexe 3.8 - suite

97	6.23	0.05	4.93	0.08	0.80	0.08	0.28	0.08
98	6.01	0.08	4.16	0.12	1.07	0.05	-0.14	0.04
99	5.34	0.10	4.25	0.11	0.64	0.06	-0.23	0.10
100	6.77	0.10	4.46	0.11	0.49	0.06	-0.29	0.06
101	5.31	0.07	3.75	0.12	0.02	0.05	-0.29	0.07
102	5.95	0.05	3.68	0.07	0.63	0.03	-0.19	0.05
103	6.13	0.07	4.80	0.09	0.76	0.08	-0.19	0.06
104	6.19	0.06	4.67	0.07	0.75	0.05	0.09	0.07
105	6.13	0.06	4.71	0.08	0.33	0.11	-0.28	0.06
106	6.75	0.07	4.84	0.08	0.69	0.12	1.19	0.07
107	6.31	0.13	4.85	0.16	1.01	0.08	0.25	0.14
108	5.81	0.08	5.36	0.09	0.95	0.03	0.32	0.12
109	6.22	0.07	4.90	0.11	1.32	0.04	-0.02	0.07
110	5.21	0.15	5.33	0.18	-0.02	0.16	0.38	0.19
111	5.35	0.09	5.38	0.08	0.75	0.09	-0.19	0.06
112	3.06	0.30	4.97	0.09	-0.58	0.02	0.31	0.31
113	5.58	0.13	4.73	0.15	0.22	0.20	-0.30	0.22
114	6.07	0.04	4.47	0.08	-0.43	0.02	-0.58	0.09
115	6.42	0.06	3.80	0.12	-0.44	0.03	0.23	0.07
116	5.67	0.16	3.35	0.38	0.40	0.06	-0.02	0.13
117	5.50	0.20	3.48	0.27	0.00	0.17	0.12	0.18
118	5.40	0.20	3.36	0.25	0.08	0.18	0.09	0.18
119	5.50	0.24	3.02	0.40	0.04	0.11	0.49	0.25
120	5.21	0.07	3.39	0.12	-0.19	0.04	-0.03	0.06
121	5.53	0.37	4.41	0.56	-0.21	0.49	0.07	0.30

Annexe du Chapitre 4

Annexe 4.1 - L'Influence de l'Exactitude de l'Evaporation

Au cours des études précédentes, nous avons utilisé le modèle GR4J, dans sa version courante (EDJATNO, NASCIMENTO, YANG et MAKHLOUF, 1994). Comme nous l'avons déjà souligné, dans ce modèle le traitement de l'évapotranspiration potentielle se fait à partir d'une désagrégation des valeurs décennales moyennes pluriannuelles. Maintenant, si l'on s'intéresse à la robustesse du modèle face aux fluctuations climatiques, une analyse de l'influence de l'exactitude de l'évapotranspiration sur le comportement du modèle s'impose¹.

Le module de l'*ETP* de la série des données du bassin de l'Orgeval, pour la période 1963-1989, est de 755 mm, tandis qu'elle est de 741 mm, avec un écart-type de 48 mm, pour l'*ETP* datée. Bien entendu, le traitement de l'*ETP* moyenne par GR4J n'est qu'un lissage des valeurs datées (fig. A4.1.1). Ce lissage est parfois une bonne représentation de l'*ETP* datée, comme en 1968 ou en 1989, pouvant parfois conduire à une sous-estimation (1976, l'année pour laquelle l'*ETP* est la plus grande entre 1963 et 1989) ou à une surestimation de cette variable (1978, l'année pour laquelle l'*ETP* est la plus petite entre 1963 et 1989). Il ne s'agit ici que des conséquences naturelles de l'utilisation de moyennes à la place de valeurs datées, la question étant de savoir si cela a un impact significatif sur l'estimation des paramètres du modèle et, en particulier, sur sa robustesse vis à vis de la variabilité climatique.

En ce qui concerne la stationnarité des valeurs des paramètres, l'utilisation de l'*ETP* datée comme variable de forçage dans GR4J n'a pas une influence remarquable (fig. A4.1.2), car on observe la même variabilité des valeurs des paramètres ainsi que la même structure de variation, par rapport au calage effectué en utilisant l'*ETP* moyenne.

Le paramètre *b* ainsi que le paramètre *d*, quand $d > 0$, sont les plus sensibles à l'utilisation de l'*ETP* datée. Il est encore à remarquer une augmentation significative de l'écart-type du paramètre *c*, pour la période 1969-1971. A part ce cas, l'emploi de l'*ETP* datée n'introduit pas d'incertitudes supplémentaires remarquables dans l'identification des paramètres.

Les conséquences de l'évolution des valeurs des paramètres dans le cadre de cette étude sur les critères de qualité au calage et au contrôle sont à apprécier dans le tableau A4.1.1 et dans les figures A4.1.3 et A4.1.4. La figure A4.1.3 permet de comparer les résultats du calage en utilisant les deux sources d'*ETP* et la figure A4.1.4 montre l'évolution des critères de qualité pour des contrôles successifs, sur des périodes autres que celle de calage.

¹ Par exactitude de l'*ETP* nous entendons ici les valeurs journalières de l'*ETP* estimées au travers de l'équation de PENMAN. Par le fait que l'*ETP* est estimée et, en plus, que les valeurs effectivement disponibles dans le cas du bassin de l'Orgeval sont des valeurs décennales, le terme exactitude a un sens relatif ; il se rapporte au traitement courant de l'*ETP* par GR4J. Ainsi, la nouvelle version de GR4J qui traite cette variable possède toujours un module de désagrégation des valeurs décennales en valeurs journalières. Désormais on appellera ces valeurs *ETP* datées, et celles obtenues à partir de l'*ETP* décennale moyenne seront appelées *ETP* moyennes.

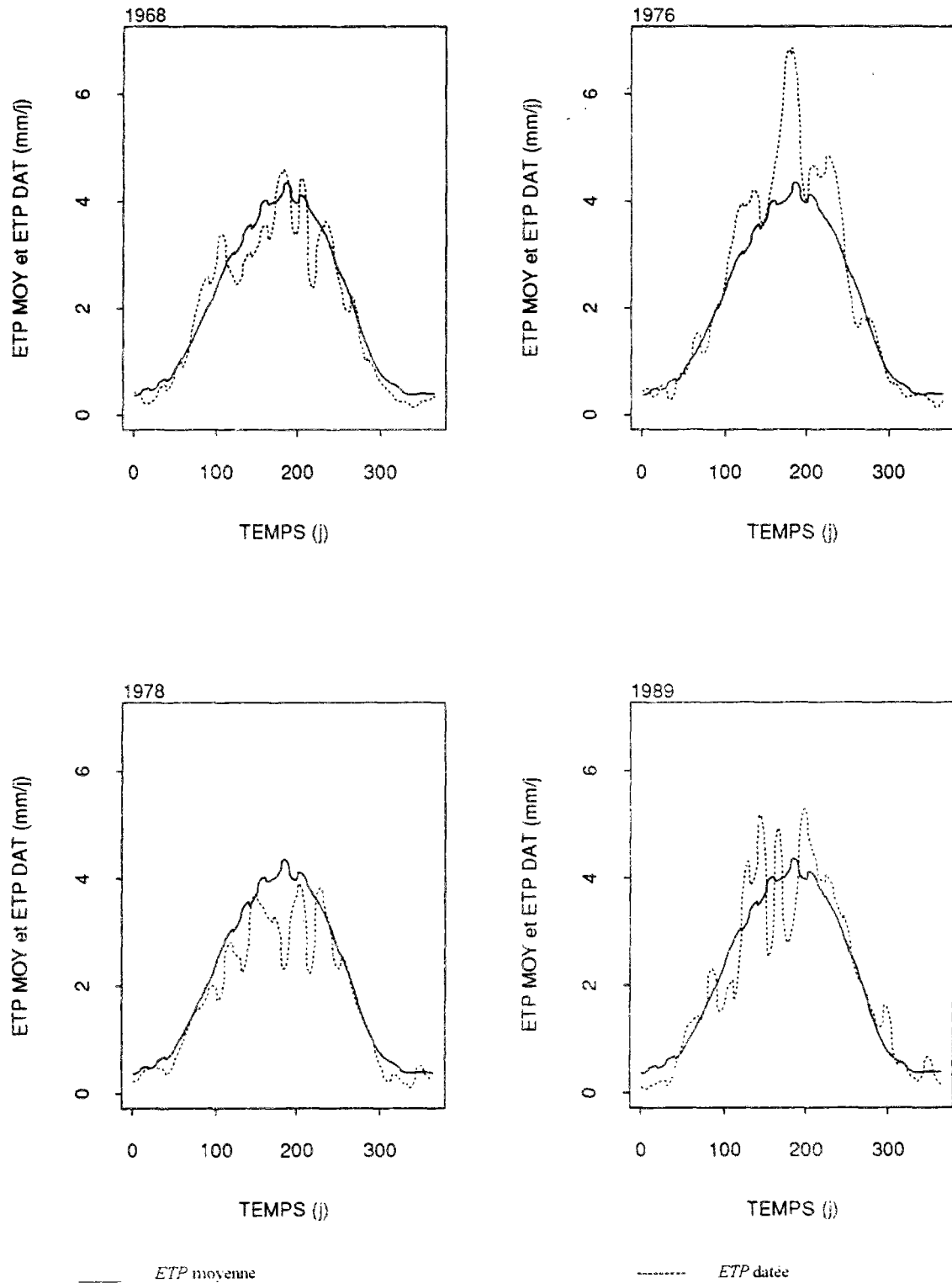


Fig. A4.1.1 - Bassin versant de l'Orgeval - Valeurs journalières de l'ETP moyenne l'ETP datée selon le module de désagrégation de GR4J

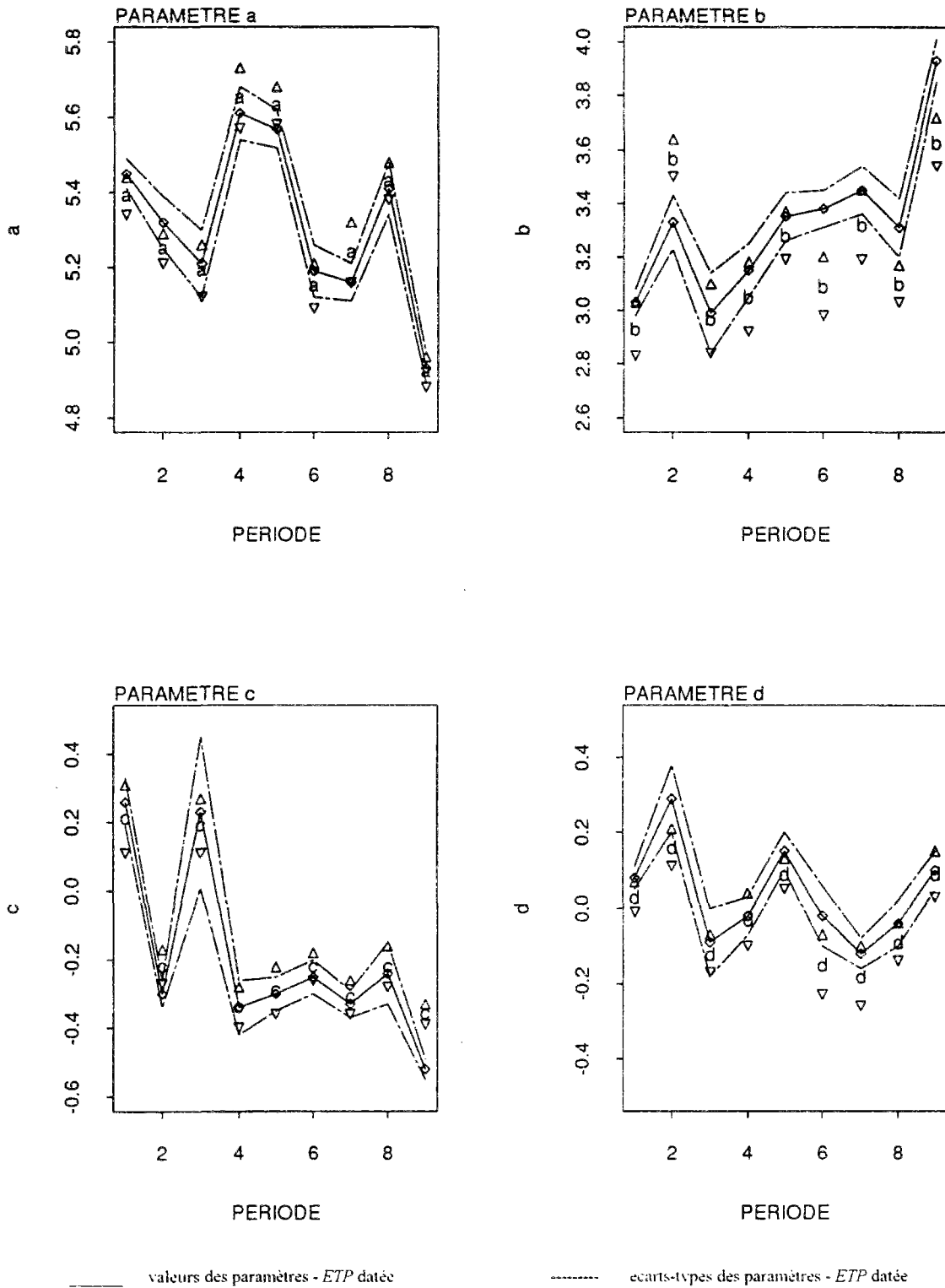


Fig. A4.1.2 - Bassin versant de l'Orgeval - paramètres *a*, *b*, *c* et *d* calage sur la série 1963-1989 par période de 3ans en utilisant l'*ETP* moyenne ou l'*ETP* datée

Tableau A4.1.1 - Bassin versant de l'Orgeval - Résultats du calage sur la série de 27 ans et par période de 3 ans en utilisant l'ETP datée - crières de qualité

périodes années	<i>NASH</i> %	<i>BILN</i> %	<i>CMCR</i> %	<i>CMET</i> %	<i>CRU</i> %	<i>CRUM</i> %	<i>DRC</i> %	<i>DRET</i> %
1963-1989	81	100	86	130	91	93	90	87
1963-1965	89	96	88	93	85	87	84	117
1966-1968	83	83	91	32	106	109	78	169
1969-1971	82	104	82	157	79	87	89	68
1972-1974	82	106	83	147	77	73	90	64
1975-1977	84	94	83	95	91	87	104	101
1978-1980	87	100	87	118	92	91	95	88
1981-1983	83	100	87	140	80	87	91	73
1984-1986	80	103	82	127	95	122	87	82
1987-1989	76	101	80	120	99	98	73	84

BILN = rapport des volumes ; *CMCR* = rapport de cumuls de crues ; *CMET* = rapport de cumuls d'étiages ; *CRU* = rapport des crues annuelles moyennes ; *CRUM* = rapport des crues-maxima-maximorum ; *DRC* = rapport des durées des crues ; *DRET* = rapport des durées d'étiage.

En ce qui concerne les critères de qualité pour le calage, on observe qu'il n'y pas de différence significative entre l'utilisation de l'ETP moyenne et de l'ETP datée, en particulier pour les critères de *NASH*, du bilan et des cumuls des crues. Les critères de crue sont un peu plus sensibles à l'ETP datée, cependant, la différence par rapport à l'ETP moyenne n'arrive pas à 10 %. Par contre, il est intéressant de noter que l'ETP datée joue un rôle plus significatif pour tous les critères concernant la représentation des étiages. Cela est encore plus net au cours des périodes 6, 7 et 8, où d'après la figure 4.2 - chapitre 4, la valeur de l'ETP datée se réduit d'une façon plus significative. Dans ces périodes, les durées de crues se trouvent aussi améliorées.

Par contre, l'évolution des variables hydrologiques caractéristiques de la relation pluie-débit à travers les contrôles successifs (fig. A4 1.4), présente une structure équivalente à celle obtenue en utilisant l'ETP moyenne (fig. 4.6 - chapitre 4). On observe tout simplement une amplitude de variation légèrement inférieure pour certains critères, notamment pour les durées de crue et d'étiage. En général les déviations produites par les calages en périodes humides ou sèches sont parfaitement cohérentes avec celles obtenues pour ces mêmes périodes quand on utilise l'ETP moyenne.

Il faut quand même souligner que le calage sur la période 6, en particulier, produit des déviations moins importantes sur l'ensemble des critères en contrôle, si l'on utilise l'ETP datée. En effet, d'après la figure A4 1.5, en comparaison avec les mêmes résultats obtenus en utilisant l'ETP moyenne (fig. 4.9 - chapitre 4), on arrive à une meilleure représentation des lames écoulées dans les périodes où l'ETP datée est nettement plus faible, en utilisant celle-ci plutôt que l'ETP moyenne. Pour les autres périodes, on peut affirmer que l'utilisation de l'ETP datée à la place de l'ETP moyenne est non significative en termes de performance du modèle.

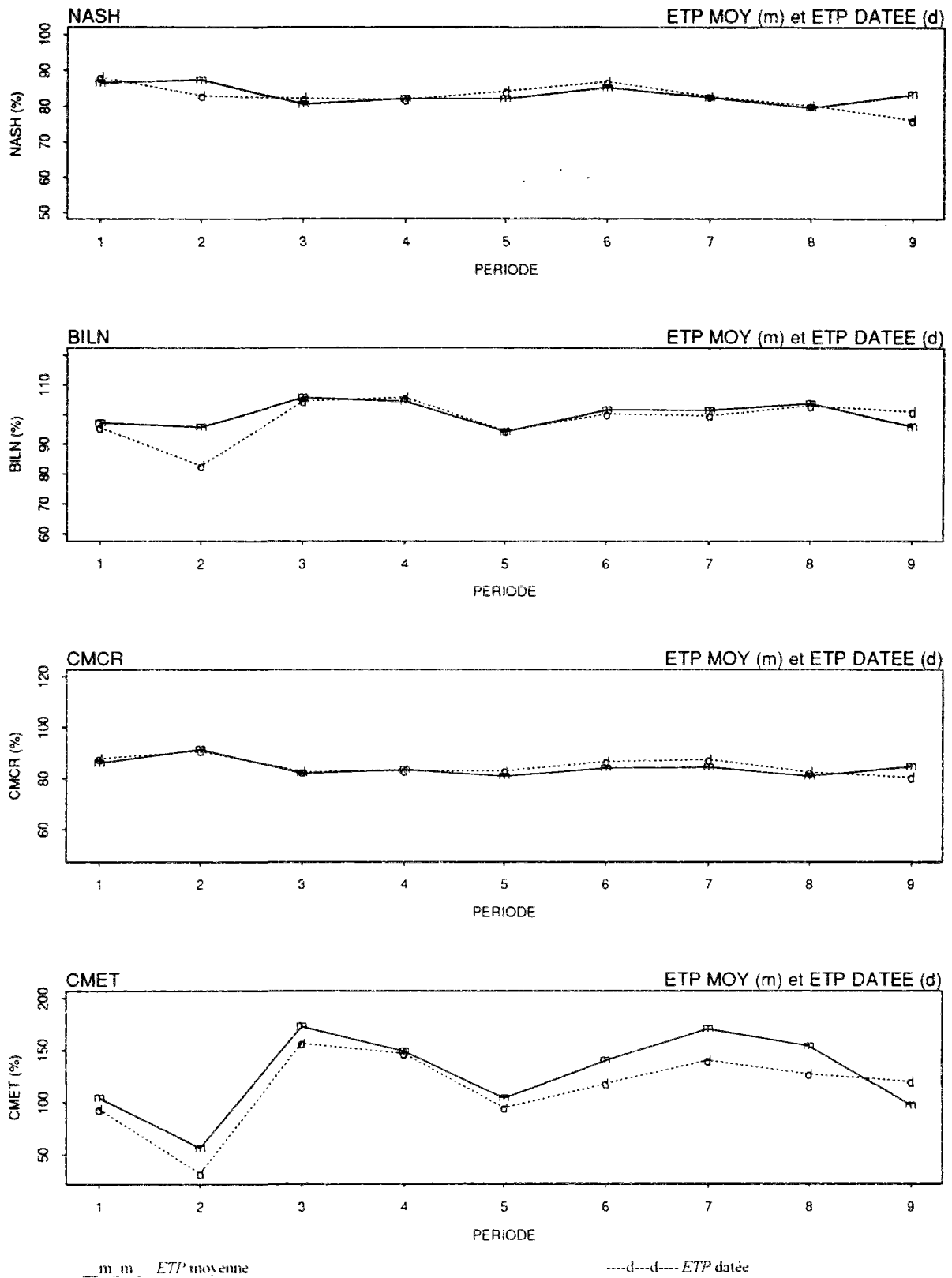
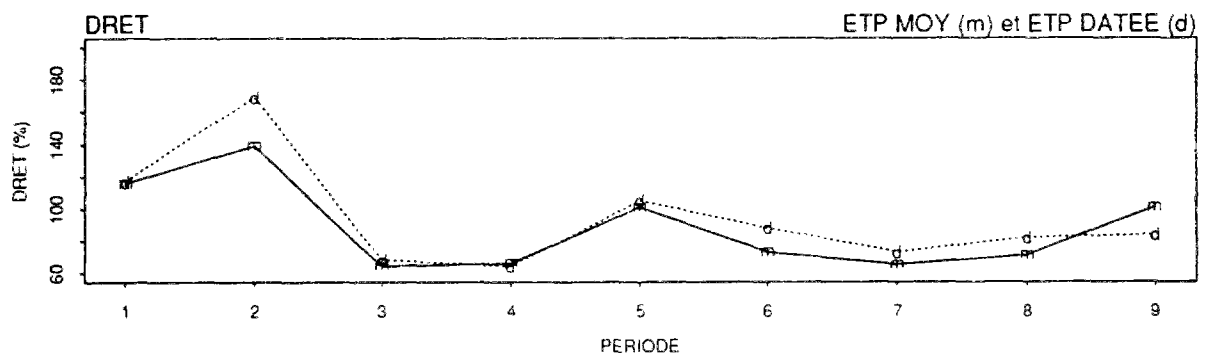
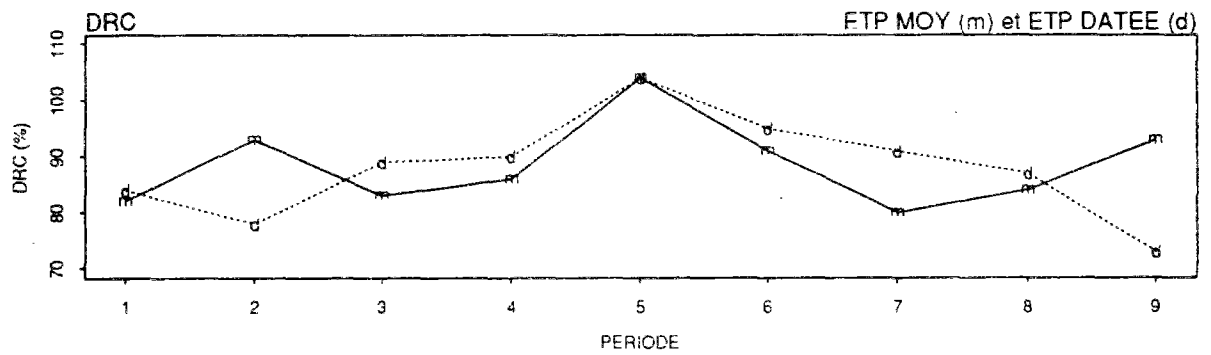
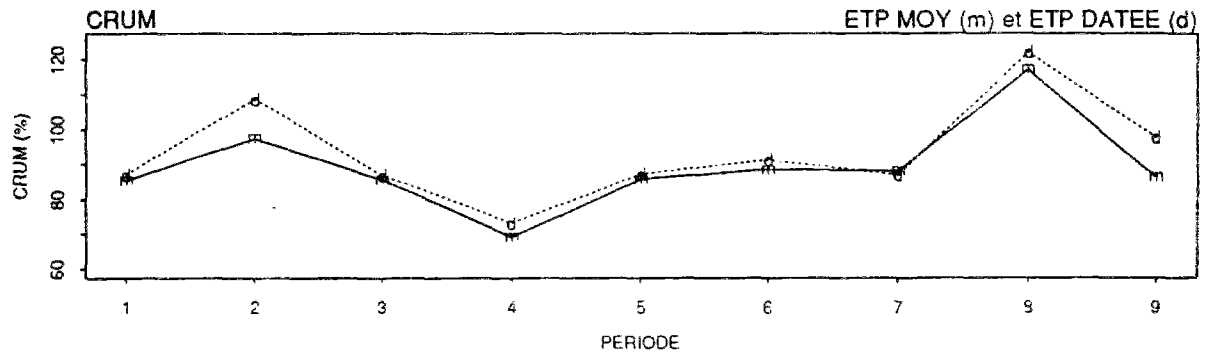
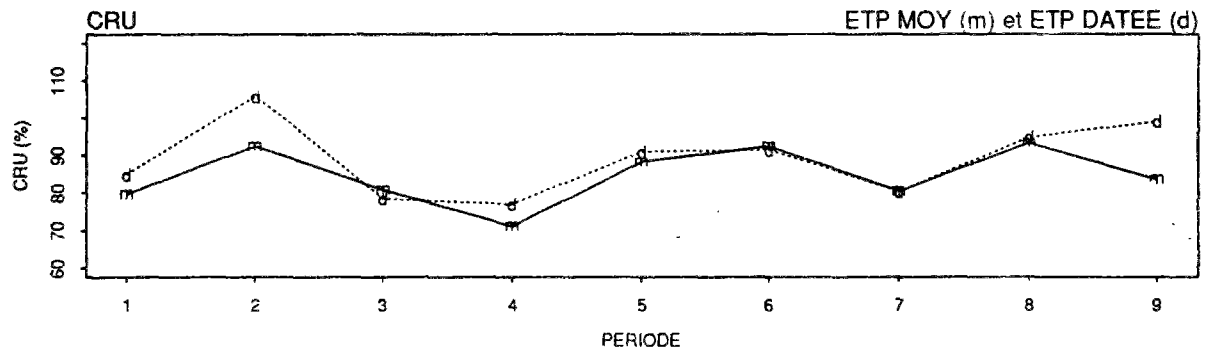
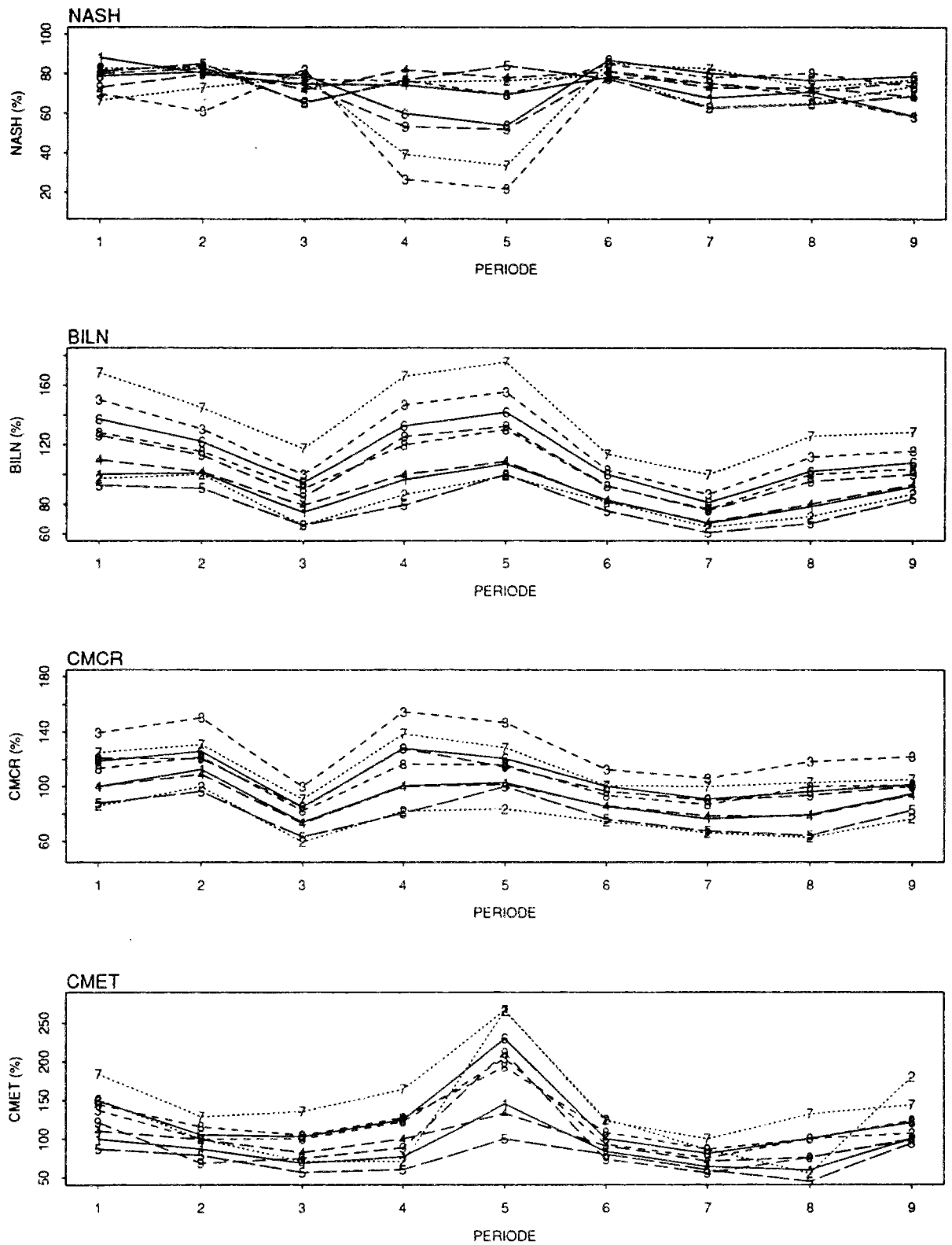


Fig. A4.1.3



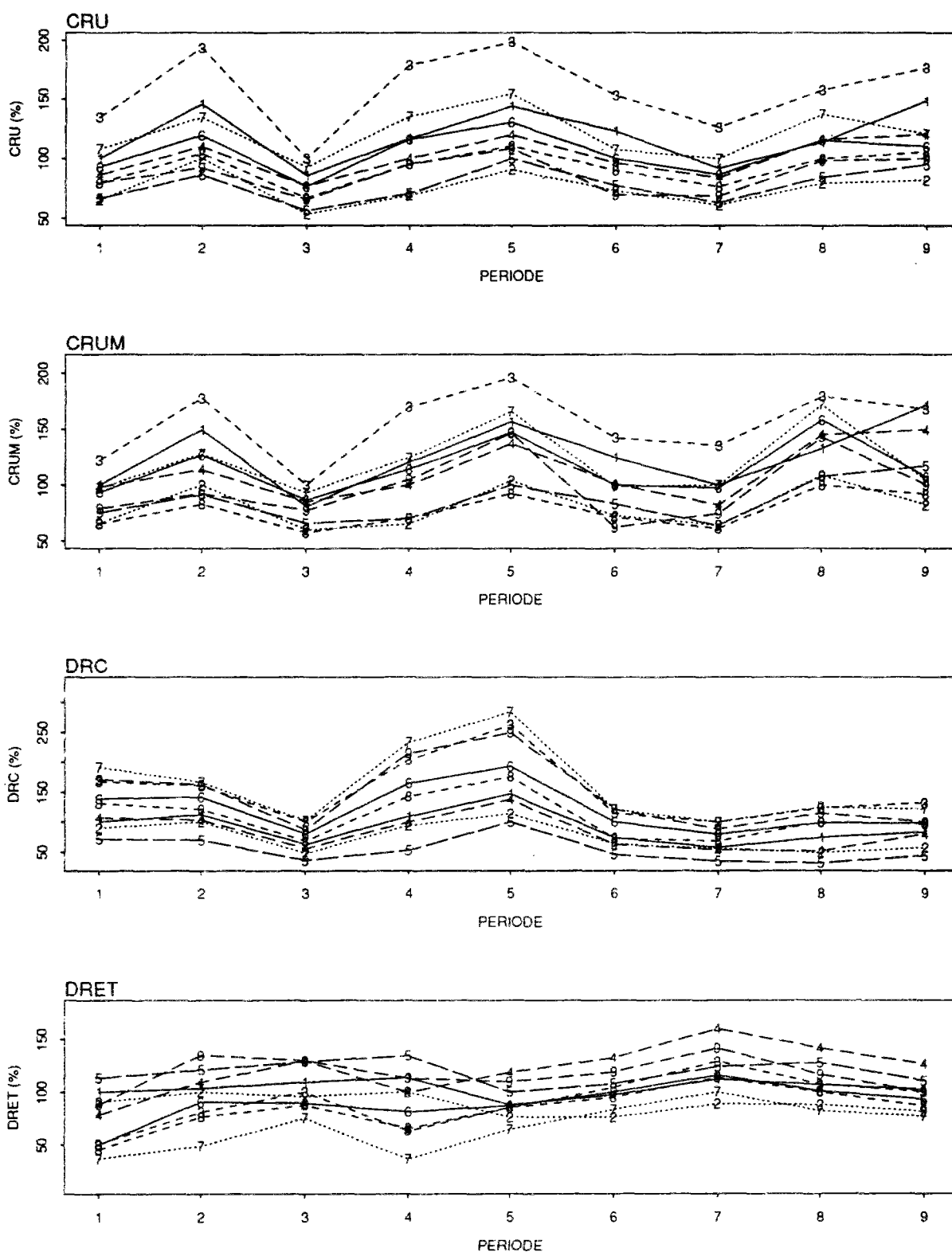
_____ ETP moyenne
 ----d--d---- ETP datee
 légende des périodes :
 1 : 1963-1965 2 : 1966-1968 3 : 1969-1971 4 : 1972-1974 5 : 1975-1977
 6 : 1978-1980 7 : 1981-1983 8 : 1984-1986 9 : 1987-1989

Fig. A4.1.3 - Bassin versant de l'Orgeval - évolution dans le temps des critères de qualité de GR4J pour le calage, en utilisant l'ETP moyenne ou l'ETP datée



NASH = critère de NASH *BILN* = rapport de bilan *CMCR* = r. des cumuls des crues *CMET* = r. des cumuls d'étiages
CRU = r. des crues annuelles moy. *CRUM* = r. crues m.-maximumum *DRC* = rapport des durées de crue *DRET* = r. des durées d'étiage

Fig. A4.1.4



légende des périodes :

1 : 1963-1965	2 : 1966-1968	3 : 1969-1971	4 : 1972-1974	5 : 1975-1977
6 : 1978-1980	7 : 1981-1983	8 : 1984-1986	9 : 1987-1989	

Fig. A4.1.4 - Bassin versant de l'Orgeval - évolution dans le temps des critères de qualité de GR4J par des contrôles successifs, en utilisant l'ETP datée

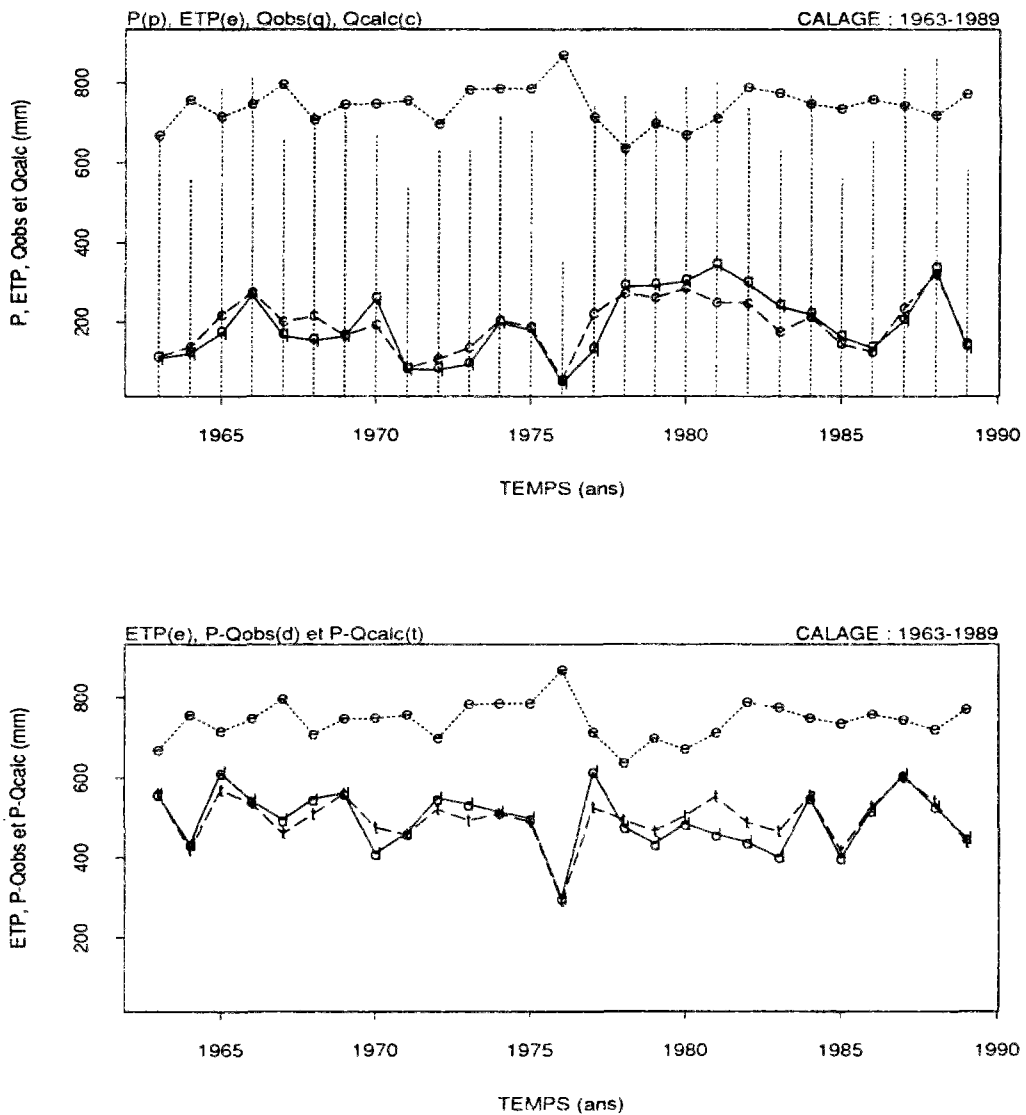


Fig. A4.1.5 - Bassin versant de l'Orgeval - Précipitation, ETP datée, Q_{obs} , Q_{calc} , $P-Q_{obs}$ et $P-Q_{calc}$ - calage en utilisant l' ETP datée

La figure A4.1.6 nous permet de conclure que les résidus du modèle quand le calage est fait en utilisant l' ETP datée présentent la même structure que ceux obtenus par le calage en utilisant l' ETP moyenne (fig. 4.12 - chapitre 4). Parallèlement, il est intéressant d'observer que les pertes par rapport aux lames écoulées suivent à peu près l'évolution saisonnière de l' ETP .

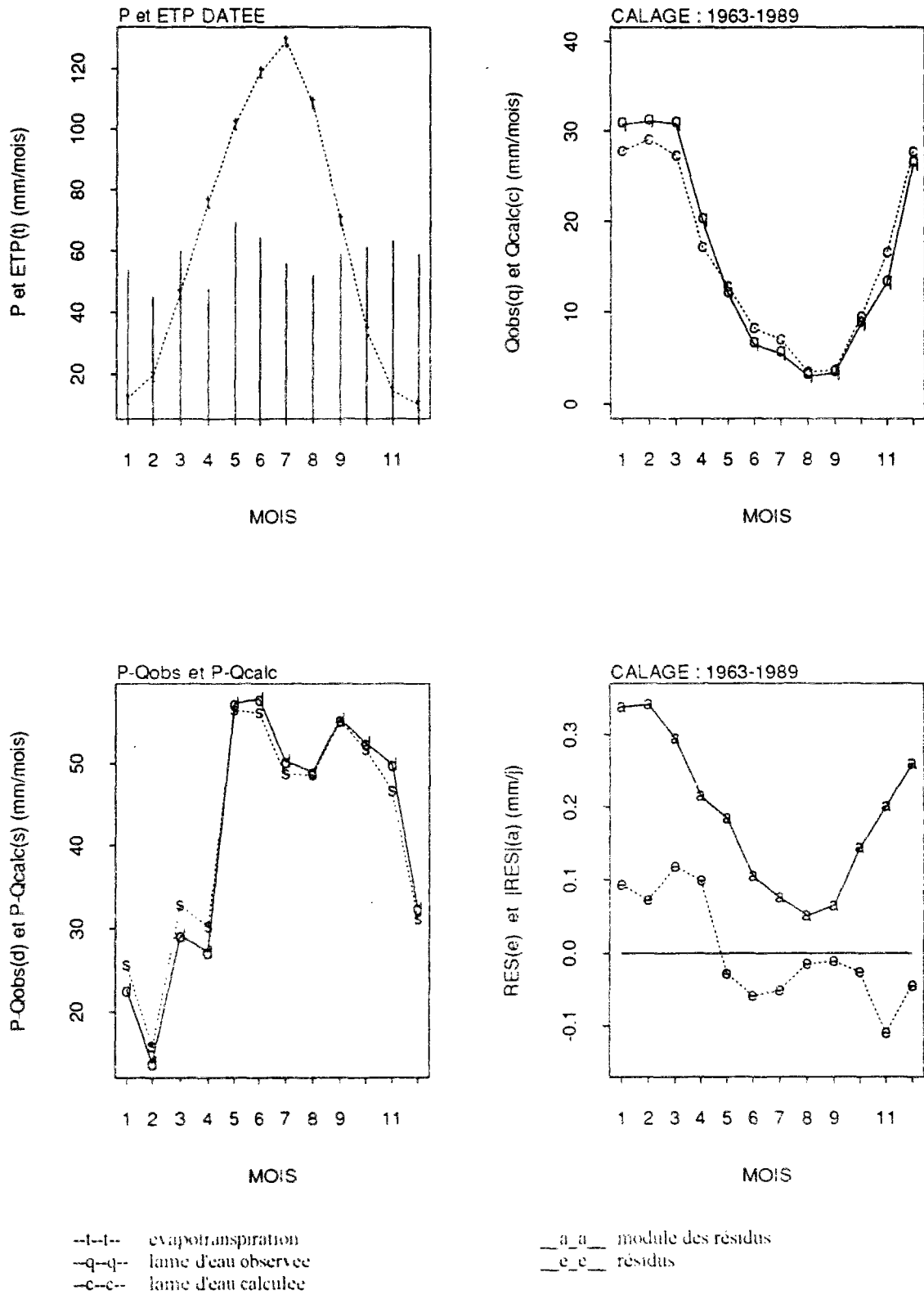


Fig. A4.1.6 - Bassin versant de l'Orgeval - calage du modèle GR4J
 valeurs pluriannuelles moyennes mensuelles des P , ETP datée, Q_{obs} , Q_{calc} ,
 $P-Q_{obs}$ et $P-Q_{calc}$ - calage en utilisant l' ETP datée

L'influence de l'*ETP* datée sur l'état du système se révèle également faible, même quand cette variable prend des valeurs assez différentes de l'*ETP* moyenne, comme en 1976. Pendant l'été 1976, elle est particulièrement plus grande que l'*ETP* moyenne. Cependant, comme cette année est très sèche, le réservoir-sol contient peu d'eau à évaporer. Donc, la génération de l'évapotranspiration réelle est peu sensible à une augmentation de l'*ETP*.

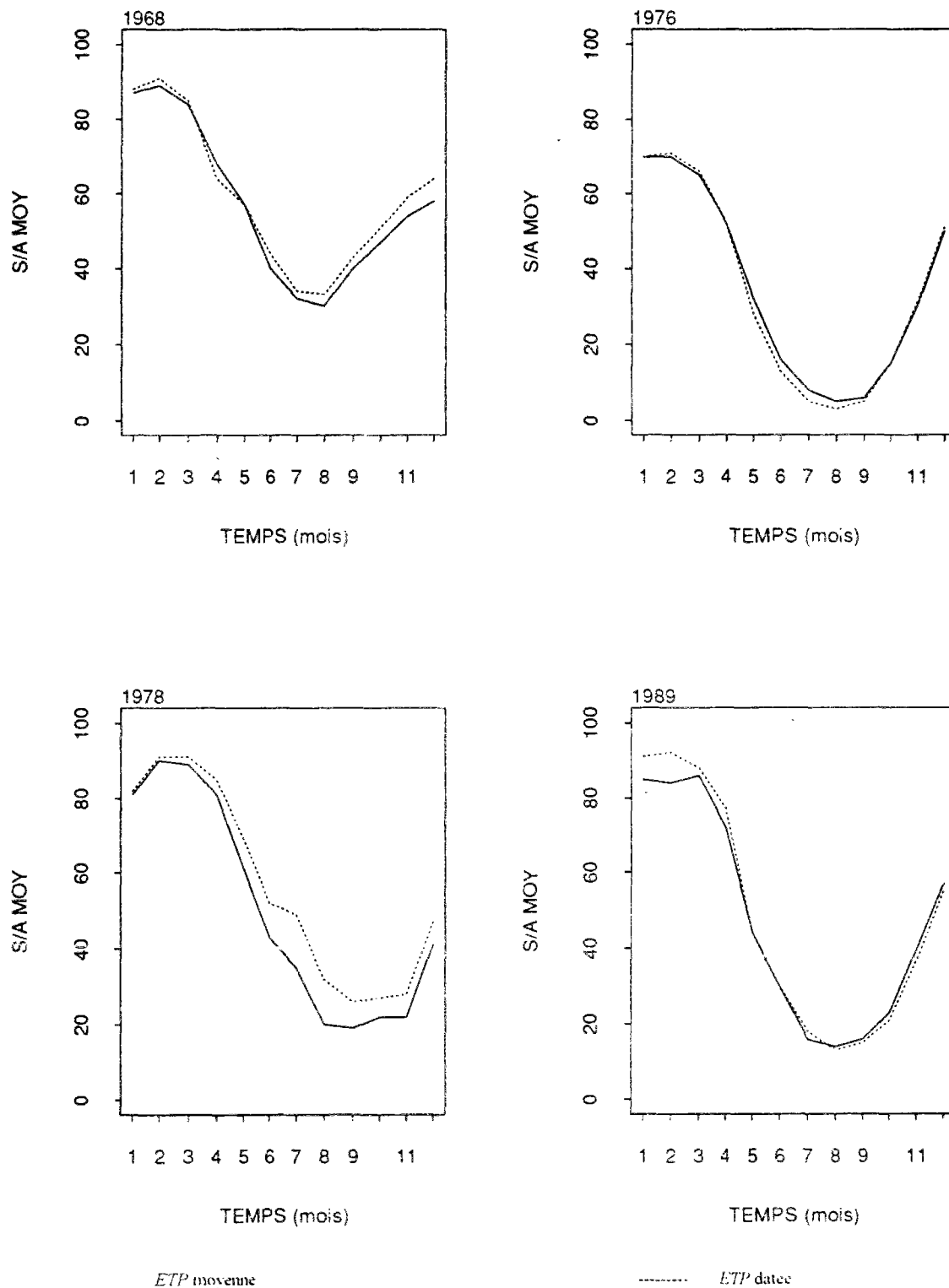


Fig. A4.1.7

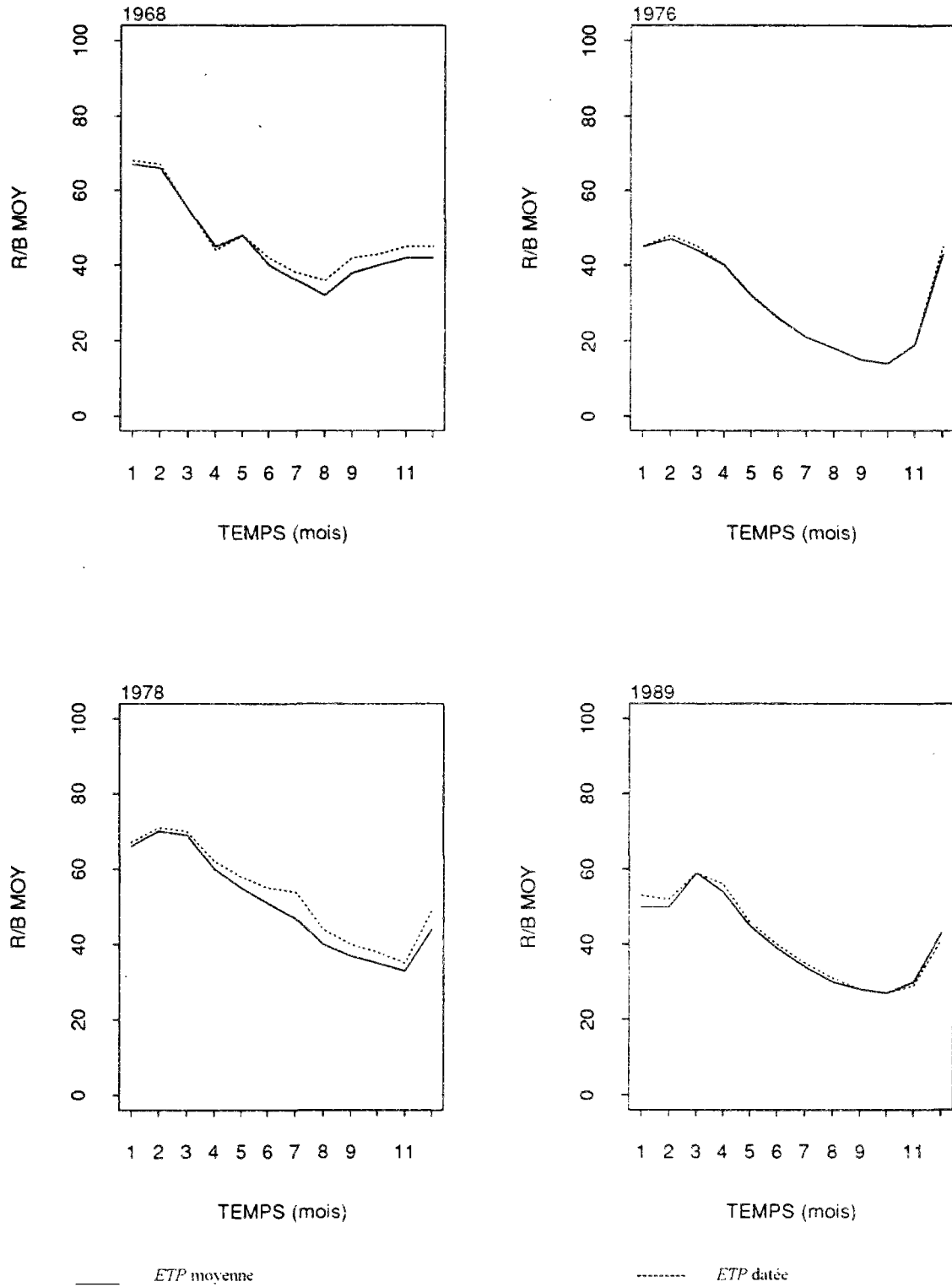


Fig. A4.1.7 - Bassin versant de l'Orgeval - Bassin versant de l'Orgeval - Valeurs moyennes journalières de *S/A* et de *R/B* quand on utilise l'*ETP* moyenne ou l'*ETP* datée dans GR4J

En 1978 la situation s'inverse, il y a plus de pluie et moins d'*ETP*. On remarque ainsi une plus grande influence de l'*ETP* datée sur *S/A* et *R/B*, surtout pendant l'été, où les différences de cette variable par rapport à l'*ETP* moyenne sont plus importantes. Cela peut être à l'origine d'une meilleure performance du modèle au cours des années autour de 1978, en termes de précipitation et d'évapotranspiration. Néanmoins, il s'agit ici d'un cas particulier.

En conclusion, on observe qu'en général l'utilisation de l'*ETP* moyenne tel qu'on le fait habituellement avec le modèle GR4J est satisfaisante, le gain relatif l'*ETP* datée à en terme de critères de calage et de contrôle, ainsi que par rapport à la stationnarité des paramètres et des variables hydrologiques calculées n'étant pas significatif.

Ce résultat peut être expliqué d'une part par les faibles variations de l'*ETP* datée au cours du temps (fig. 4.2 - chapitre 4) et d'autre part, probablement par le fait que dès les premières versions de GR3J on a utilisé l'*ETP* moyenne comme forçage. En ce qui concerne la première hypothèse, on remarque que le coefficient de variation de l'*ETP* datée dans la période 1963-1989 n'est que de 6%, tandis qu'il est de 16% pour *P* et de 43% pour Q_{obs} . (tableau 4.1 - chapitre 4). La deuxième conjecture est plus difficile à démontrer, encore qu'il semble raisonnable d'admettre que la structure du modèle soit en partie, au moins, conditionnée par le choix du traitement de l'*ETP*.

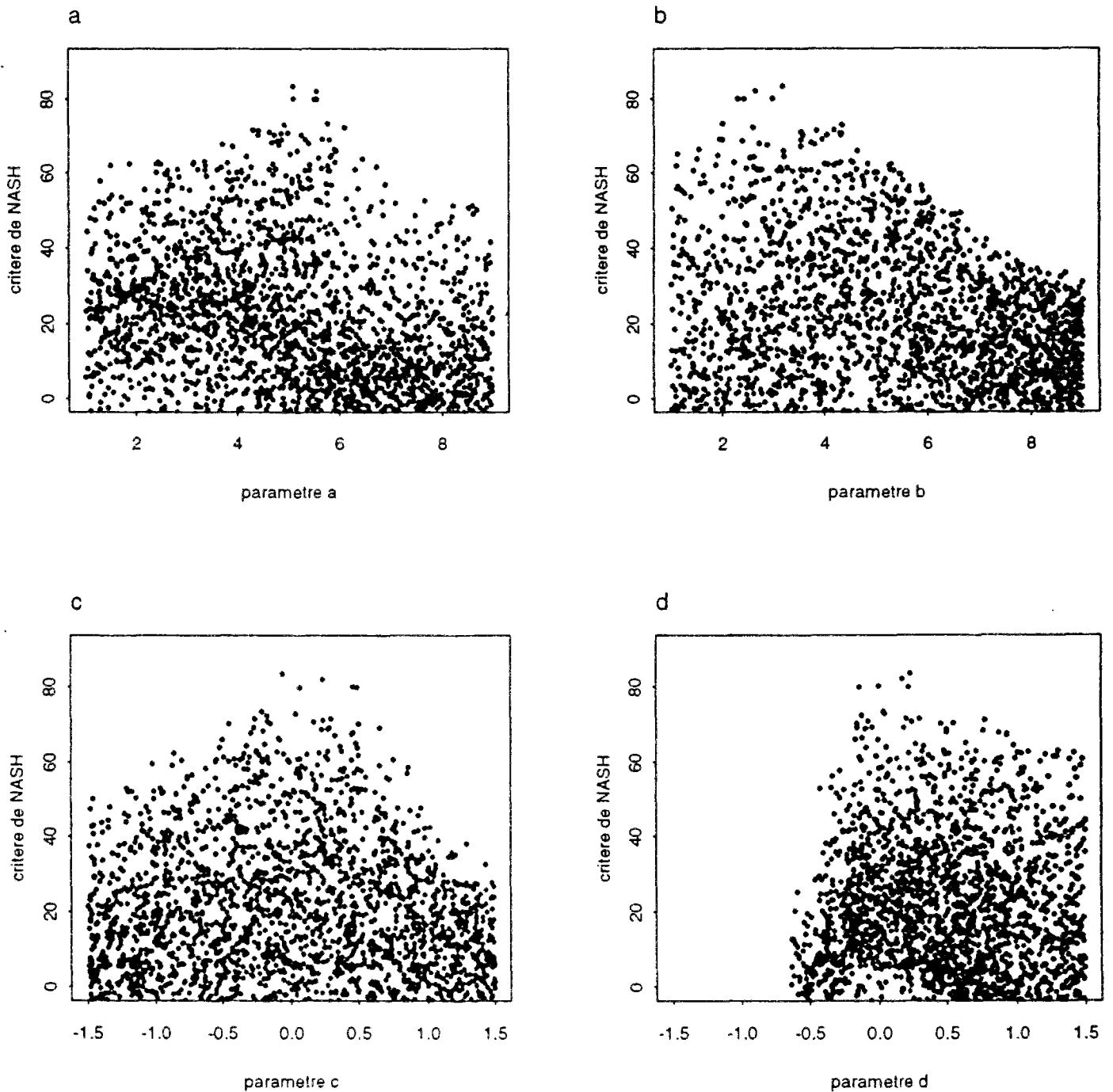
Bien entendu, ici on a tout simplement considéré le cas du bassin de l'Orgeval et on s'est concentré sur la problématique de l'étude en cours. Une étude plus complète a été faite en utilisant deux autres bassins versants, en plus de l'Orgeval, dans le cadre d'un travail, que j'ai contribué à diriger, de Diplôme d'Etudes Approfondies réalisé au CEMAGREF - groupement d'Antony (KRIBECHE, 1994)². Les deux autres bassins, le Réal Collobrier et la Seugne, sont représentatifs des climats méditerranéen et océanique humide, respectivement. Les conclusions de KRIBECHE (1994), concernant l'ensemble des cas étudiés, confirment les résultats décrits ici pour l'Orgeval, et proviennent pour la plupart de son travail.

²Mr. KRIBECHE a été encadré par Mr. le Professeur Pierre-Alain ROCHE, enseignant superviseur et par MM. Claude MICHEL et Nilo NASCIMENTO, maîtres de stage.

Annexes du Chapitre 5

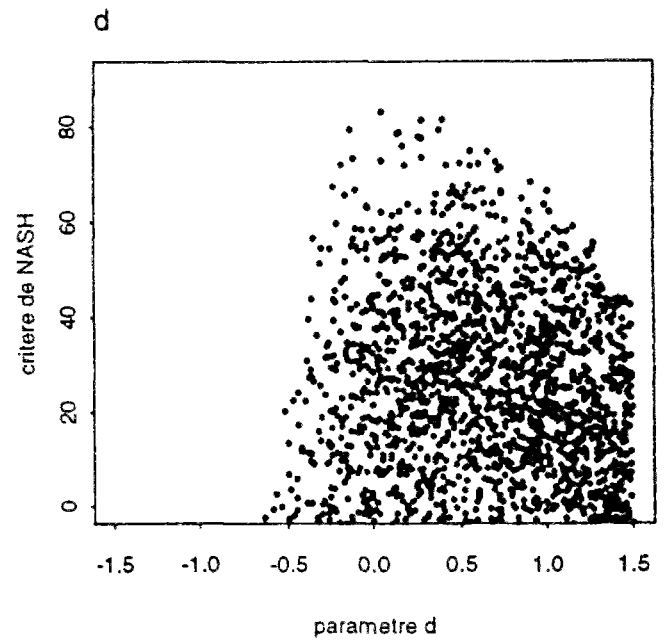
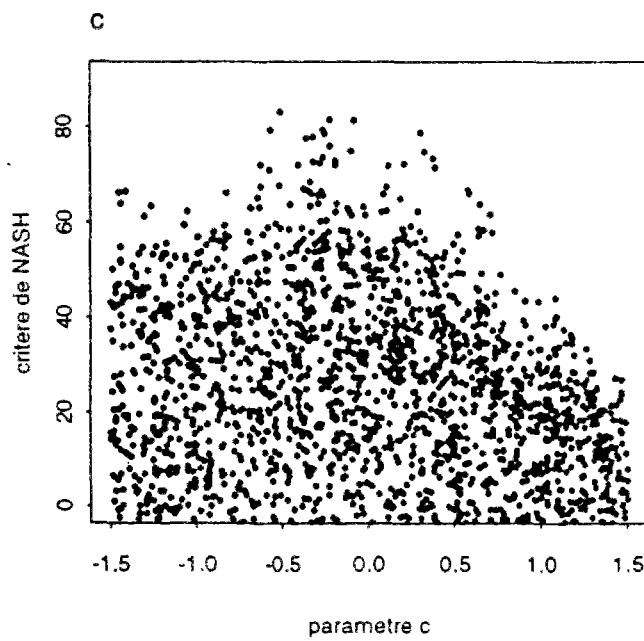
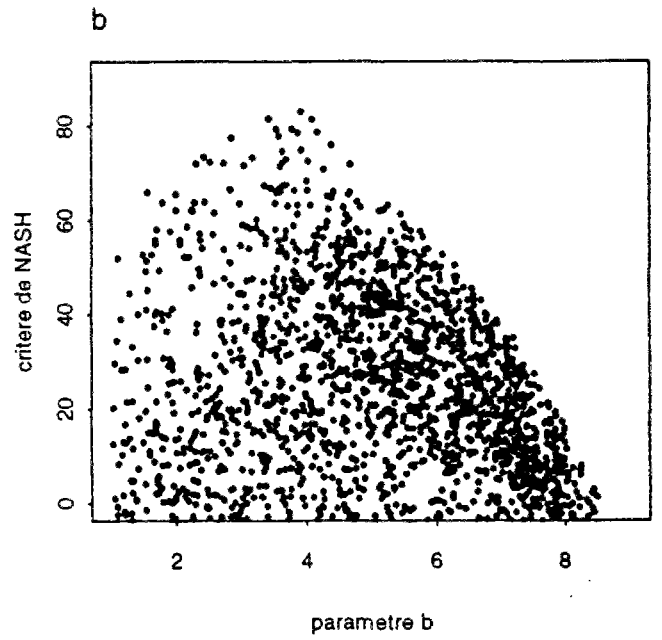
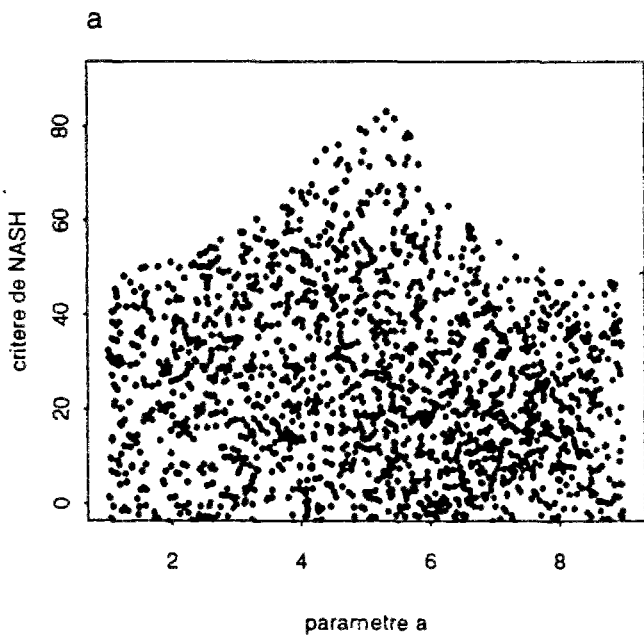
Annexe 5.1 - La méthode URS appliquée dans le calage de GR4J une analyse exploratoire

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1963-1965)



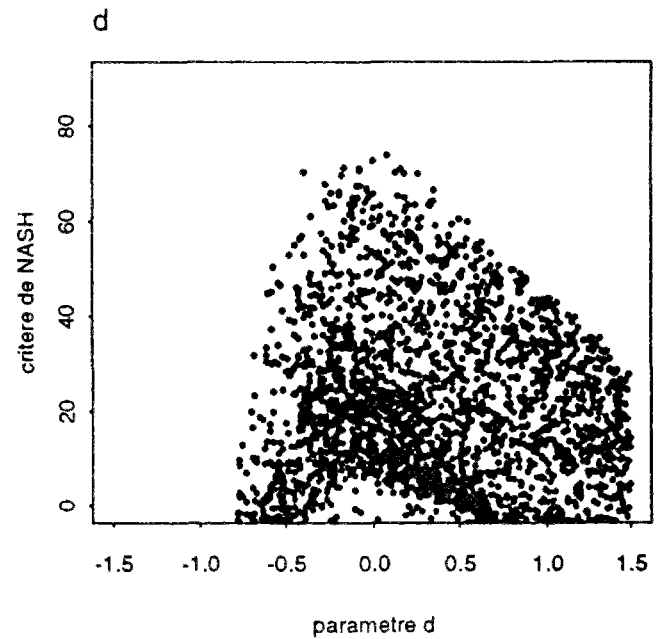
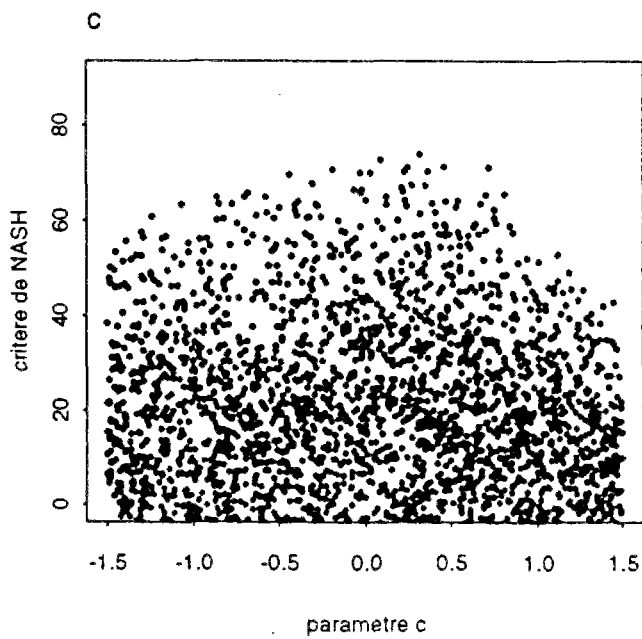
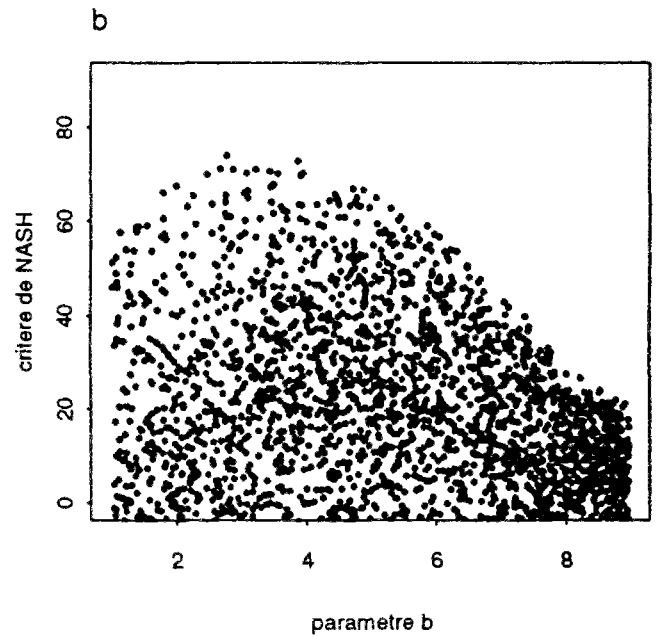
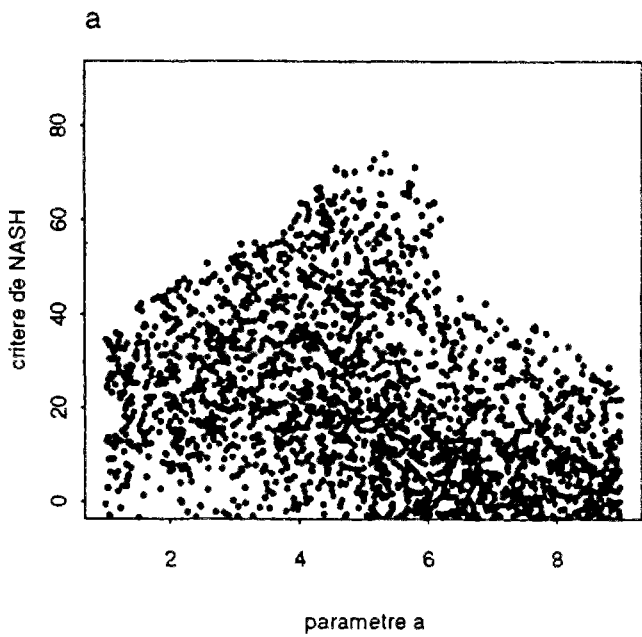
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1966-1968)



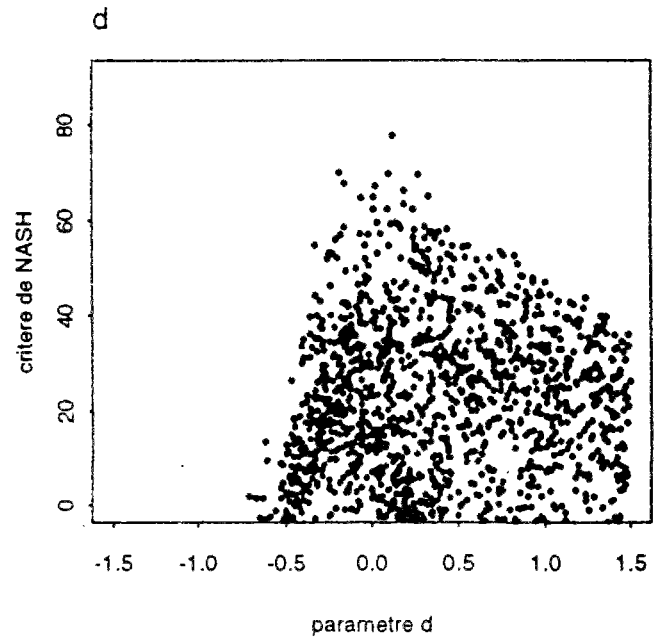
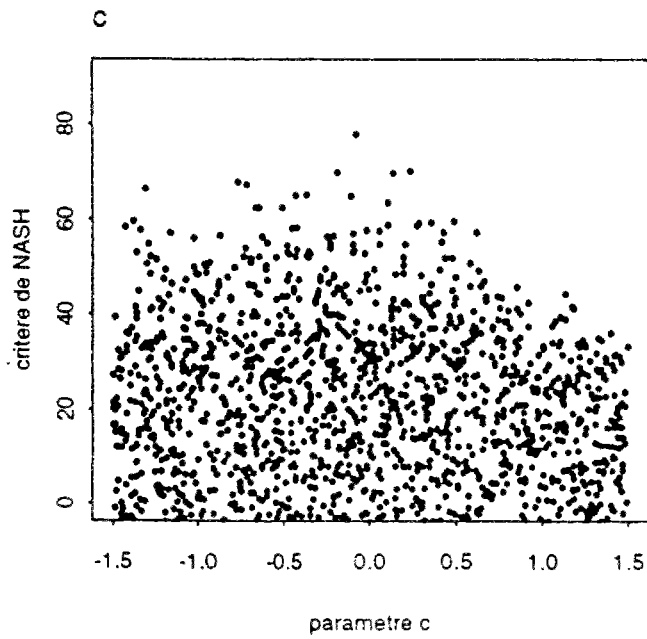
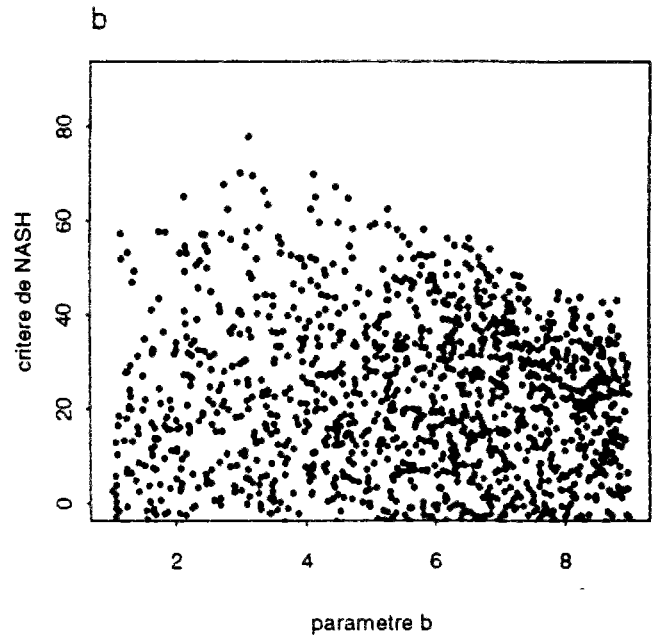
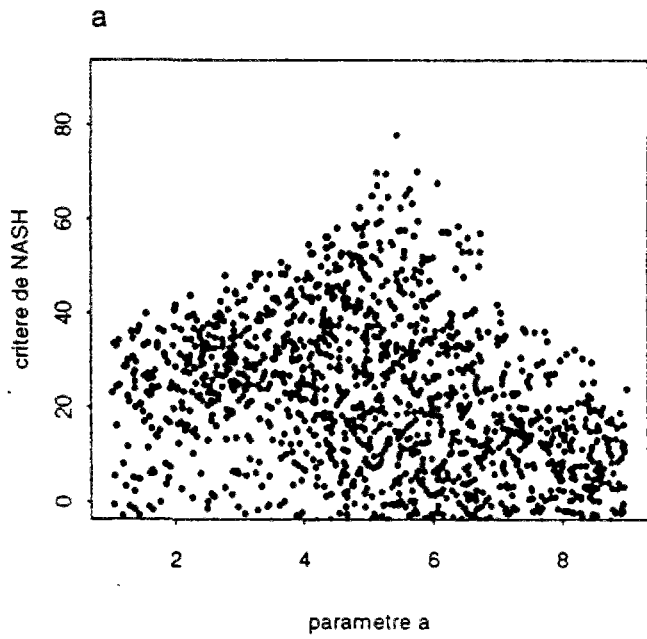
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1969-1971)



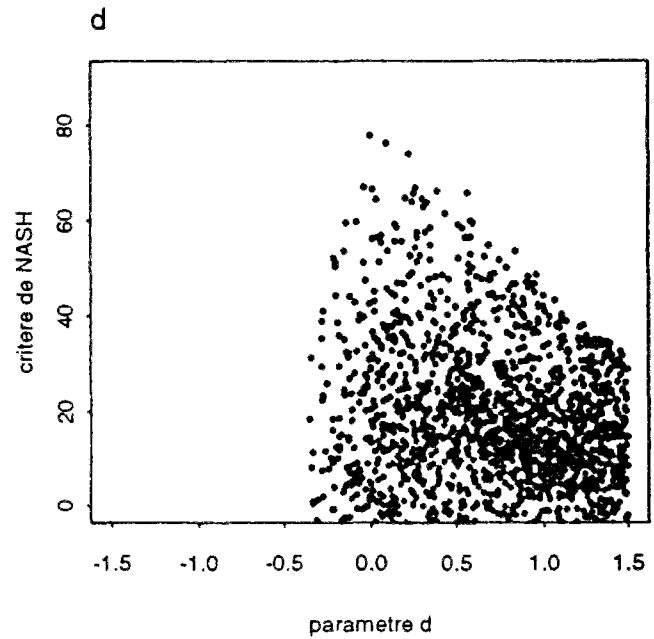
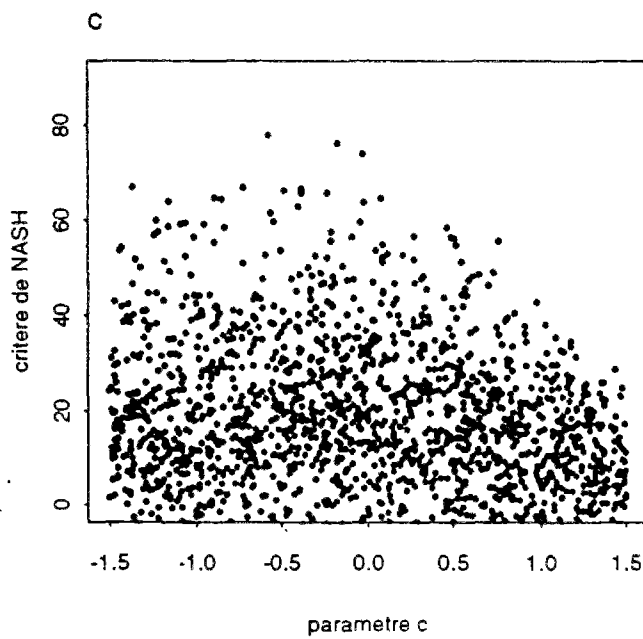
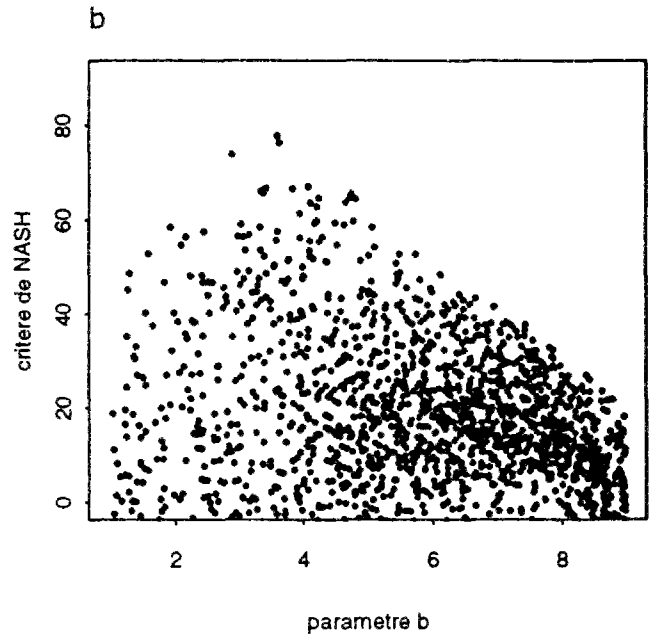
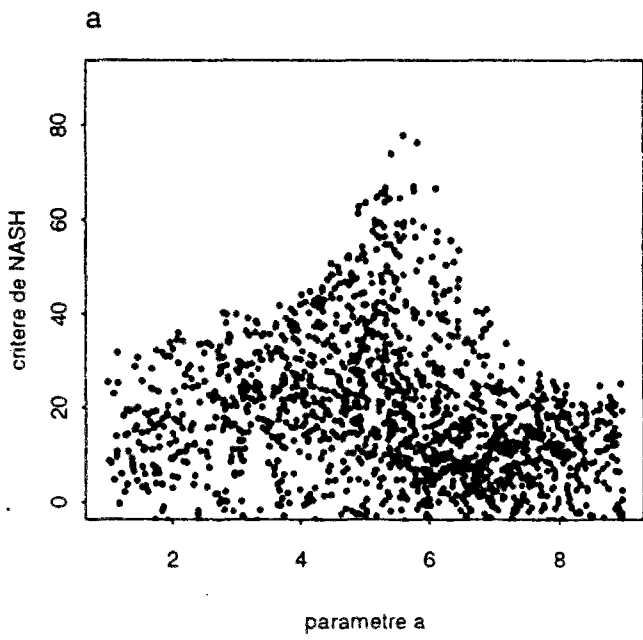
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1972-1974)



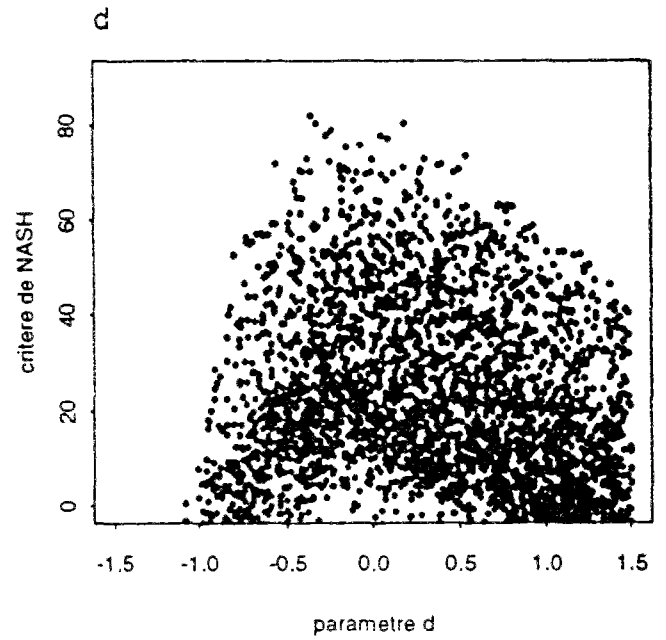
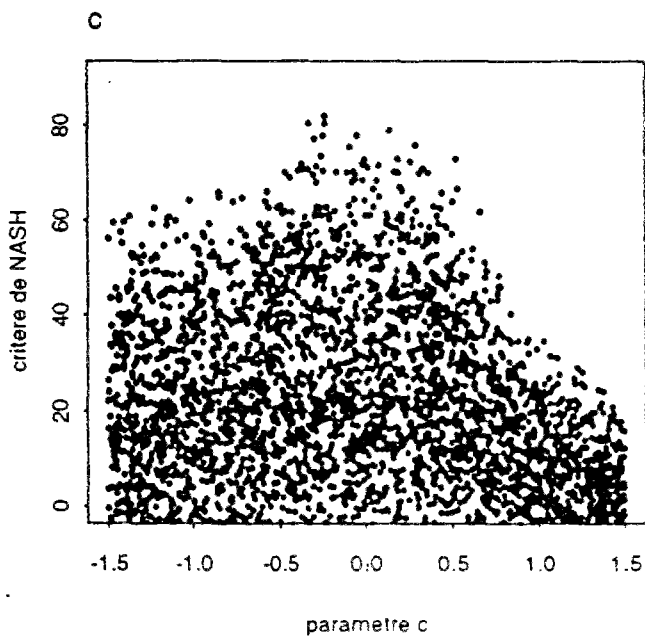
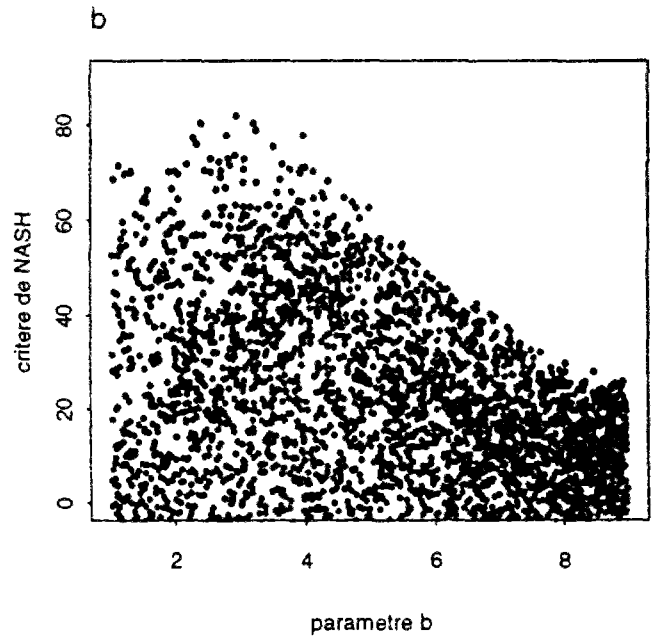
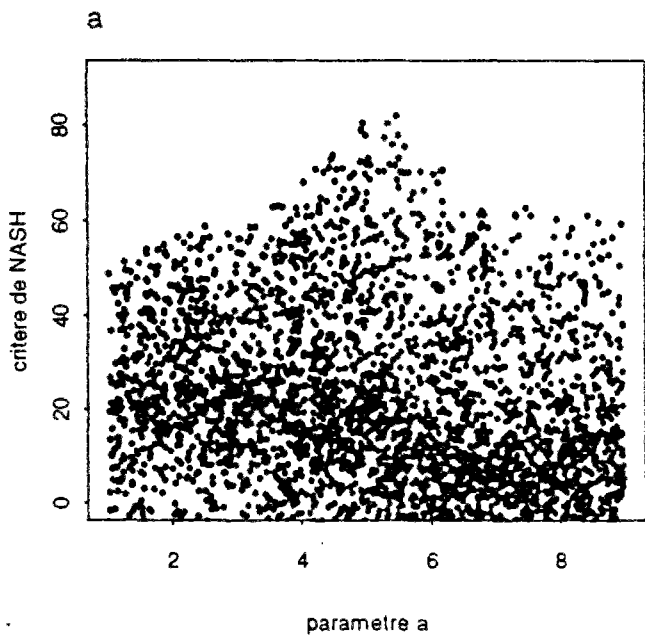
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1975-1977)



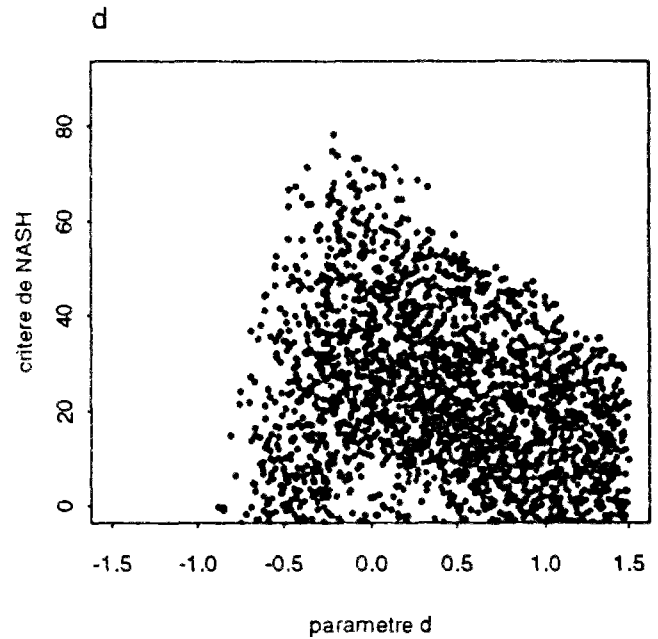
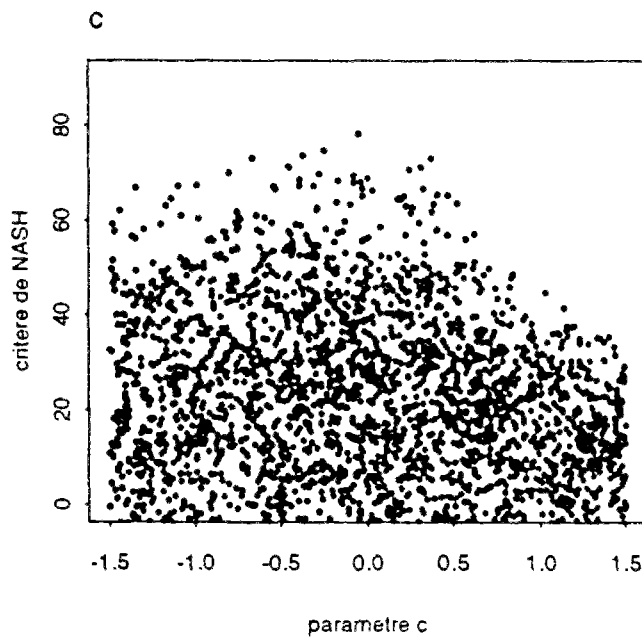
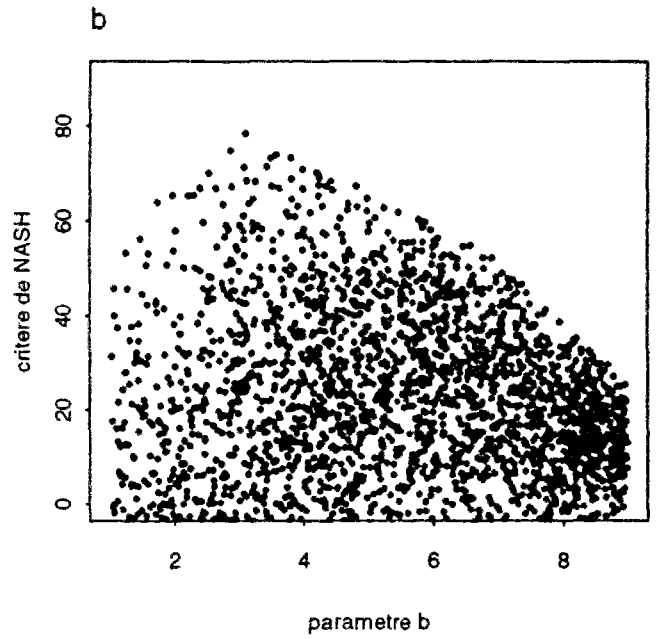
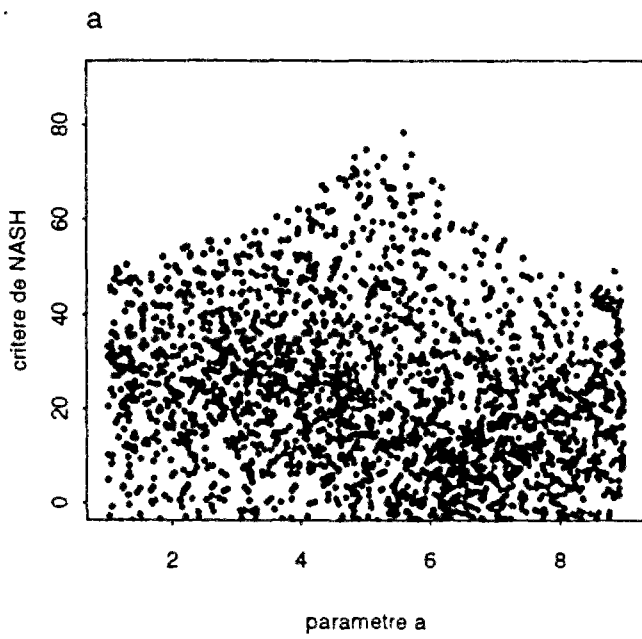
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1978-1980)



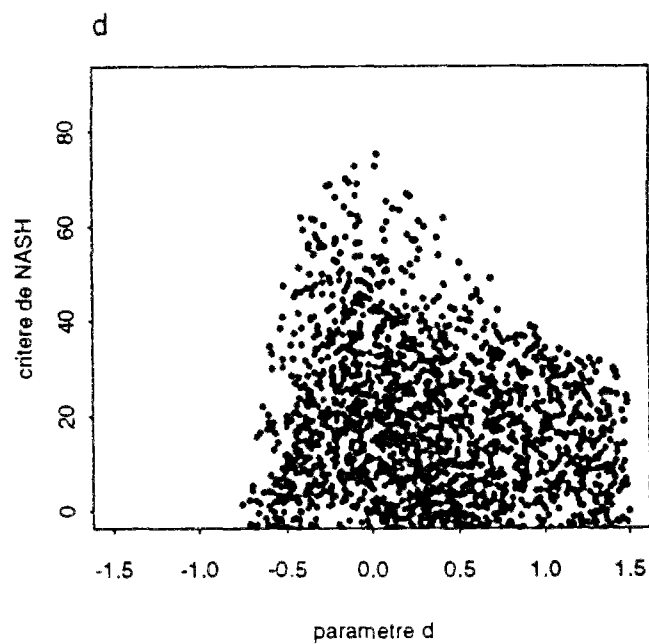
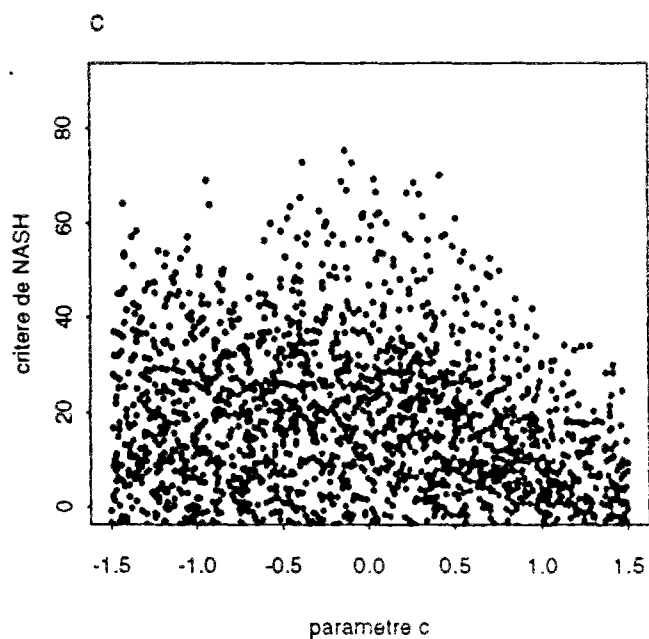
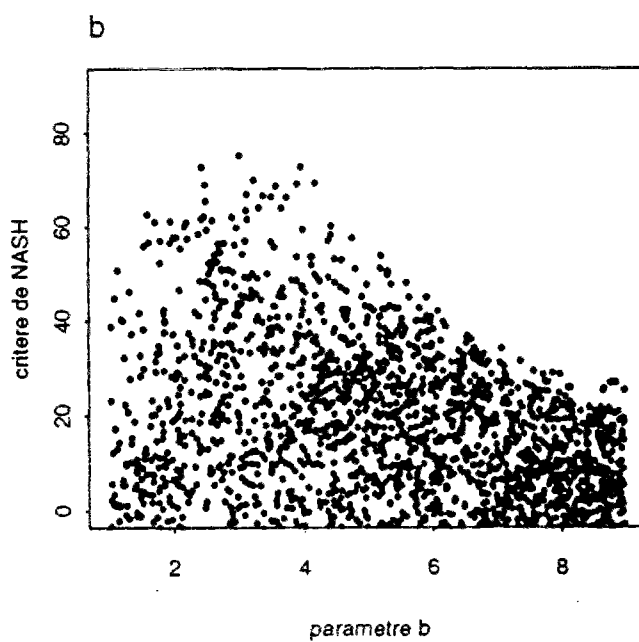
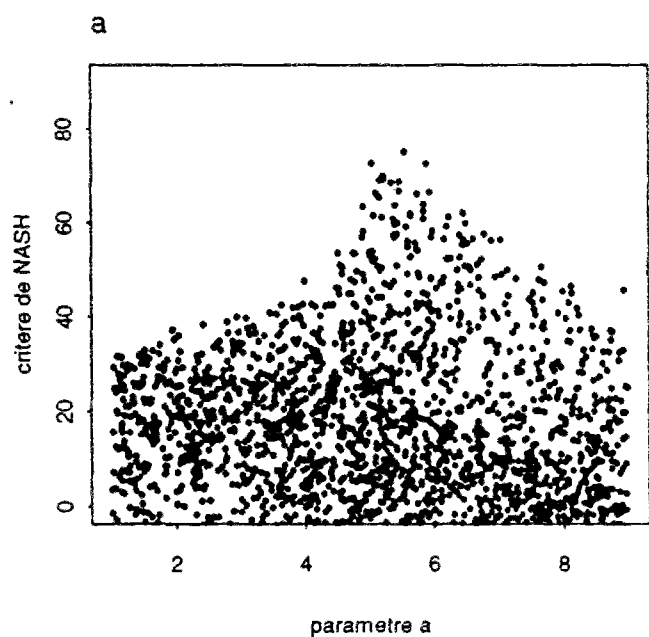
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1981-1983)



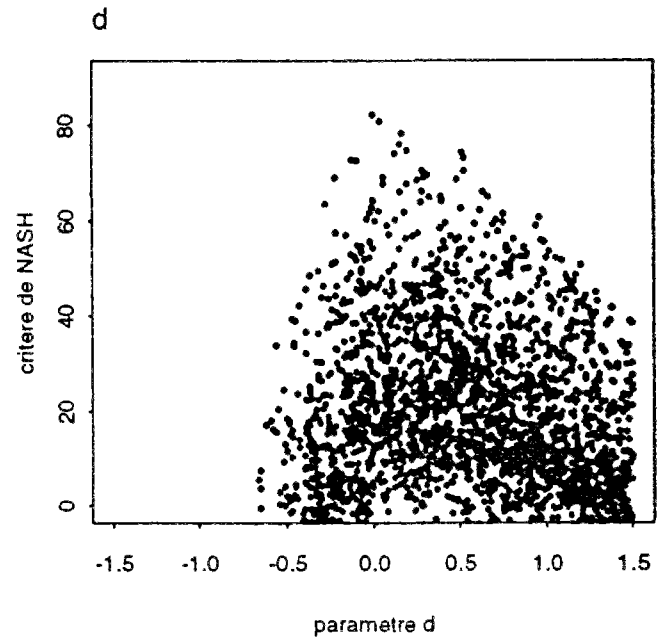
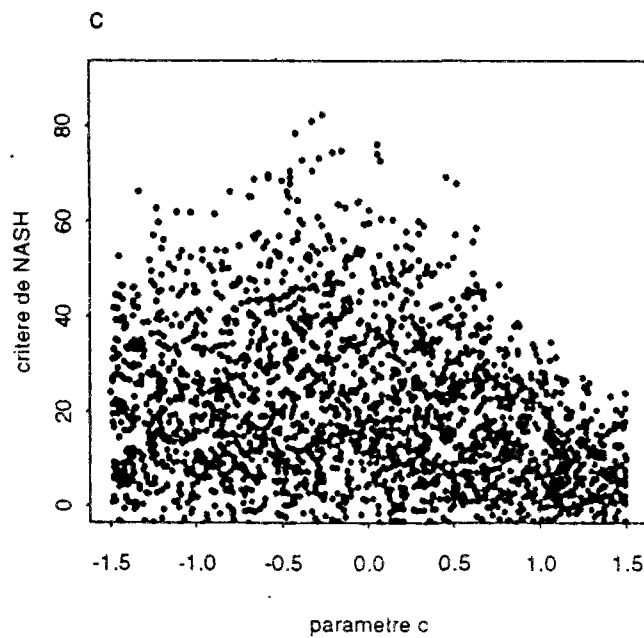
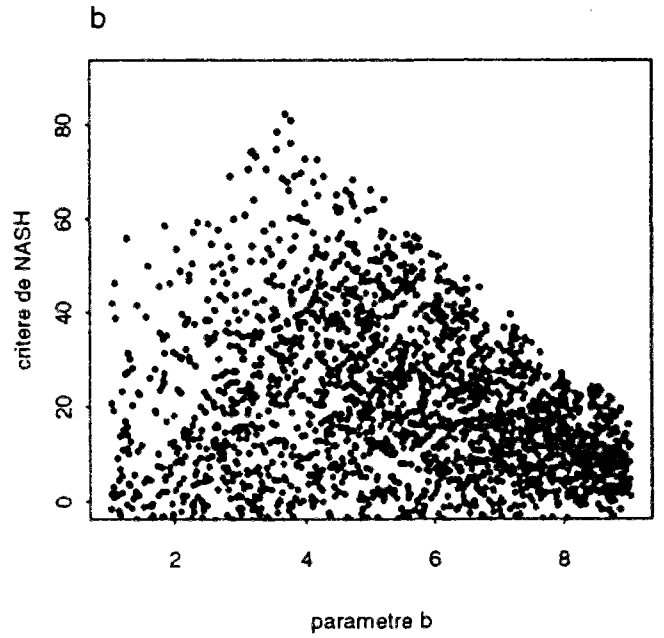
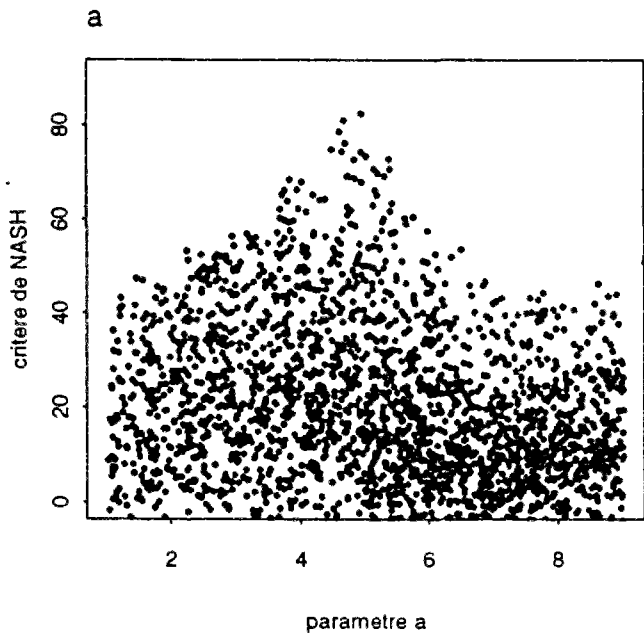
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1984-1986)



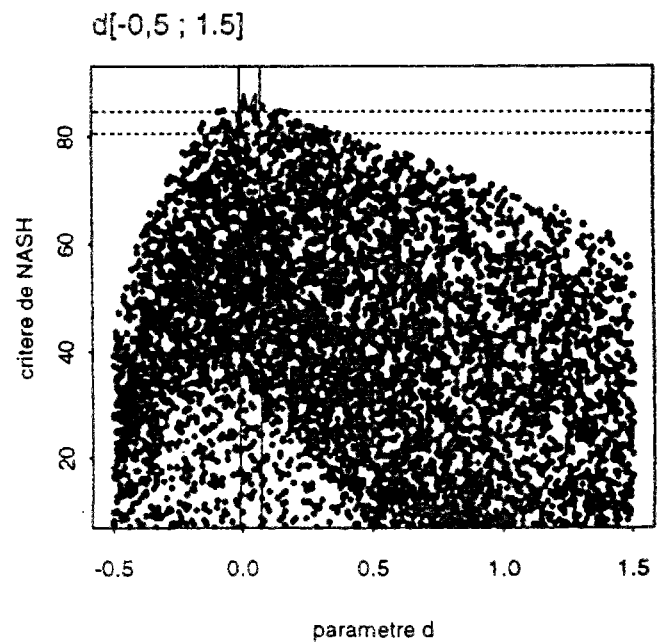
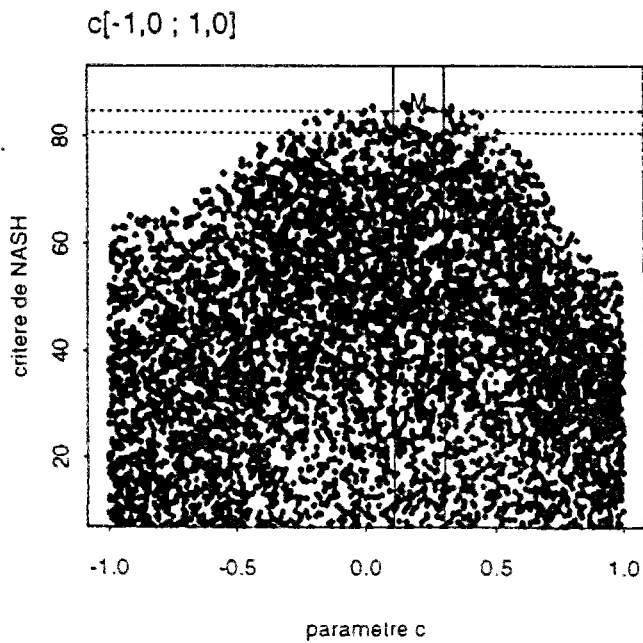
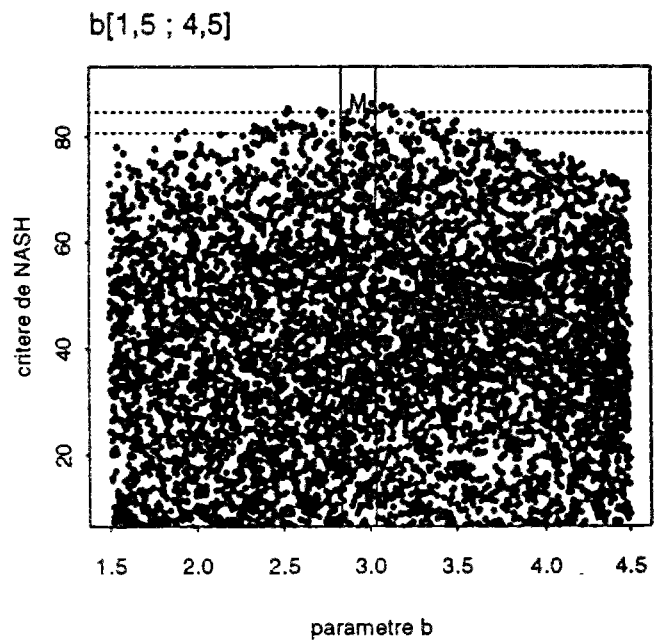
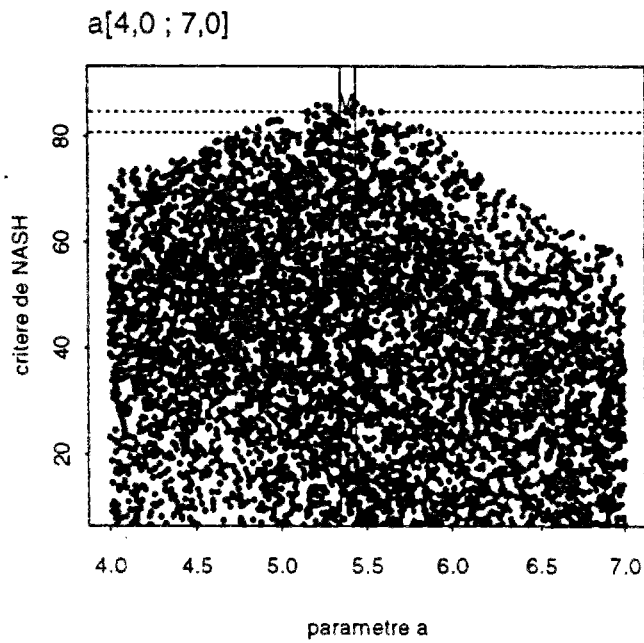
Annexe 5.1 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1987-1989)



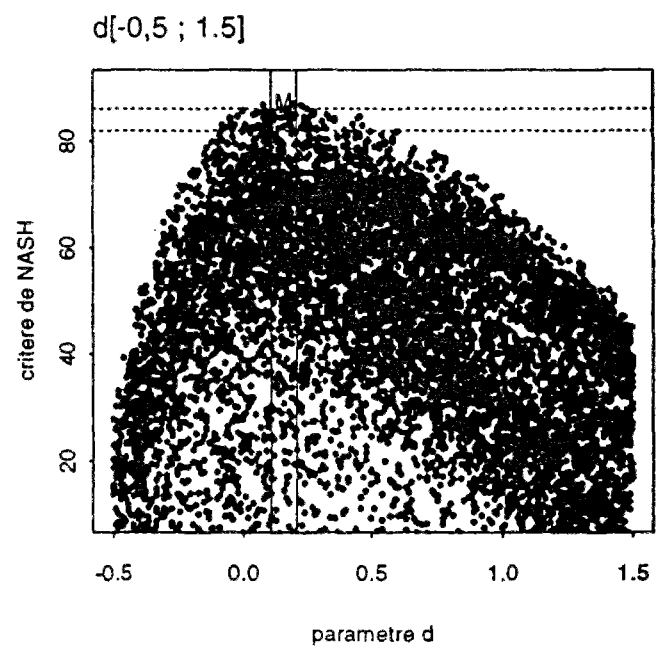
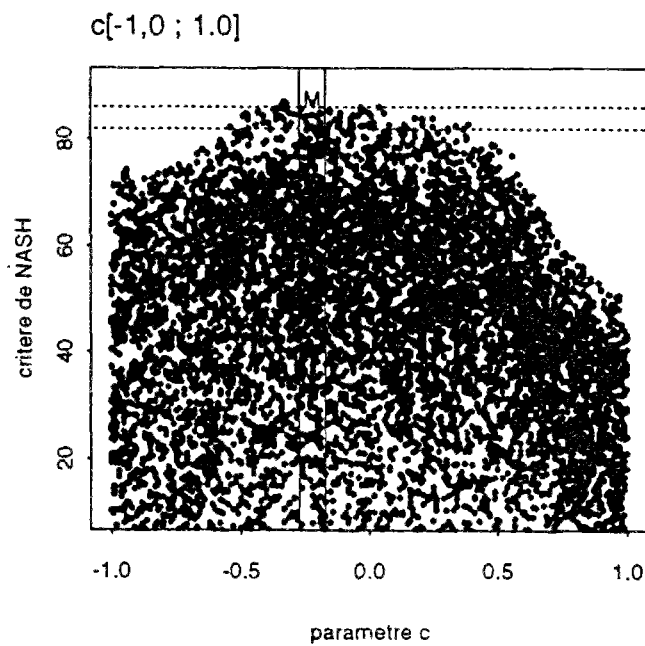
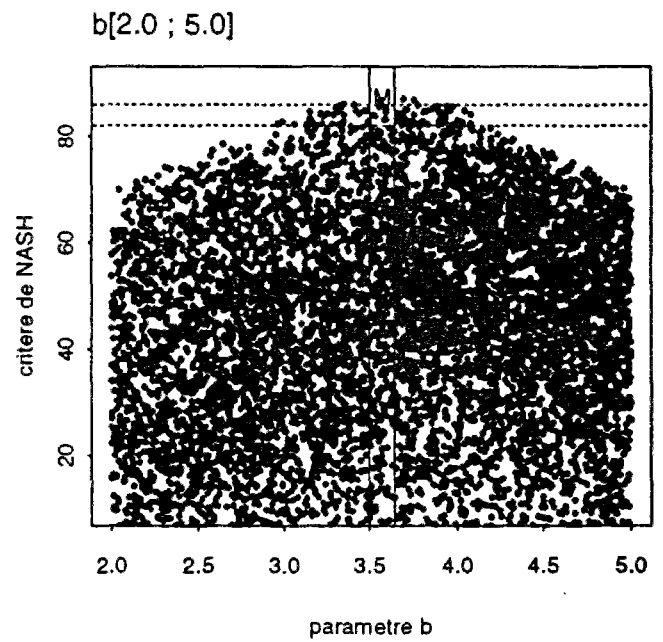
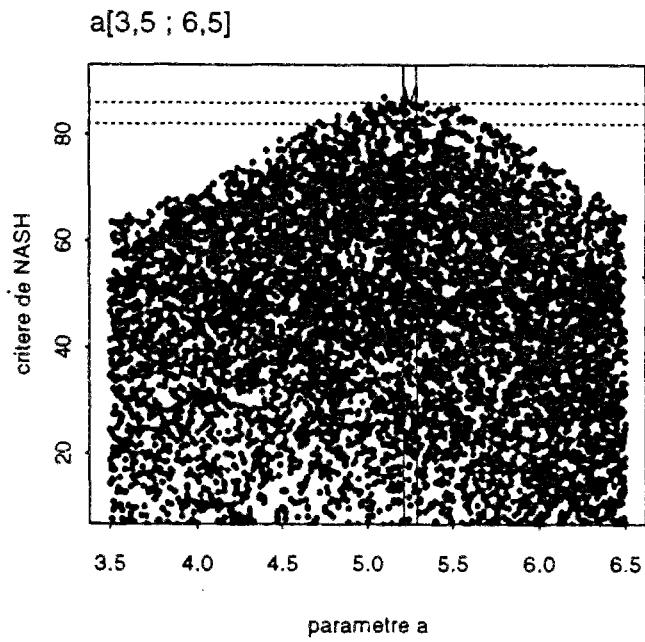
Annexe 5.2 - La méthode URS appliquée dans le calage de GR4J une analyse détaillée

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1963-1965)



Annexe 5.2 - suite

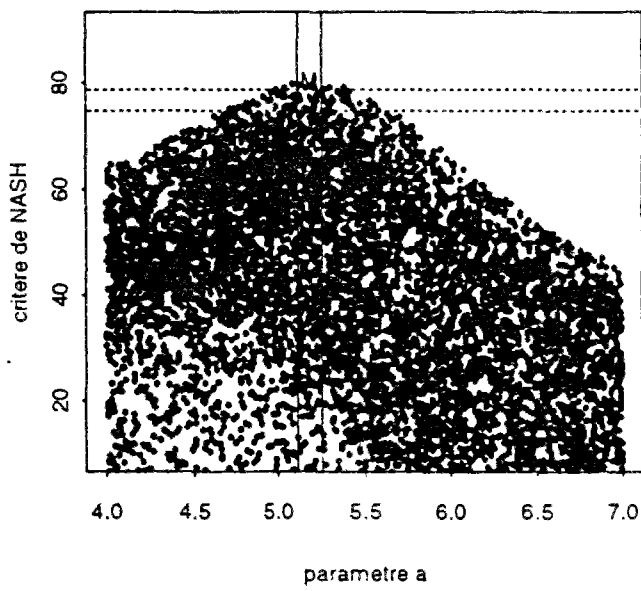
Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1966-1968)



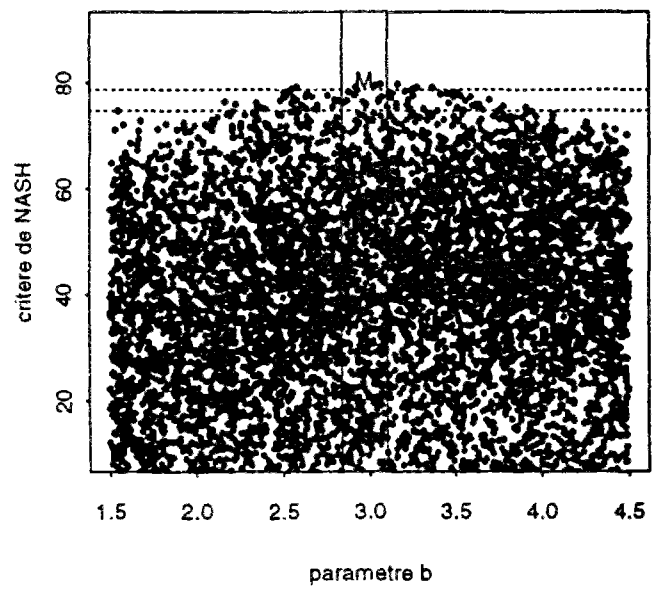
Annexe 5.2 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1969-1971)

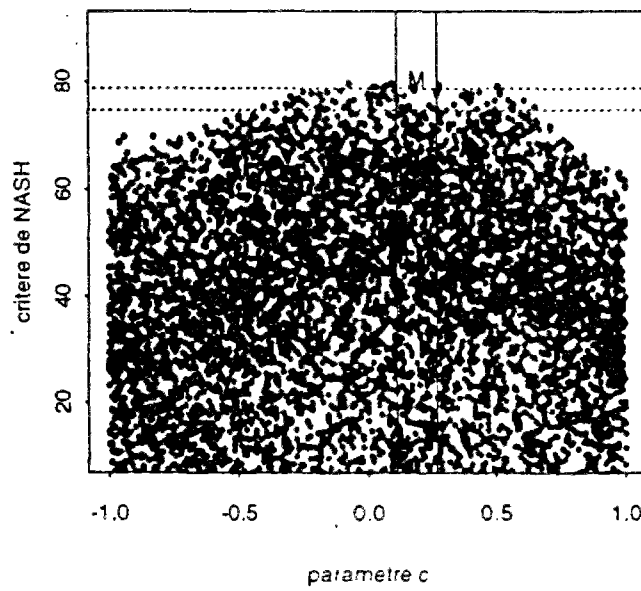
a[4,0 ; 7,0]



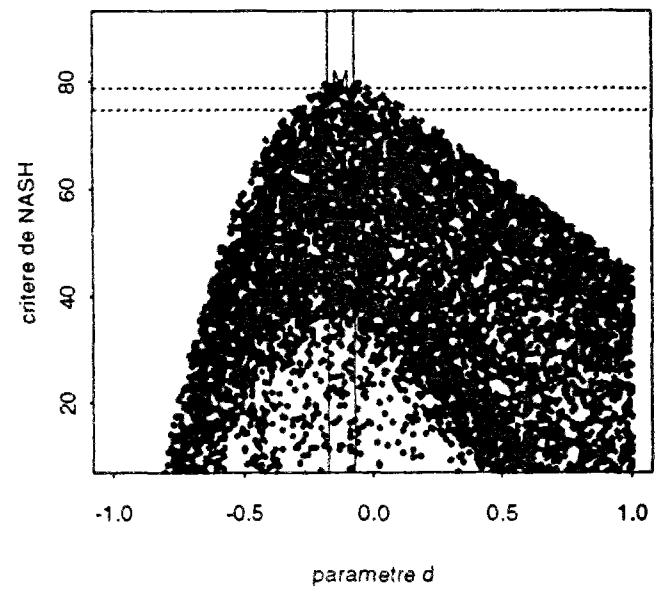
b[1,5 ; 4,5]



c[-1,0 ; 1,0]

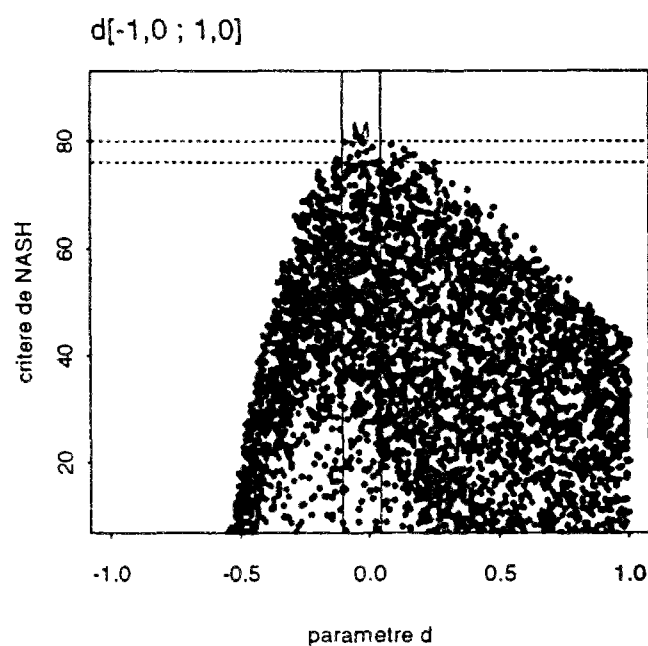
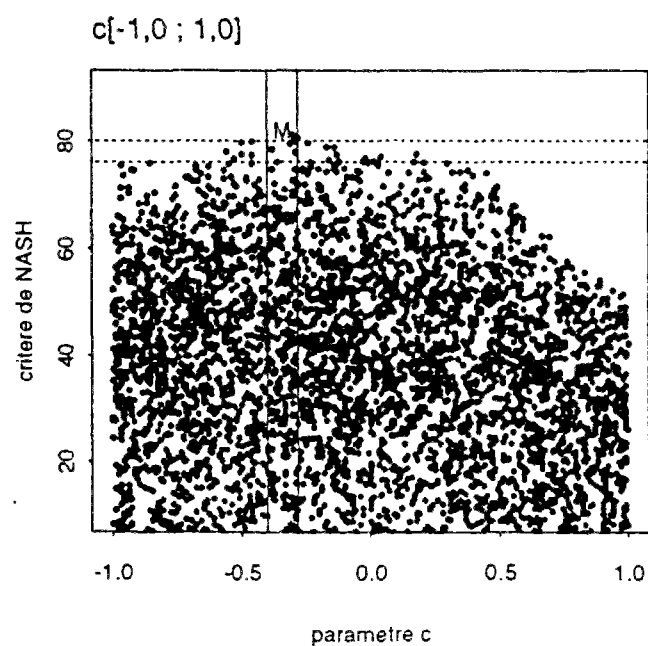
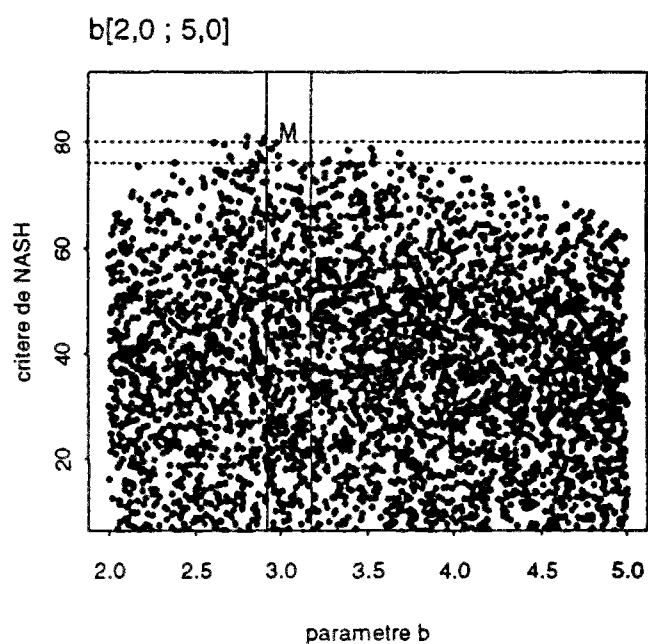
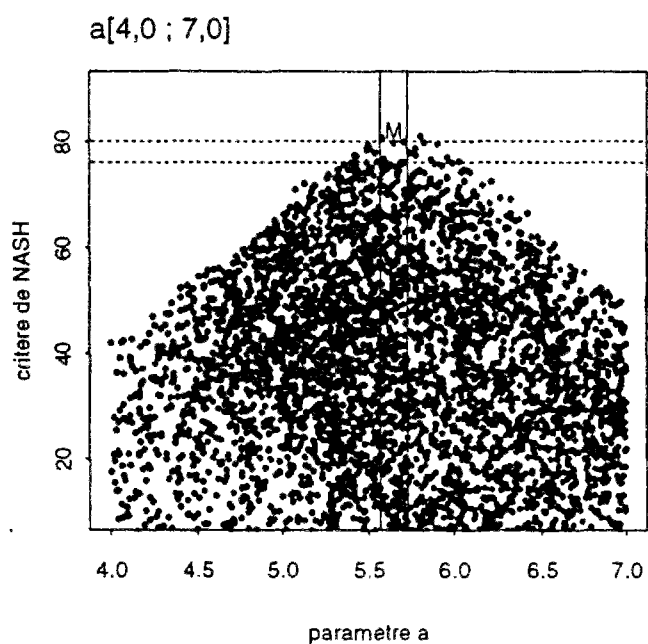


d[-1,0 ; 1,0]



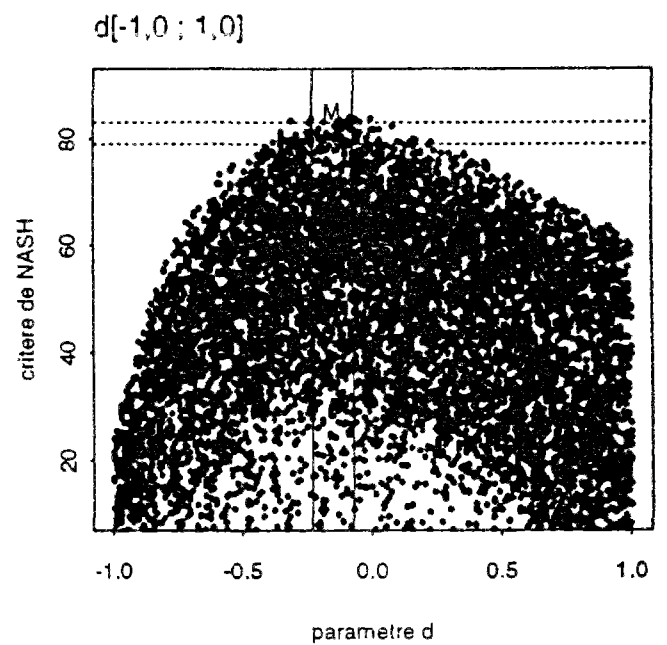
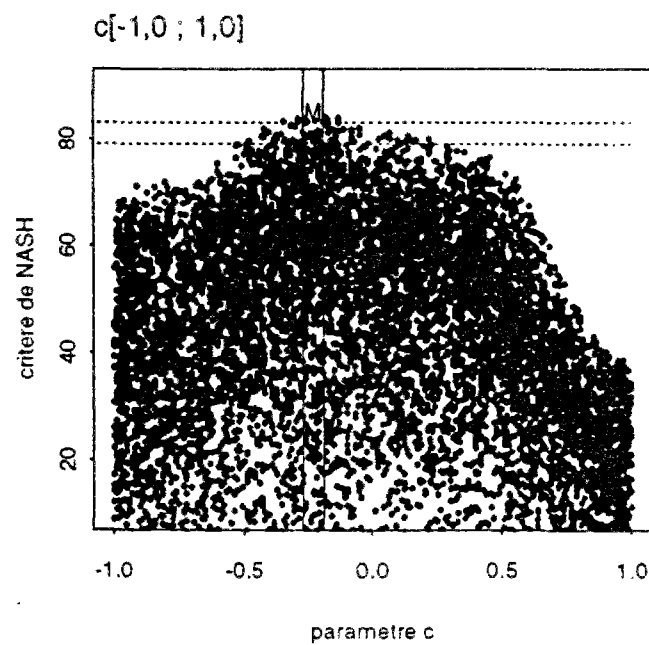
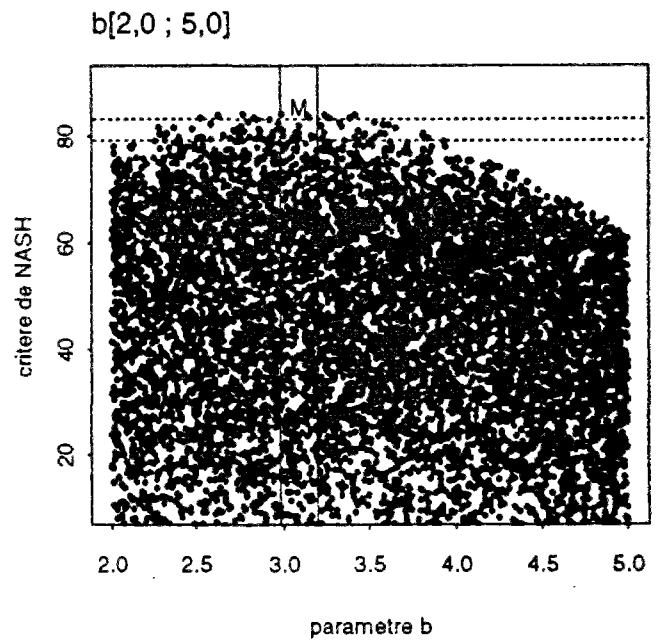
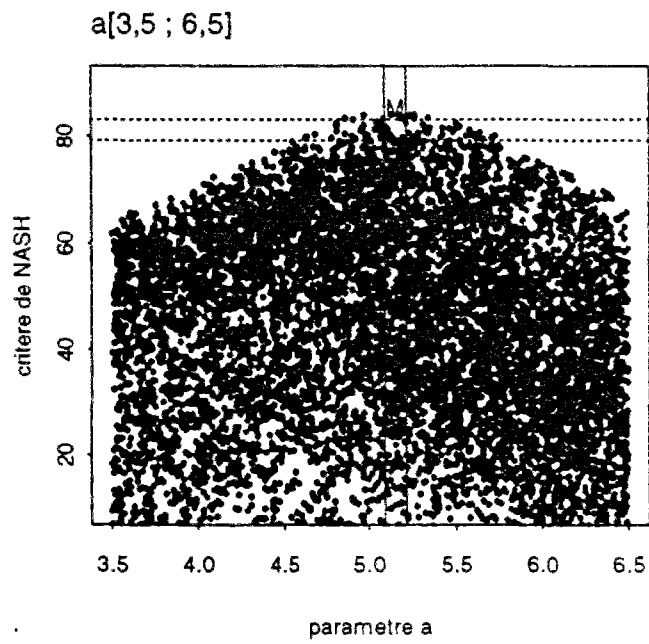
Annexe 5.2 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1972-1974)



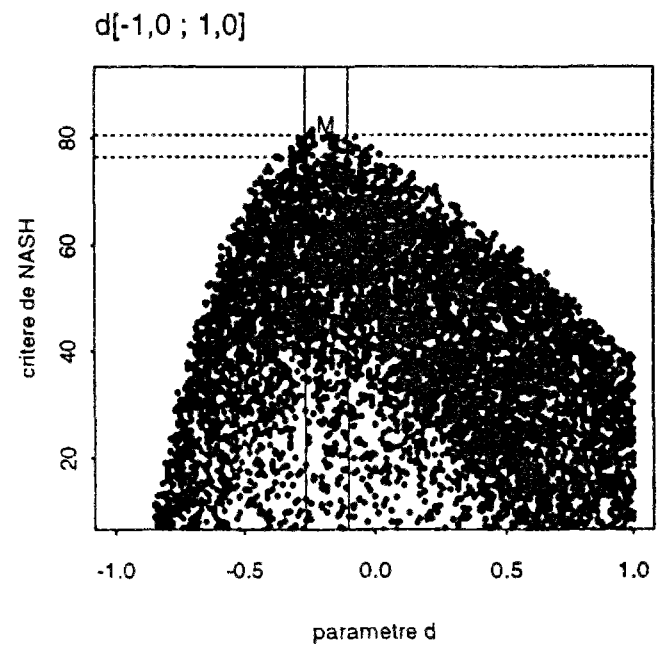
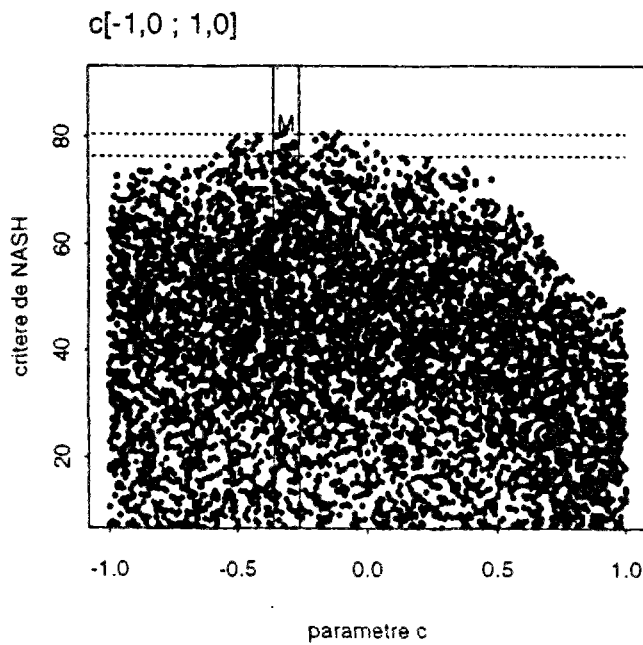
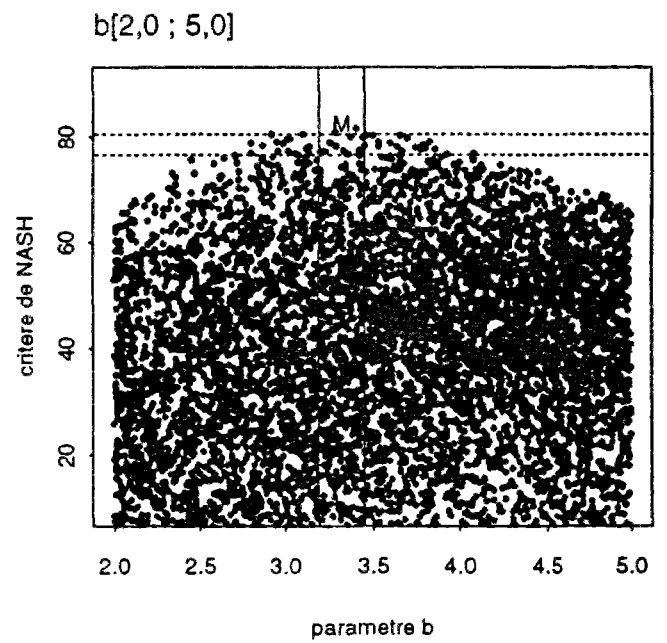
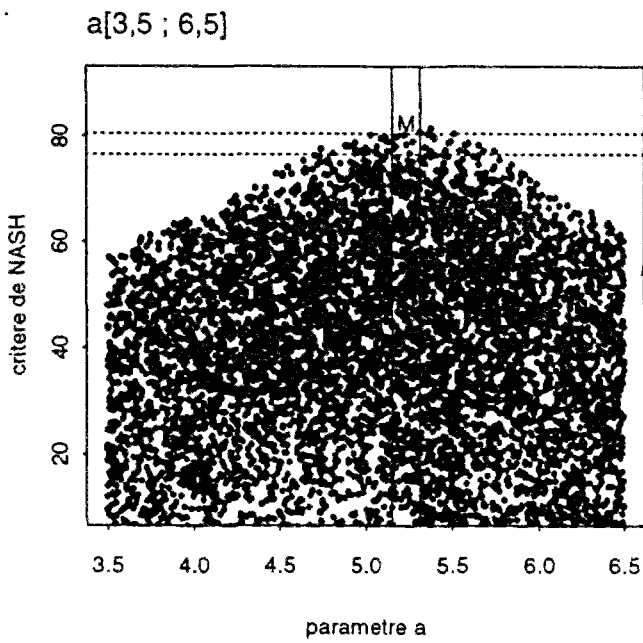
Annexe 5.2 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1978-1980)



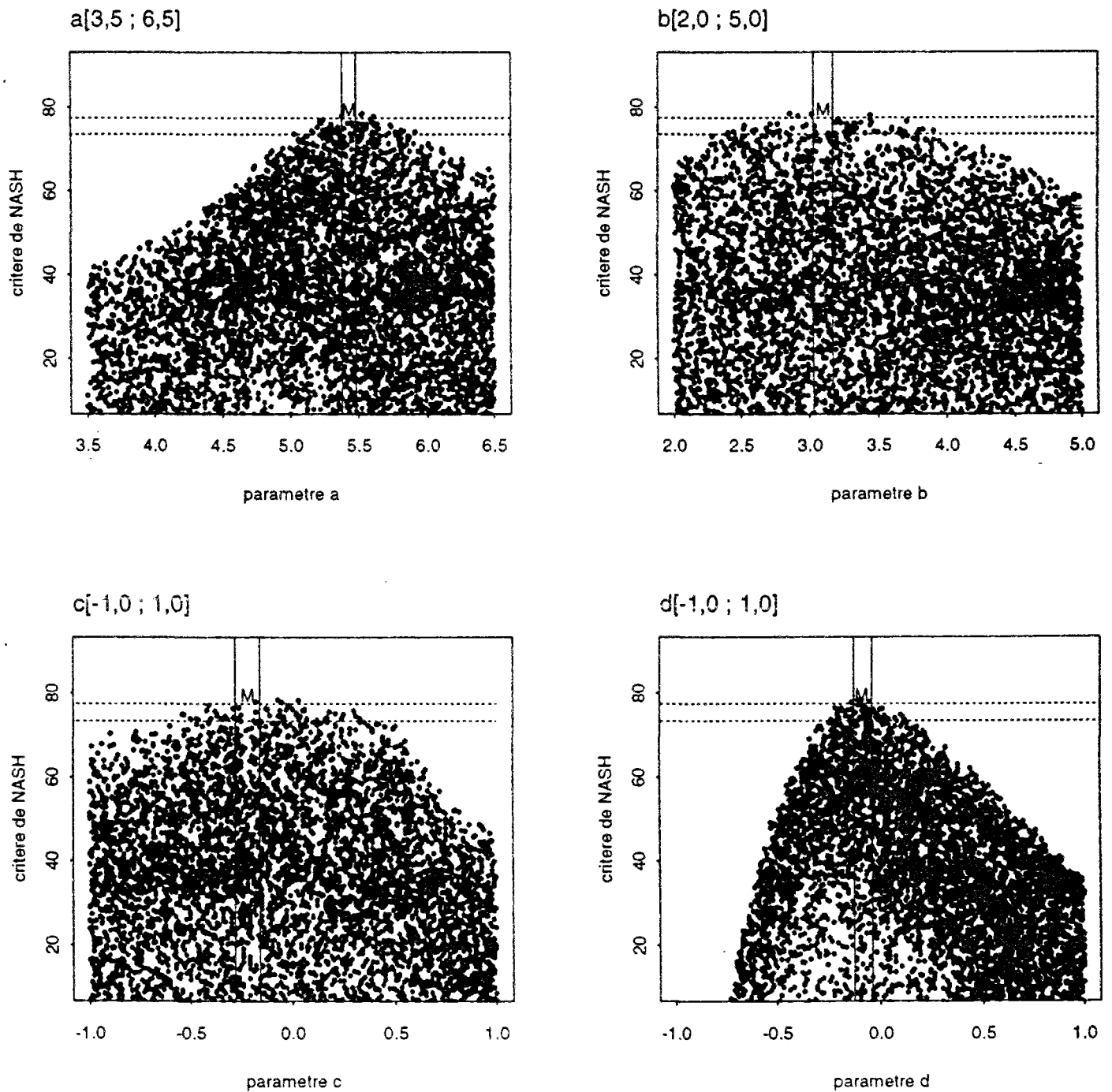
Annexe 5.2 - suite

Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1981-1983)

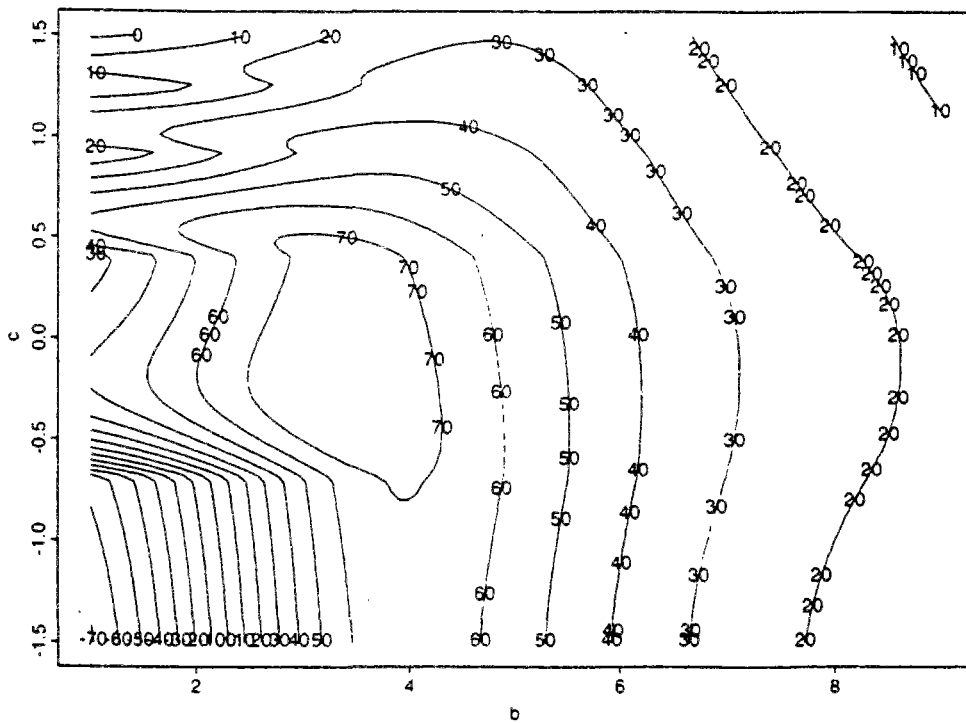
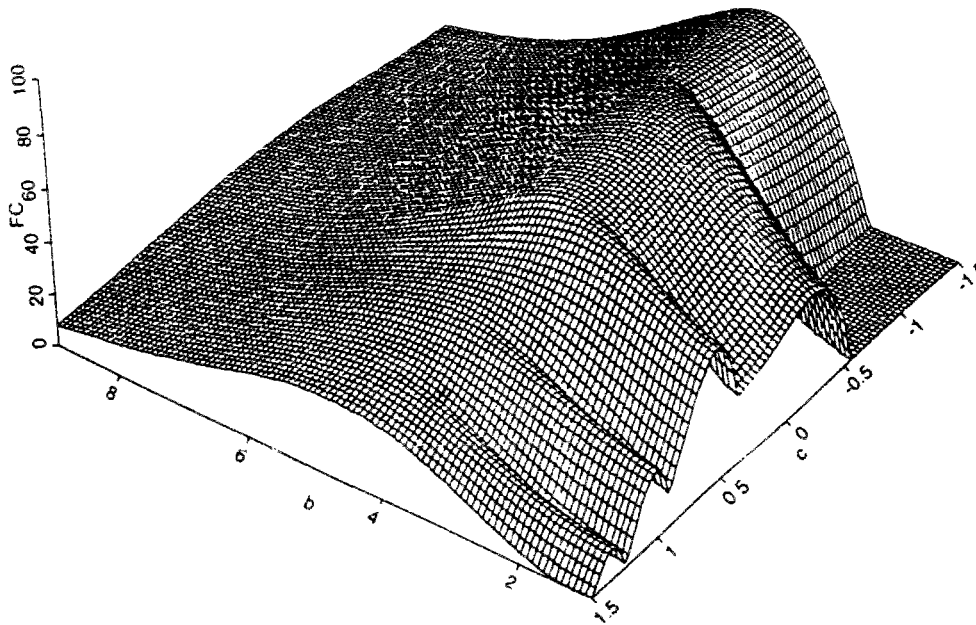


Annexe 5.2 - suite

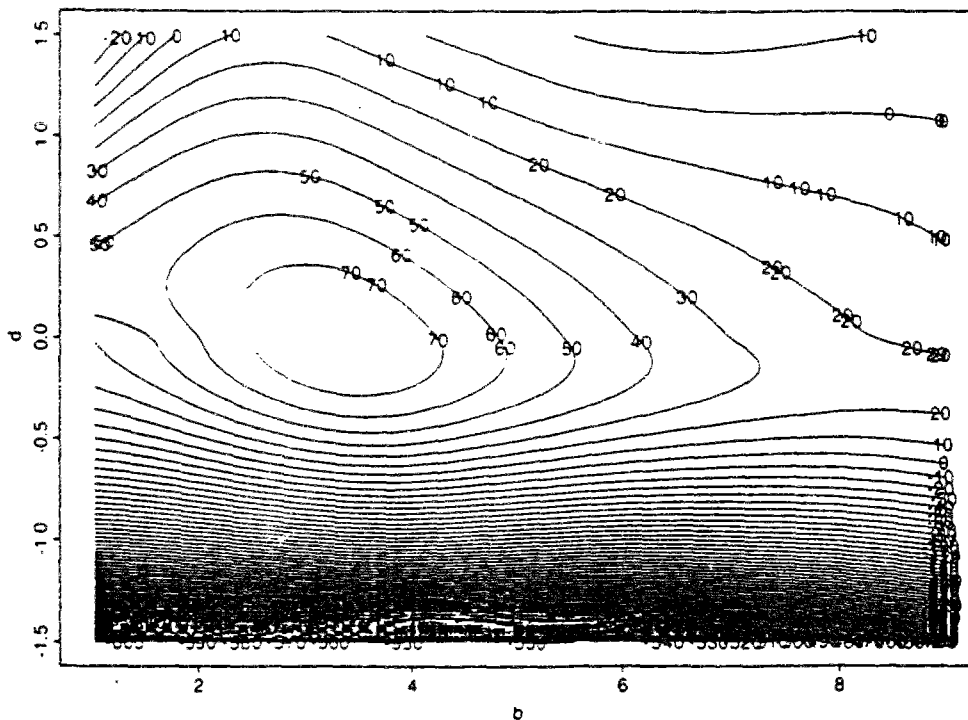
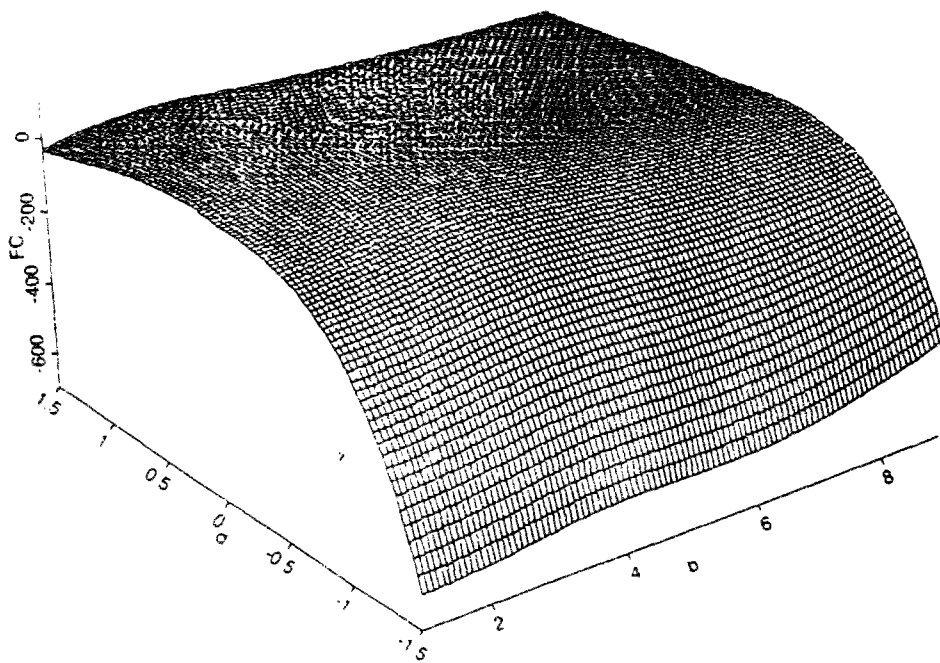
Bassin Versant de l'Orgeval - URS (1984-1986)



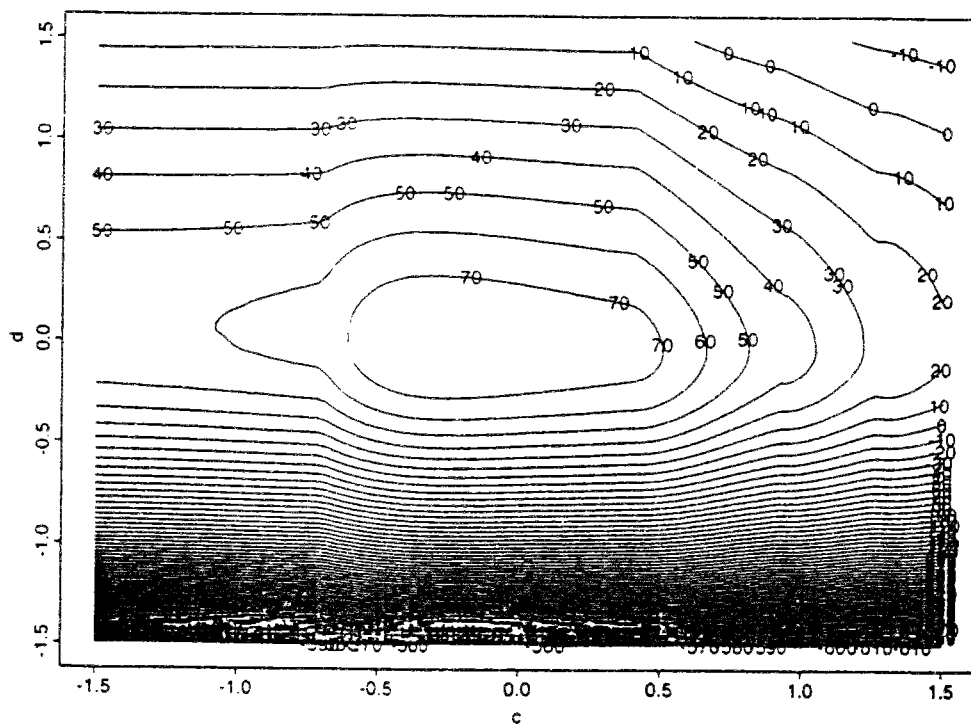
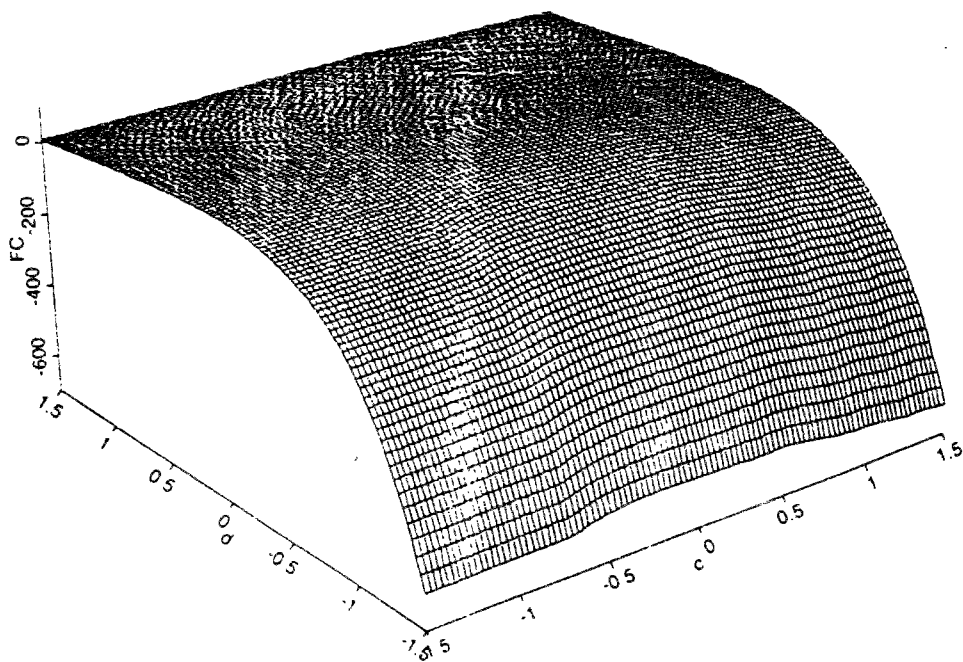
Annexe 5.3 - La méthode EG appliquée dans le calage de GR4J série 1963-1989



Annexe 5.3 - suite

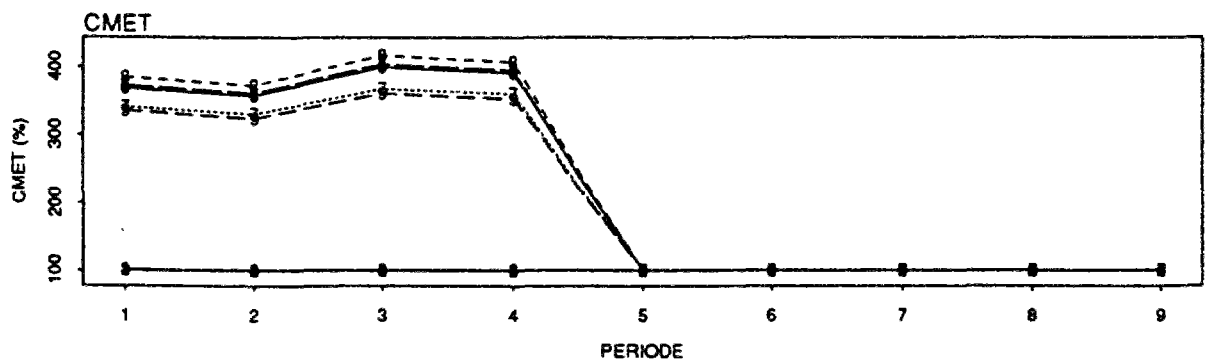
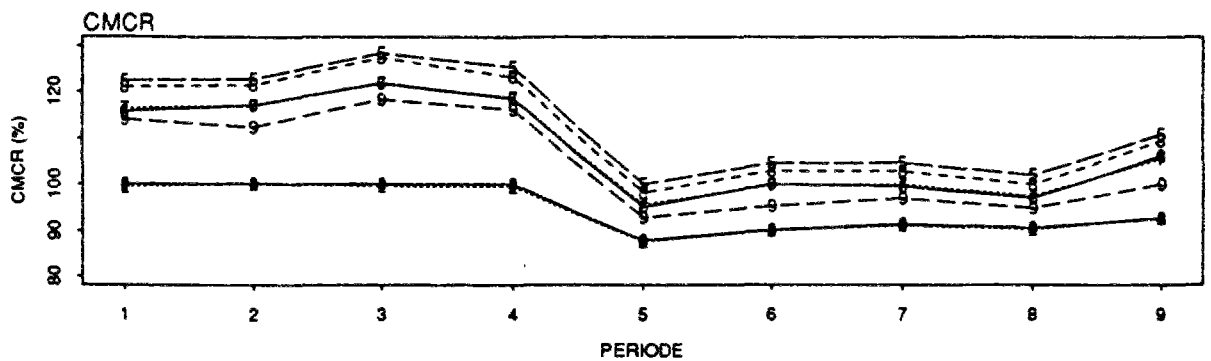
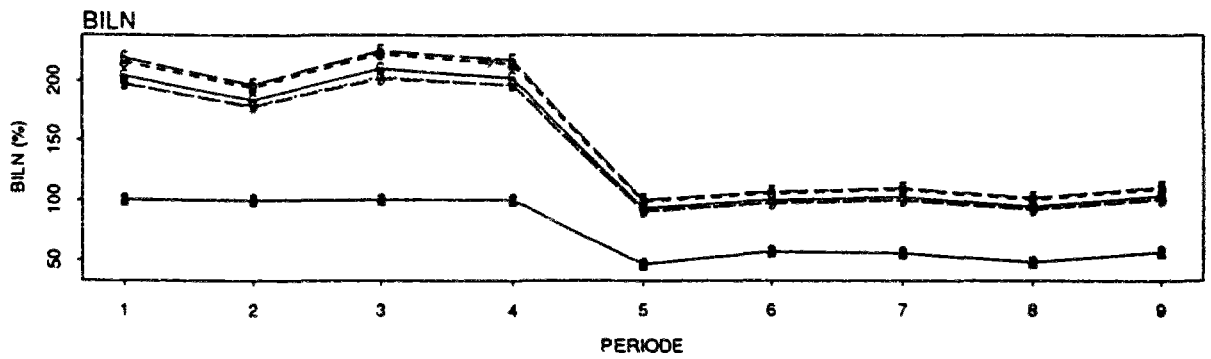
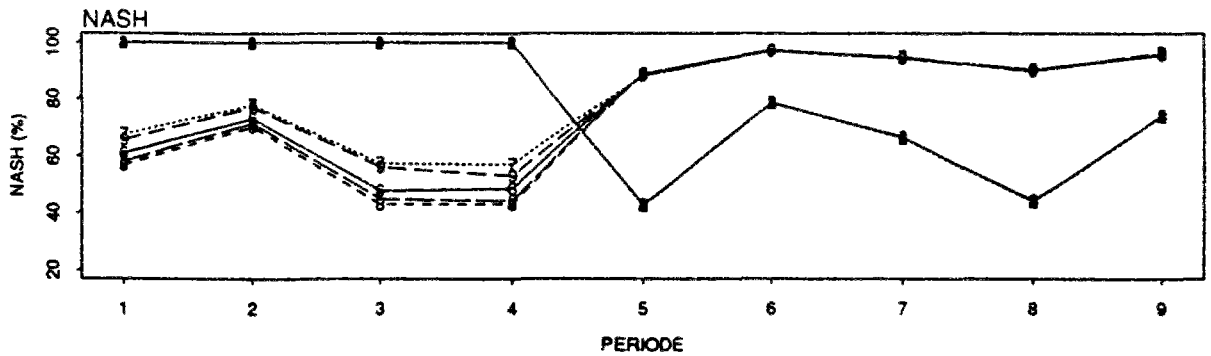


Annexe 5.3 - suite

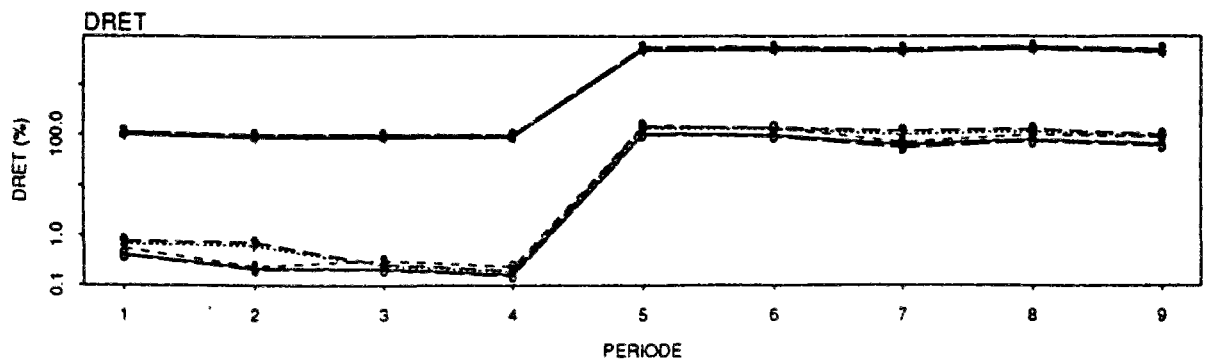
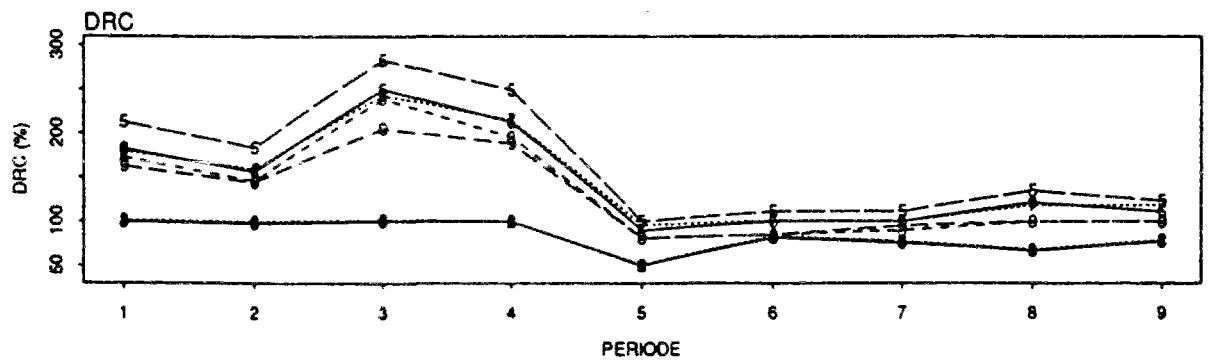
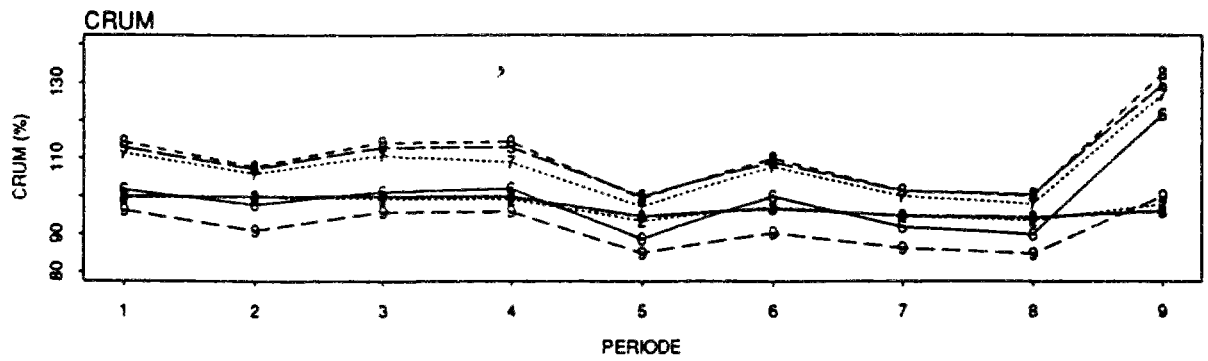
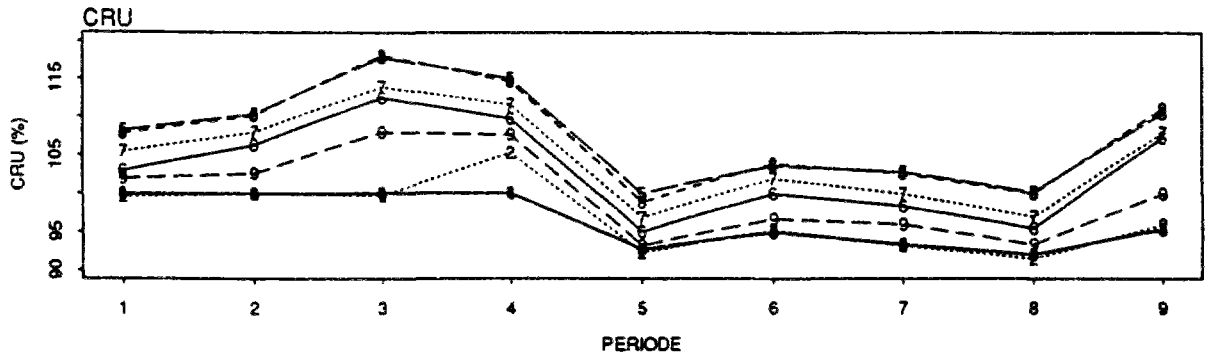


Annexes du Chapitre 6

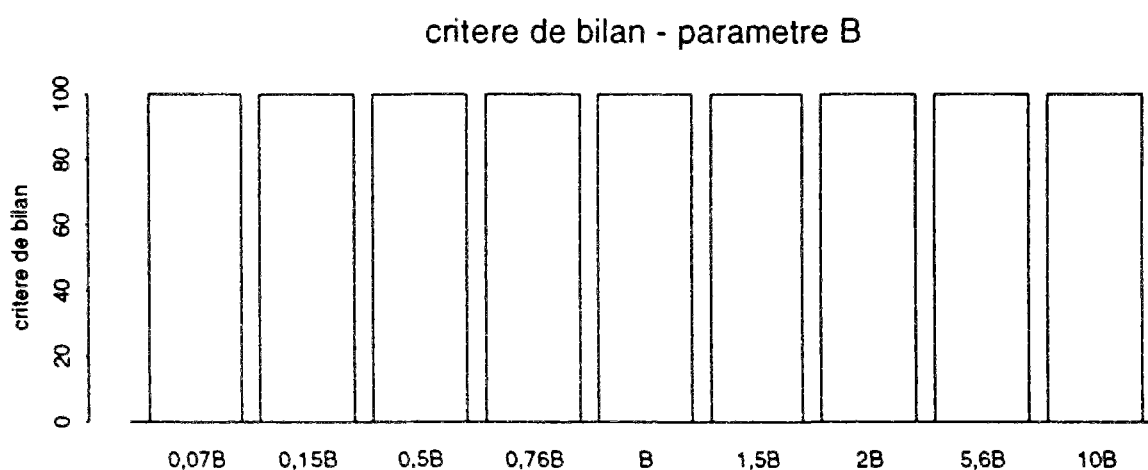
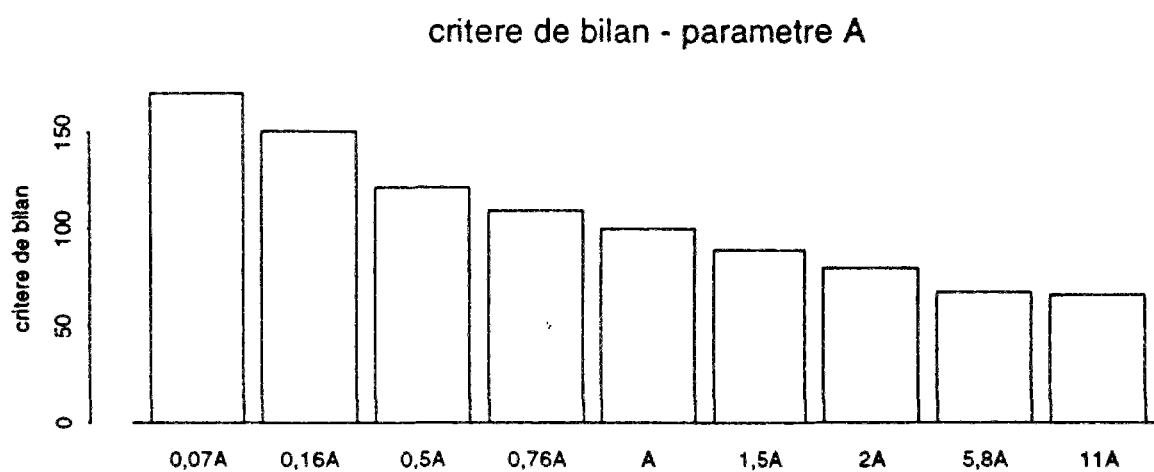
Annexe 6.1 - Evolution dans le temps des critères de qualité de GR4J pour des contrôles successifs (série synthétique [br.q1qm])



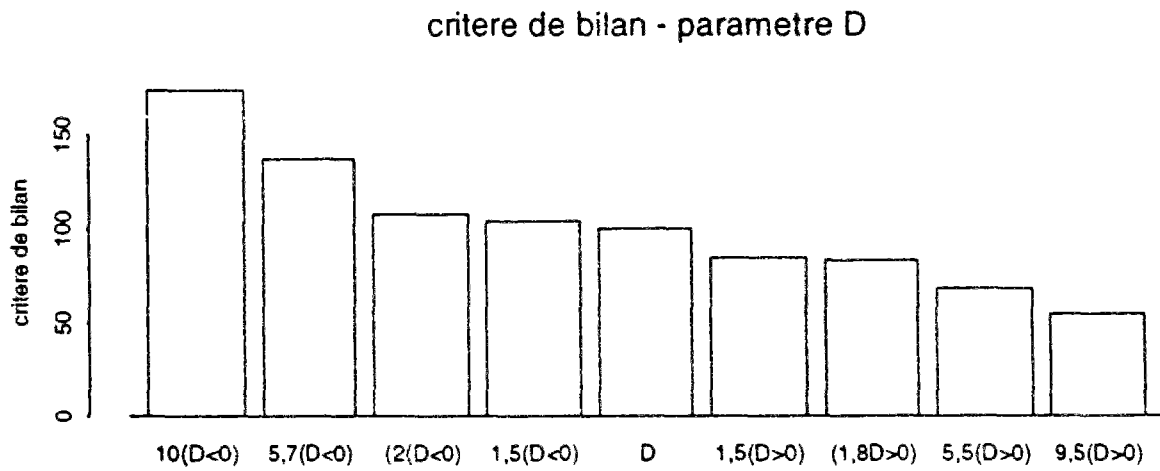
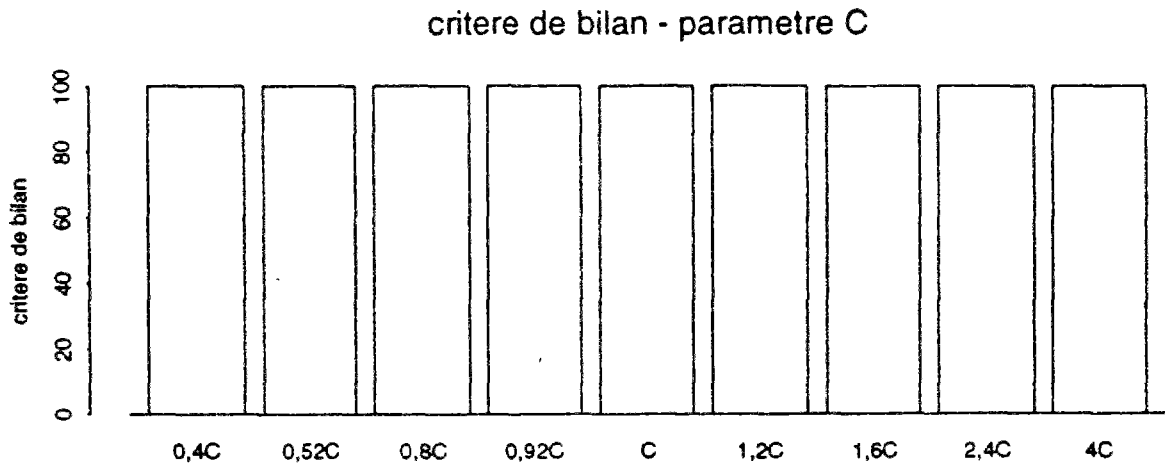
Annexe 6.1 - suite



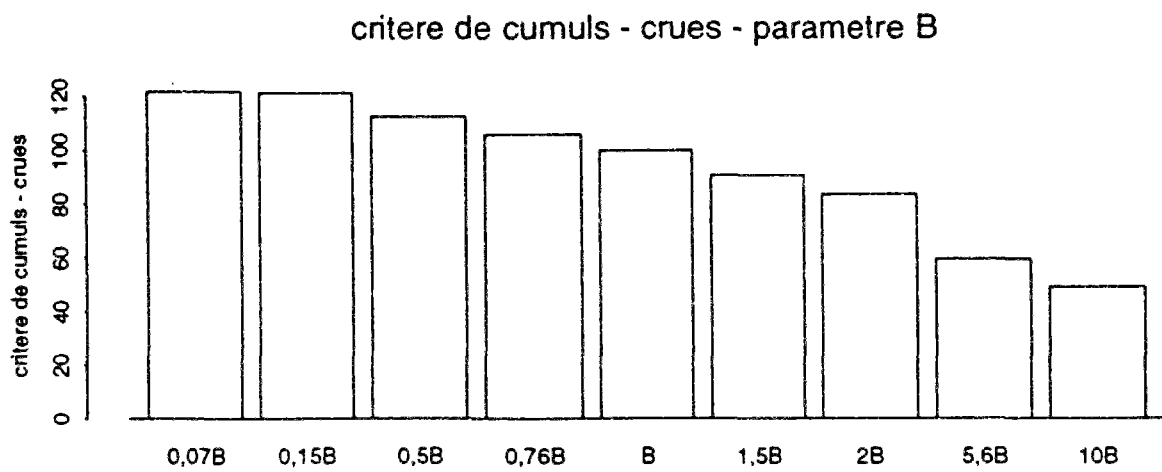
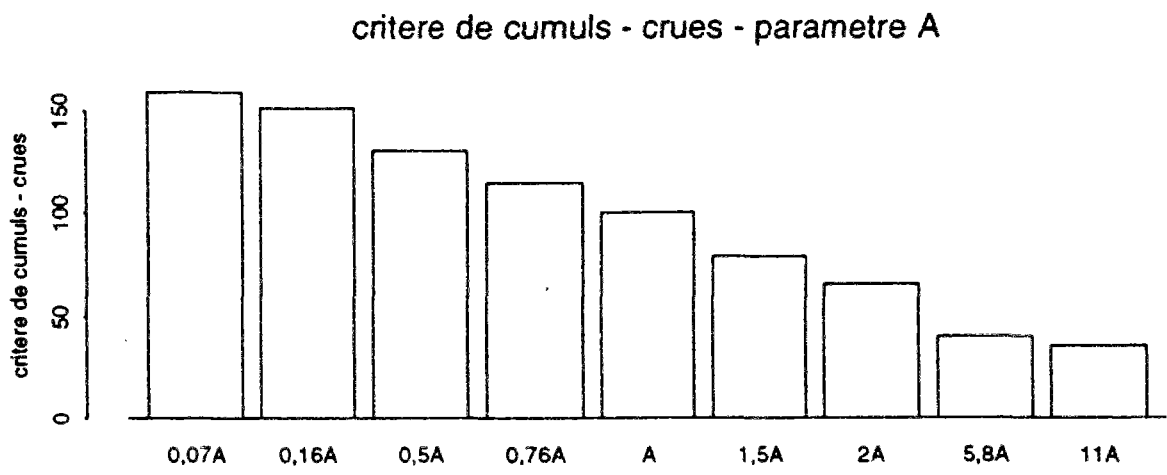
Annexe 6.2 - L'Evolution des variables hydrologiques comme résultat de l'évolution des paramètres du modèle GR4J



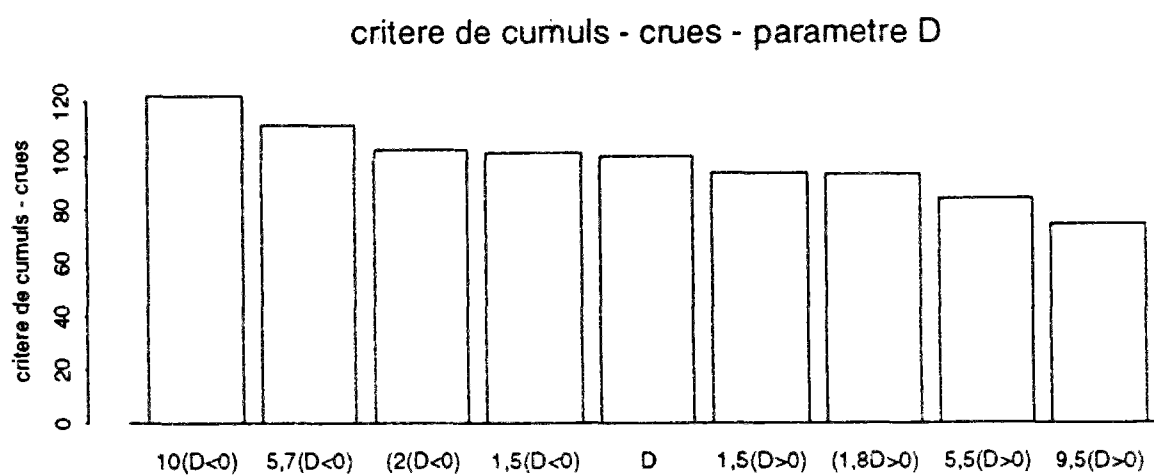
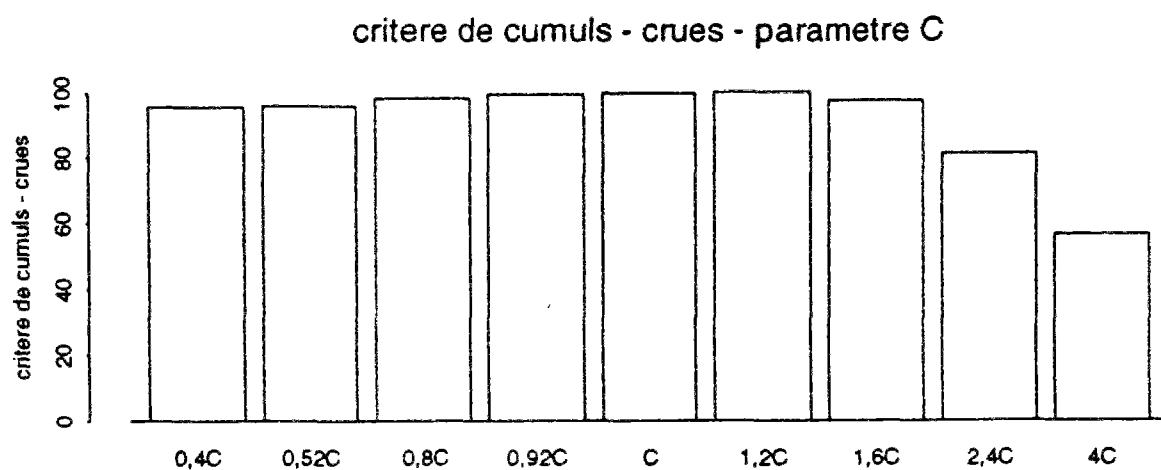
Annexe 6.2 - suite



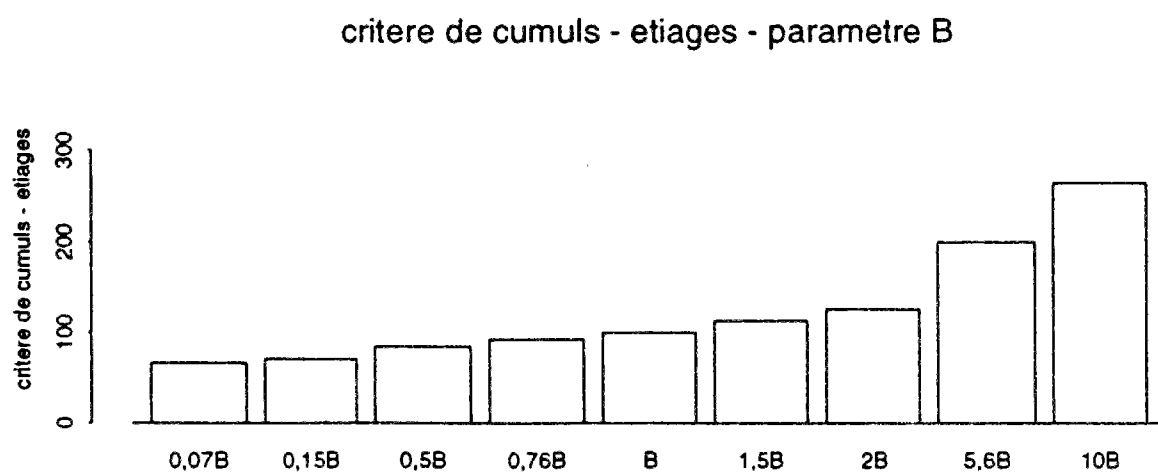
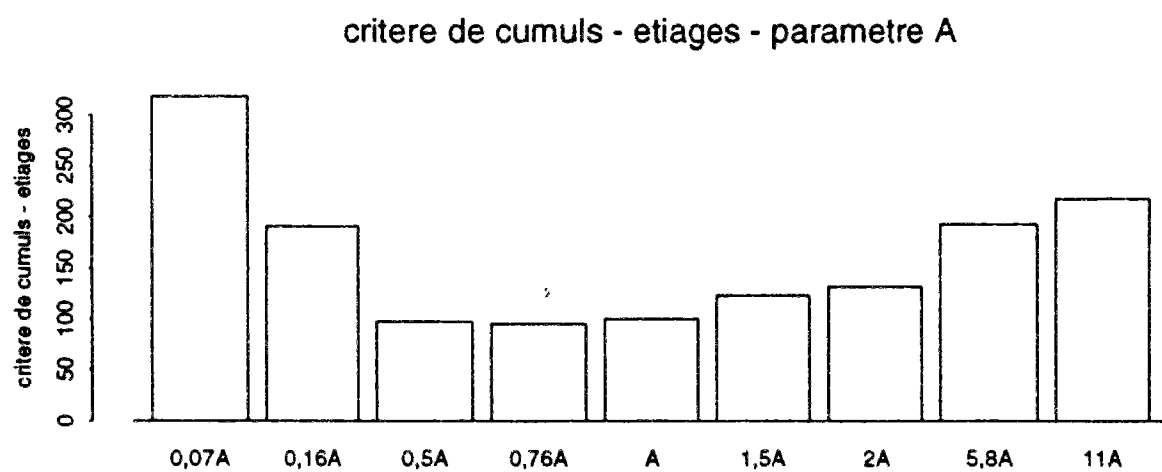
Annexe 6.2 - suite



Annexe 6.2 - suite

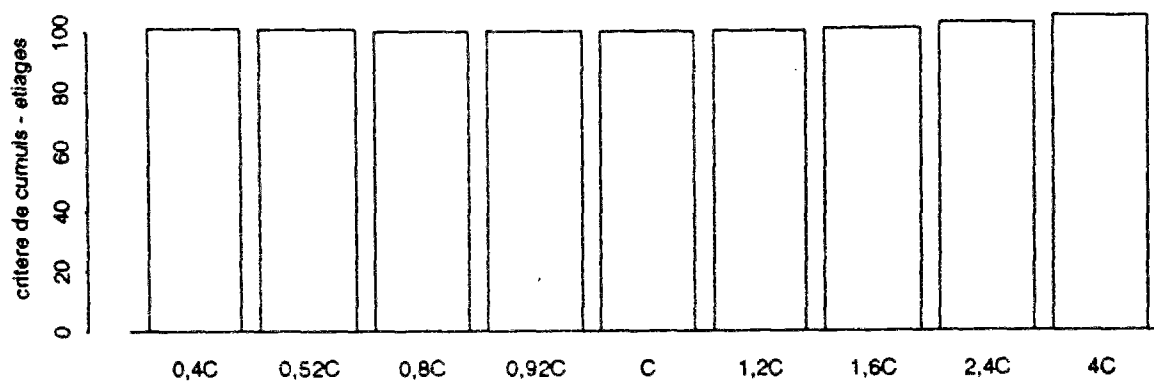


Annexe 6.2 - suite

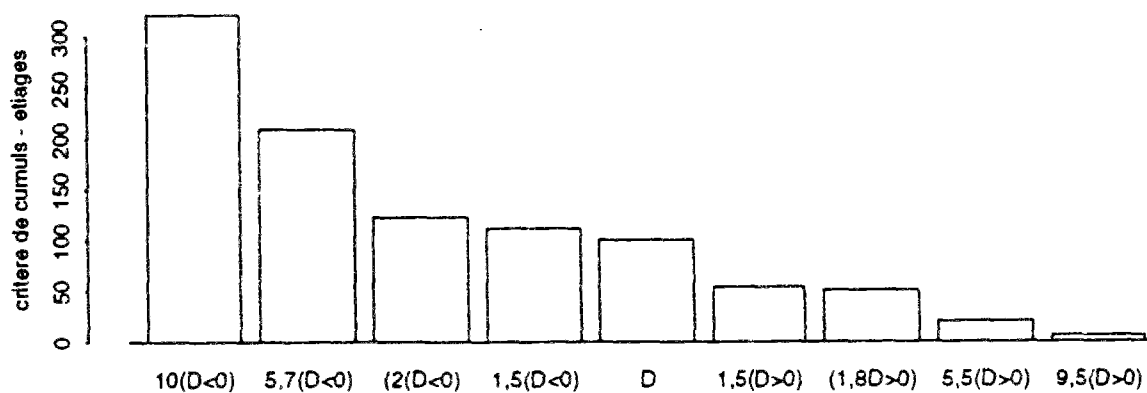


Annexe 6.2 - suite

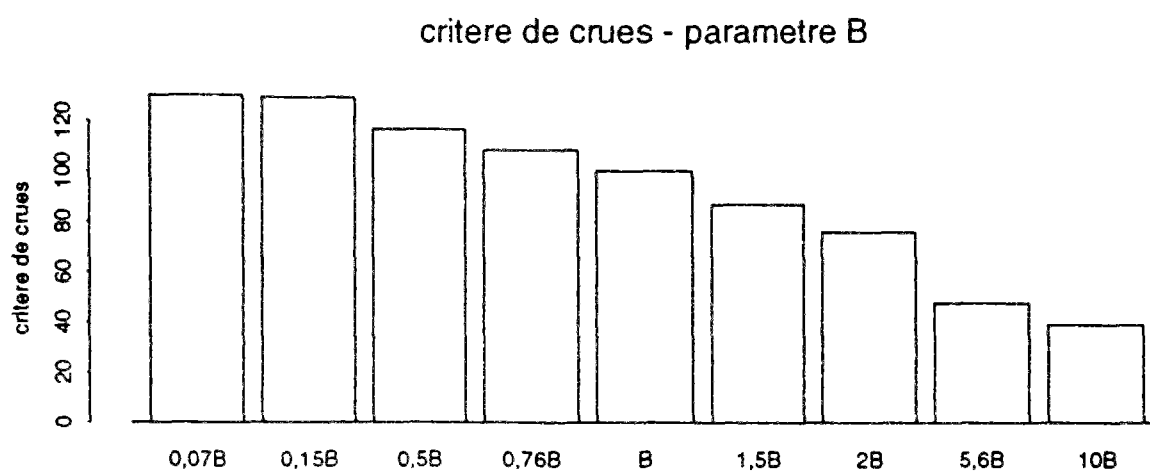
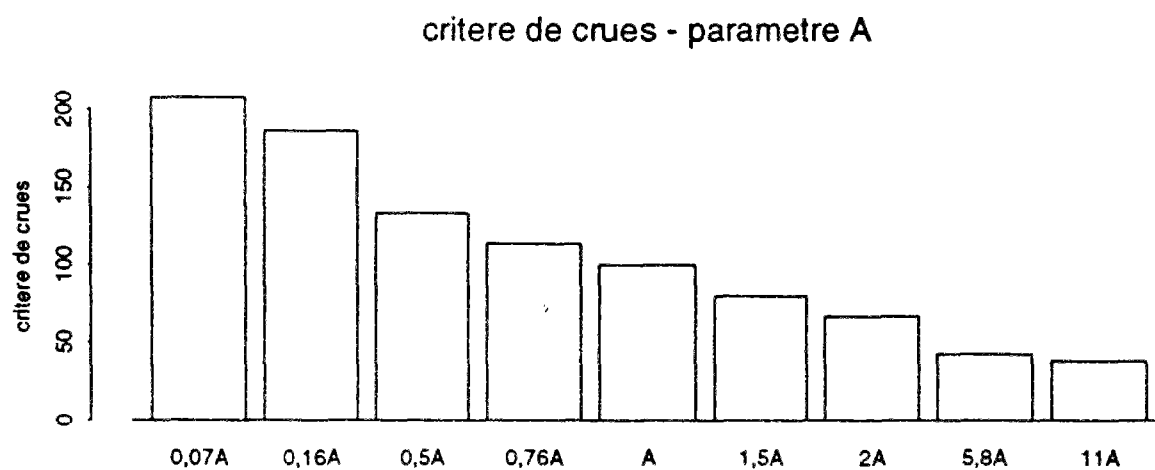
critere de cumuls - etriages - parametre C



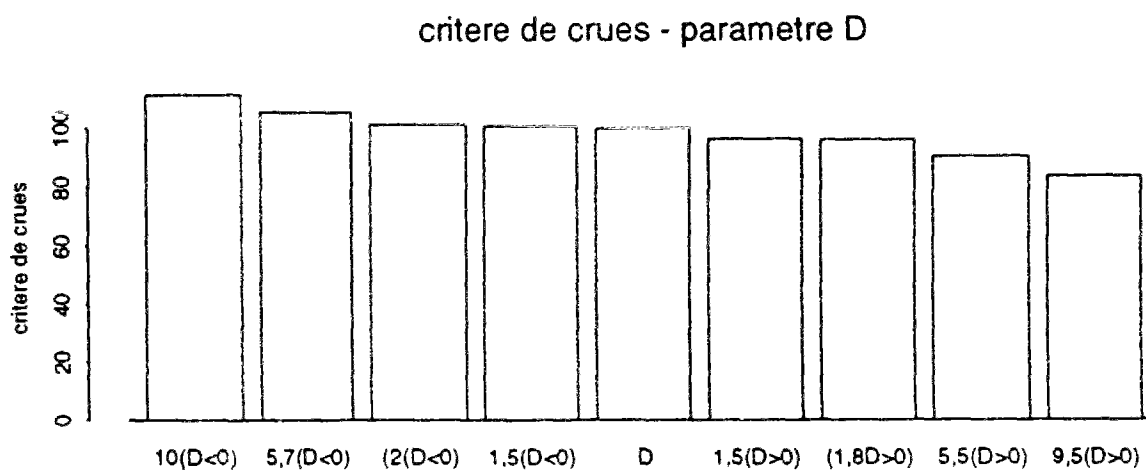
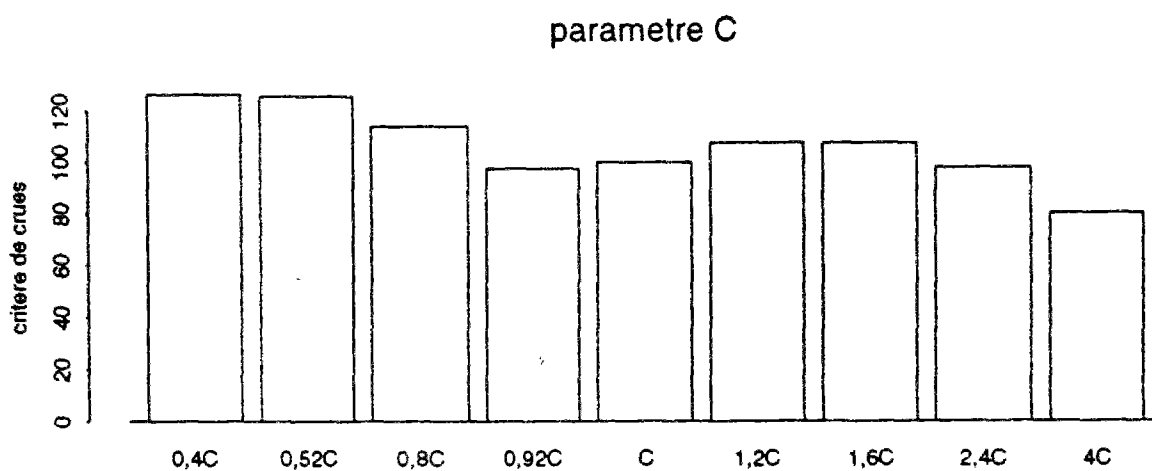
critere de cumuls - etriages - parametre D



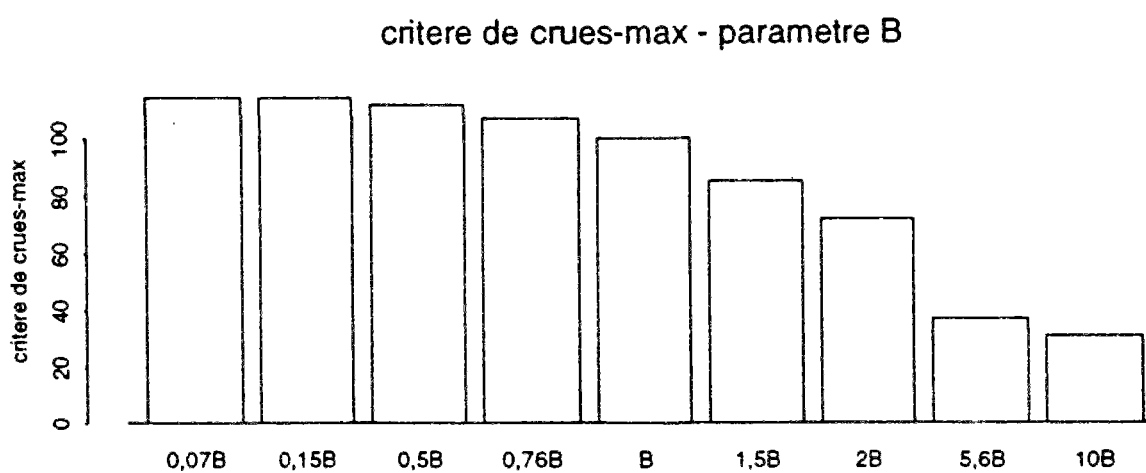
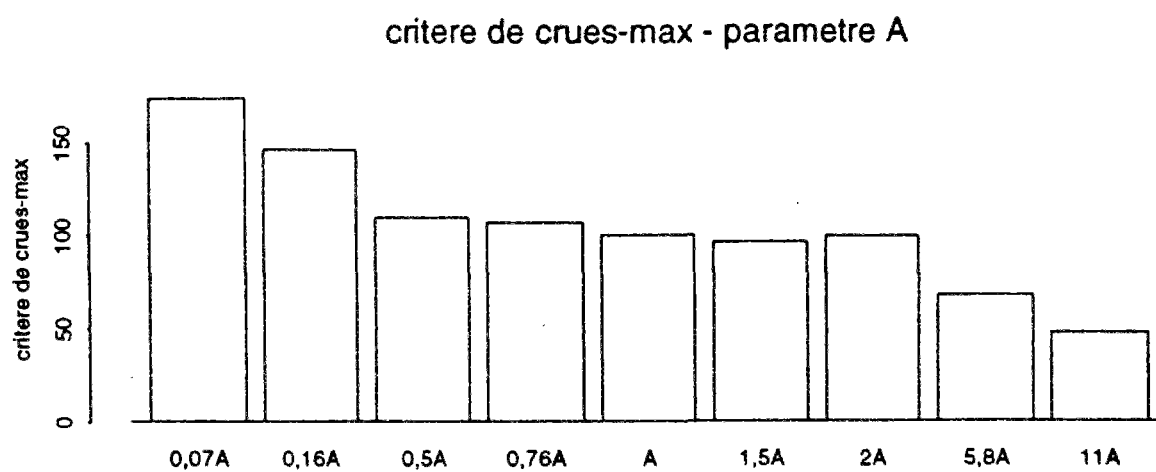
Annexe 6.2 - suite



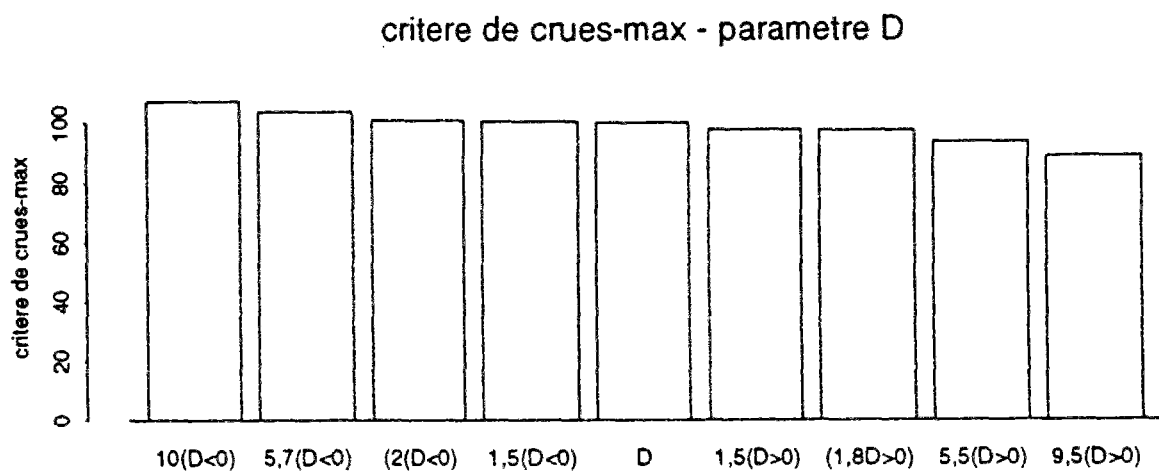
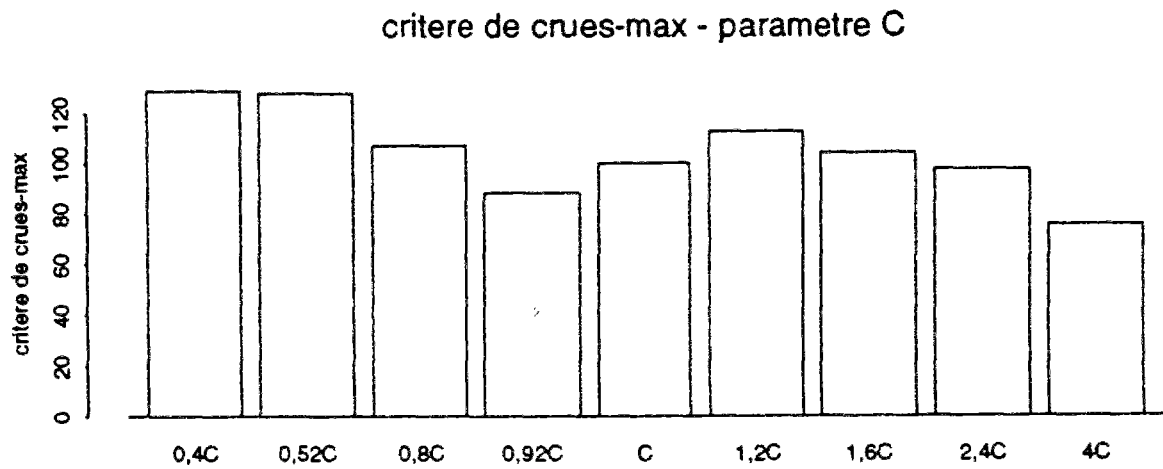
Annexe 6.2 - suite



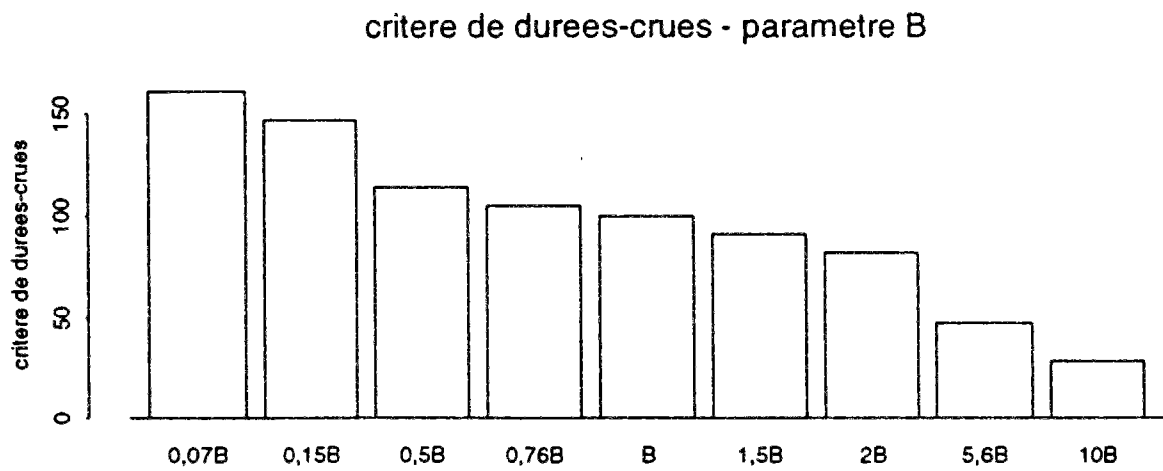
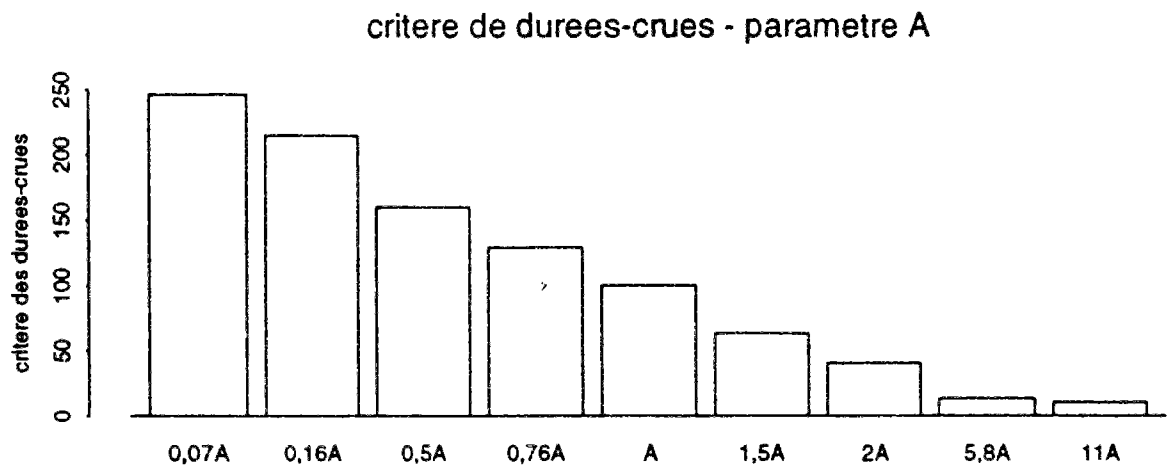
Annexe 6.2 - suite



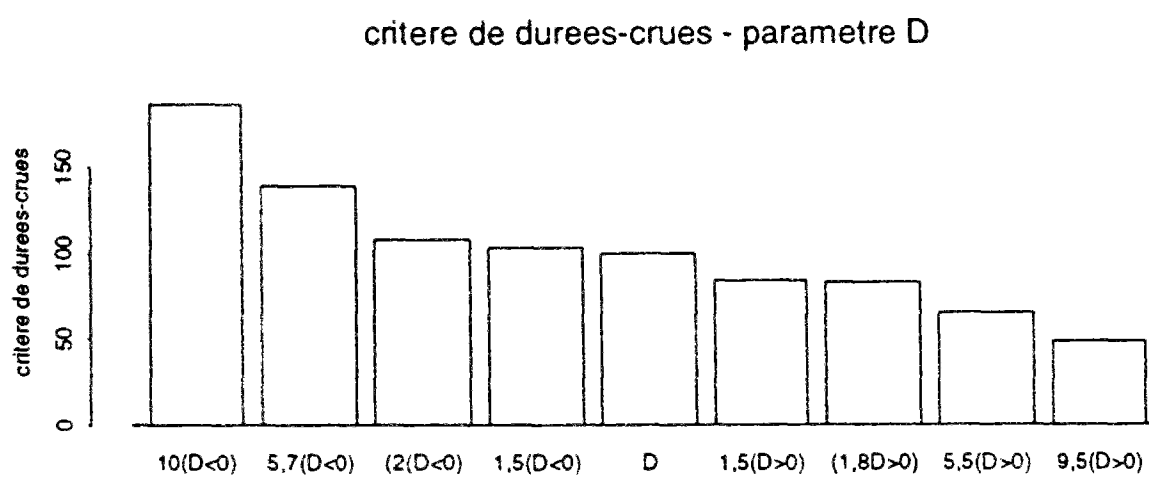
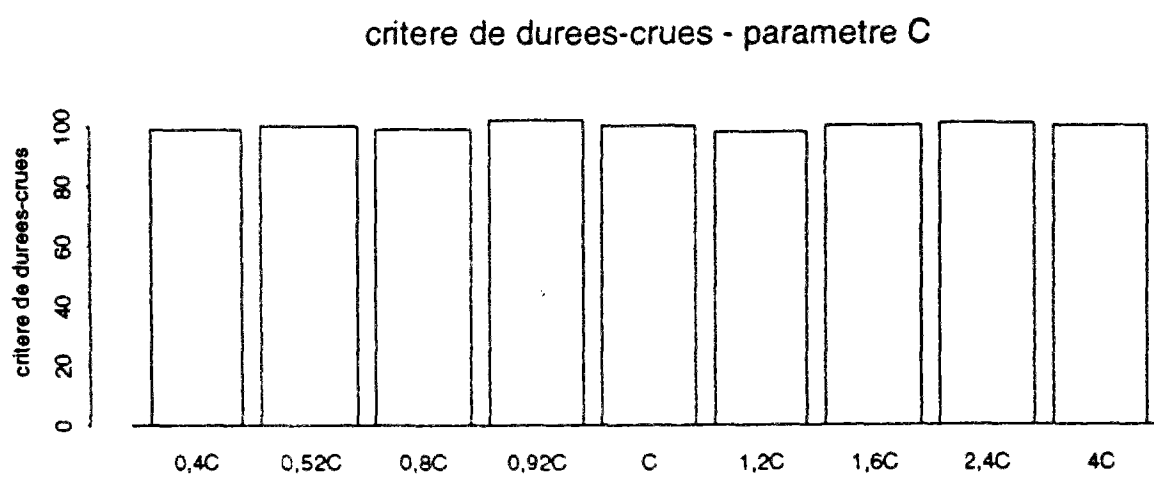
Annexe 6.2 - suite



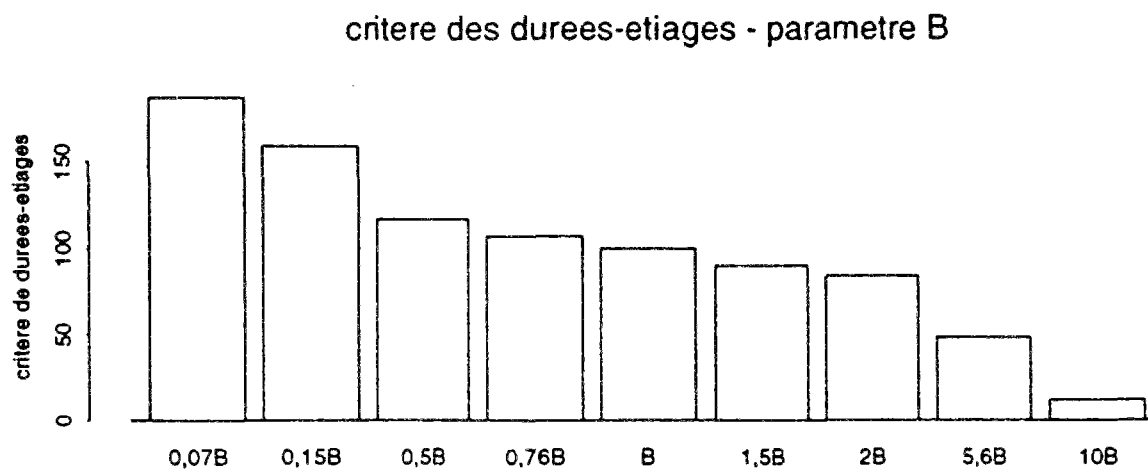
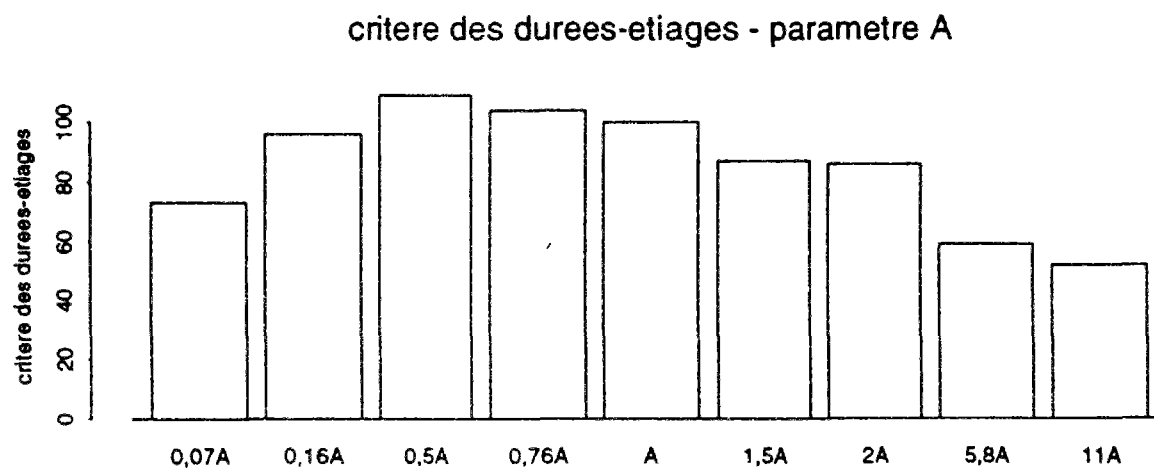
Annexe 6.2 - suite



Annexe 6.2 - suite

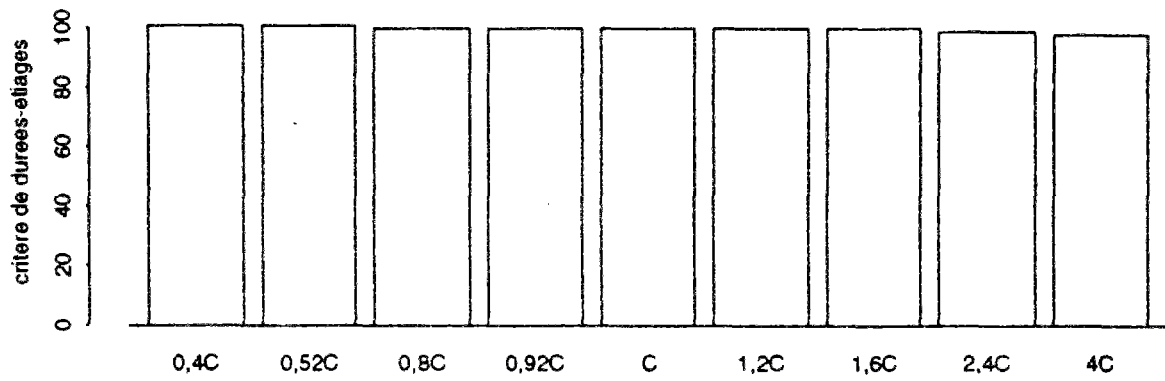


Annexe 6.2 - suite

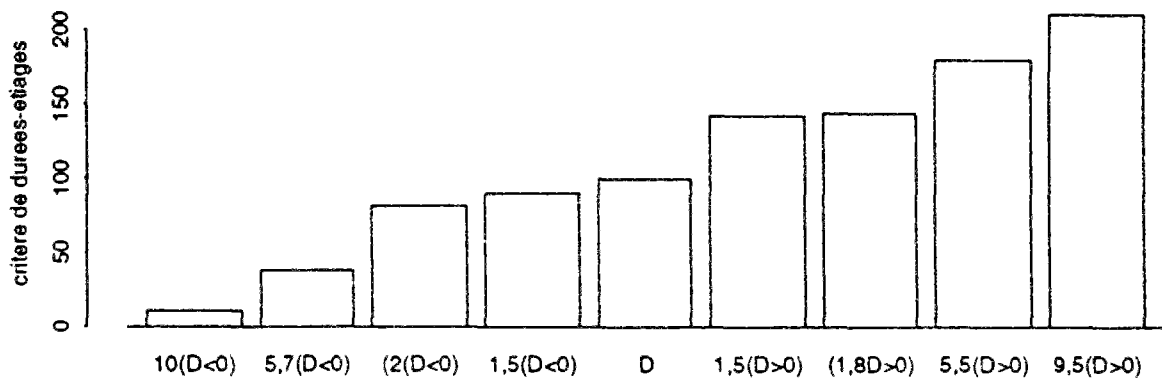


Annexe 6.2 - suite

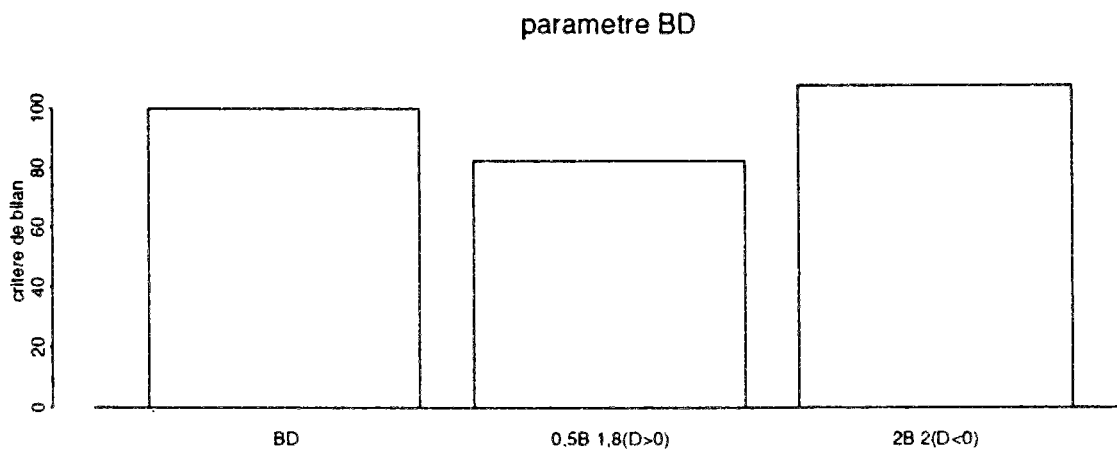
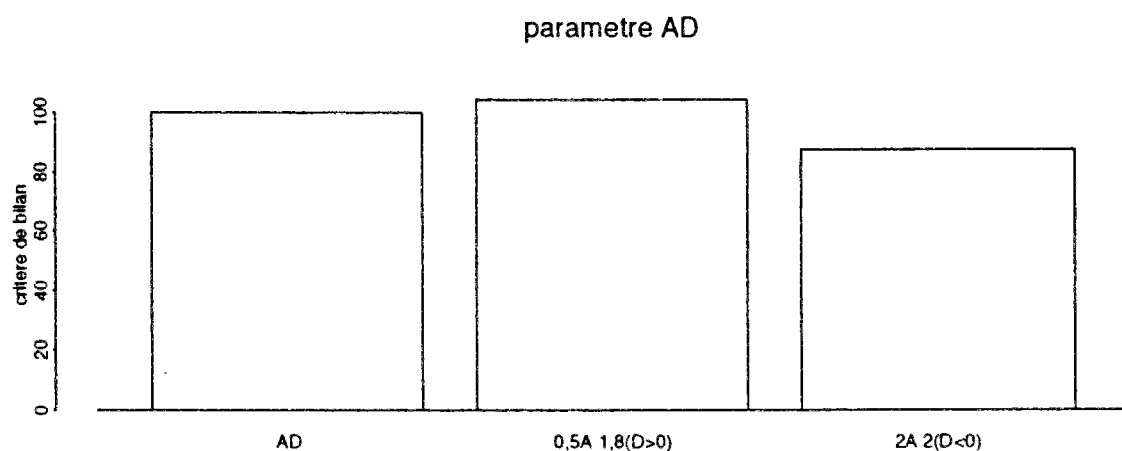
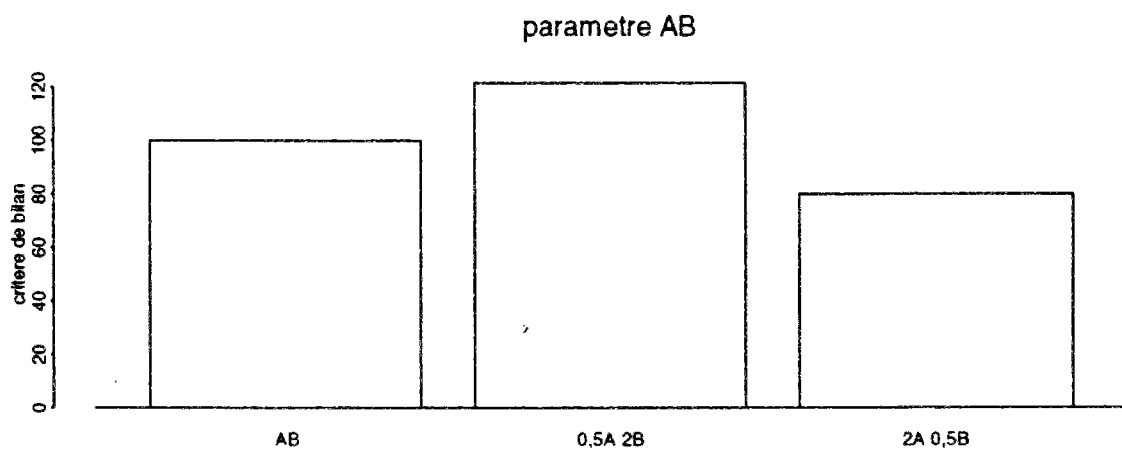
critere des durees-etiages - parametre C



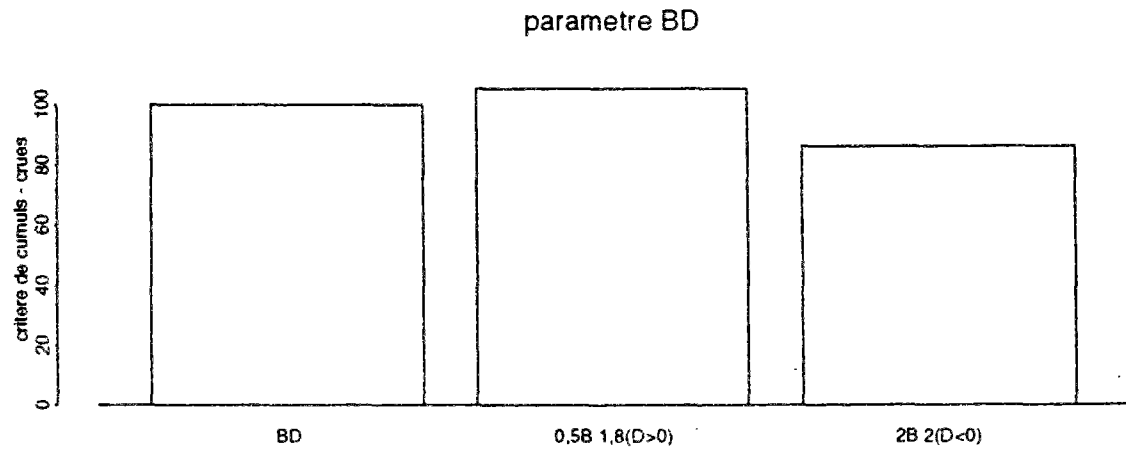
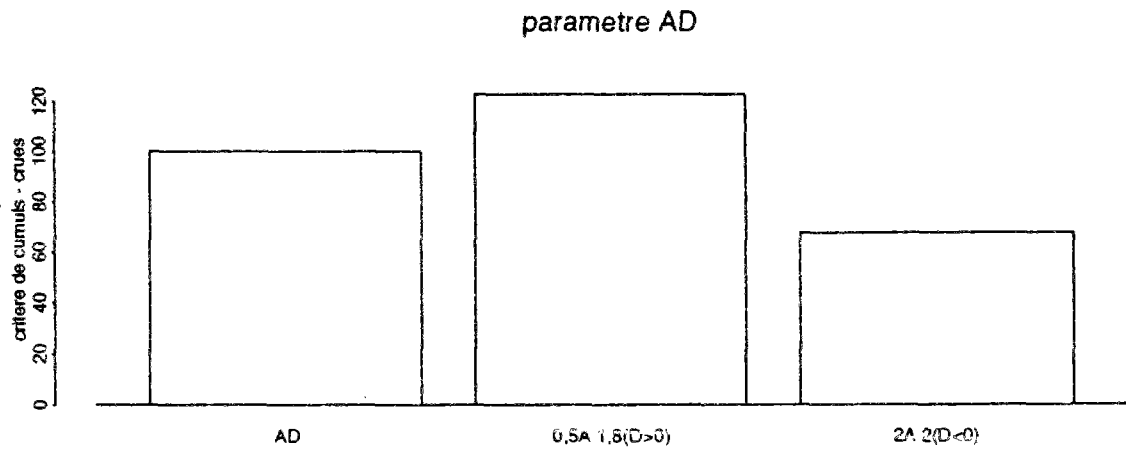
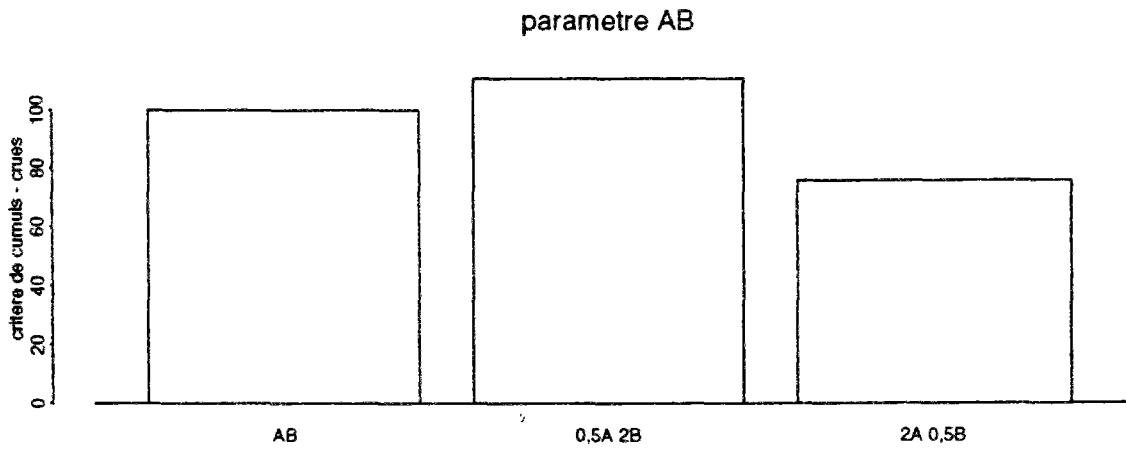
critere des durees-etiages - parametre D



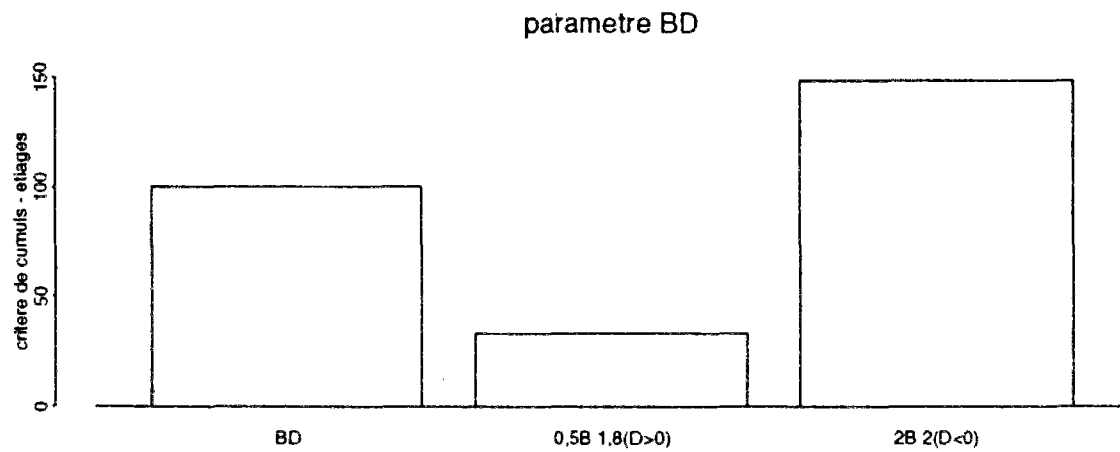
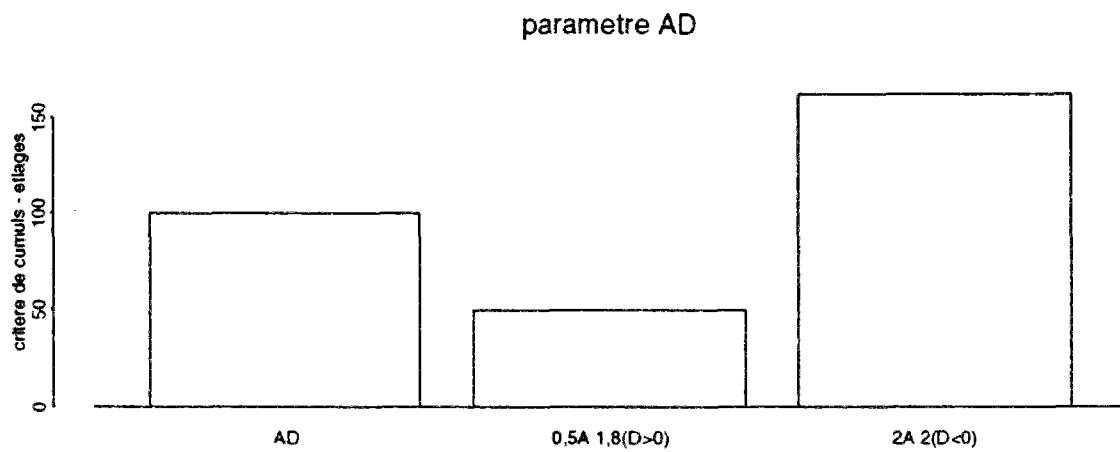
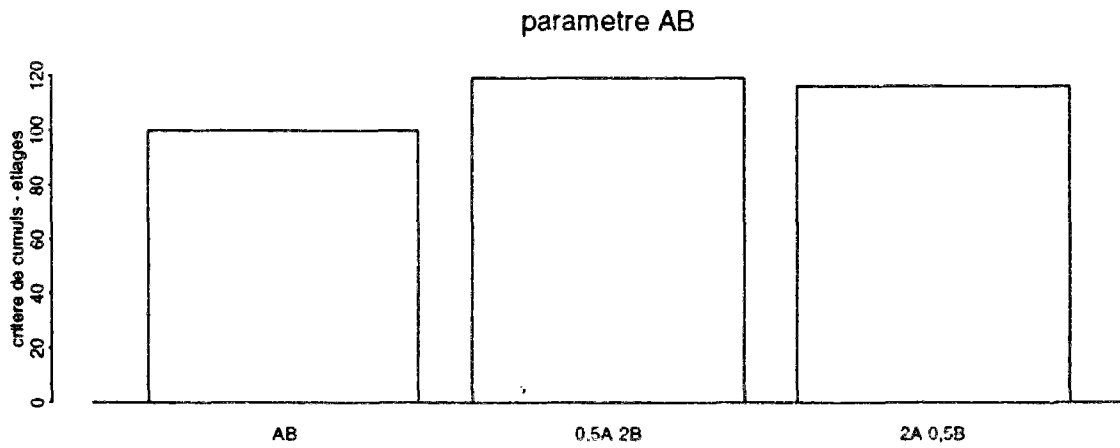
Annexe 6.3 - L'Evolution des variables hydrologiques comme résultat de l'évolution des paramètres du modèle GR4J - paramètres composés -



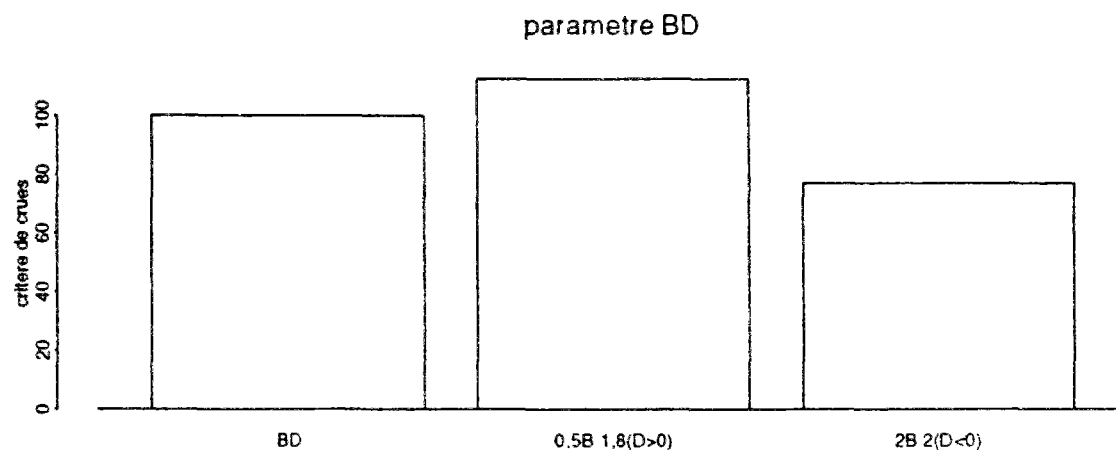
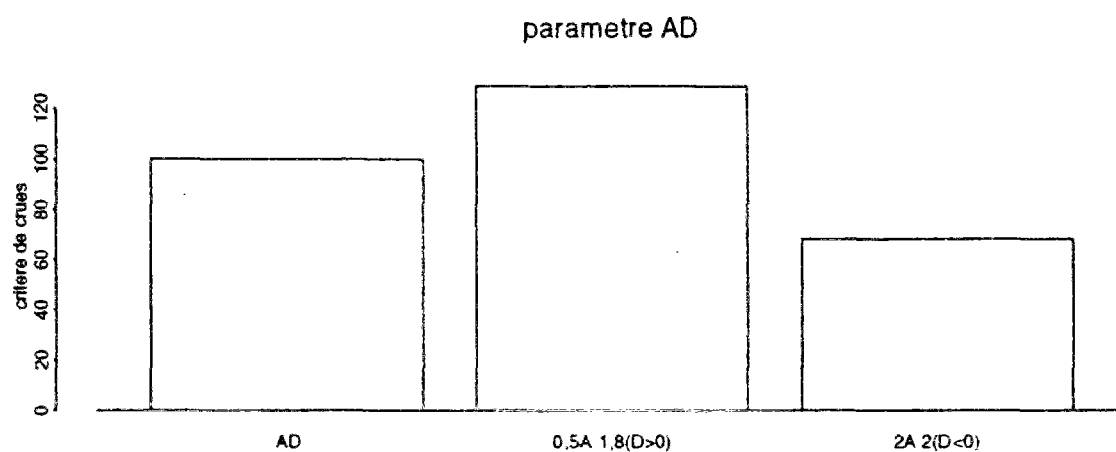
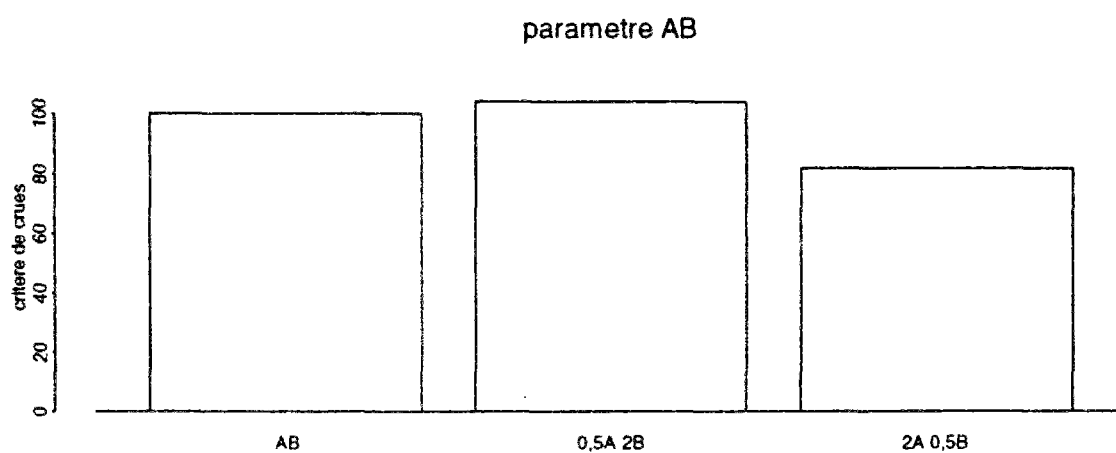
Annexe 6.3 - suite



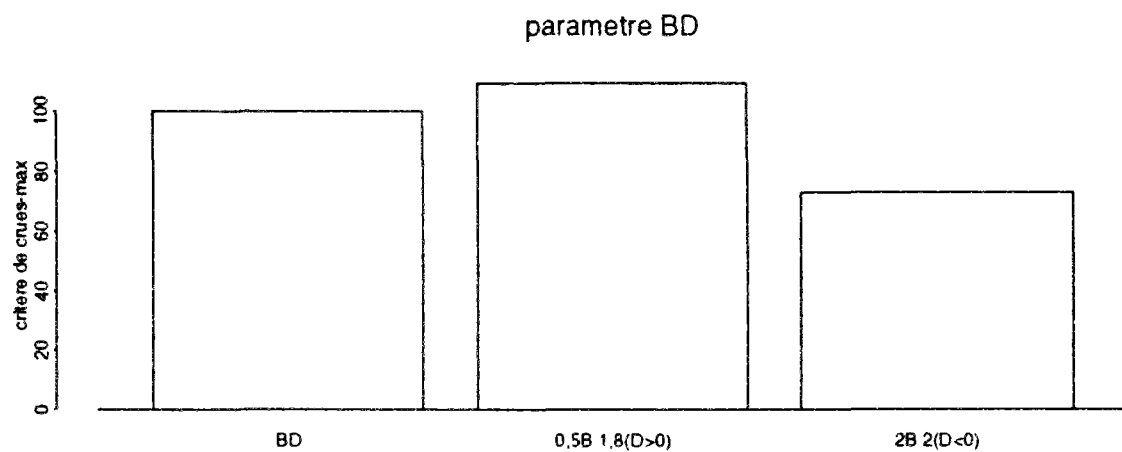
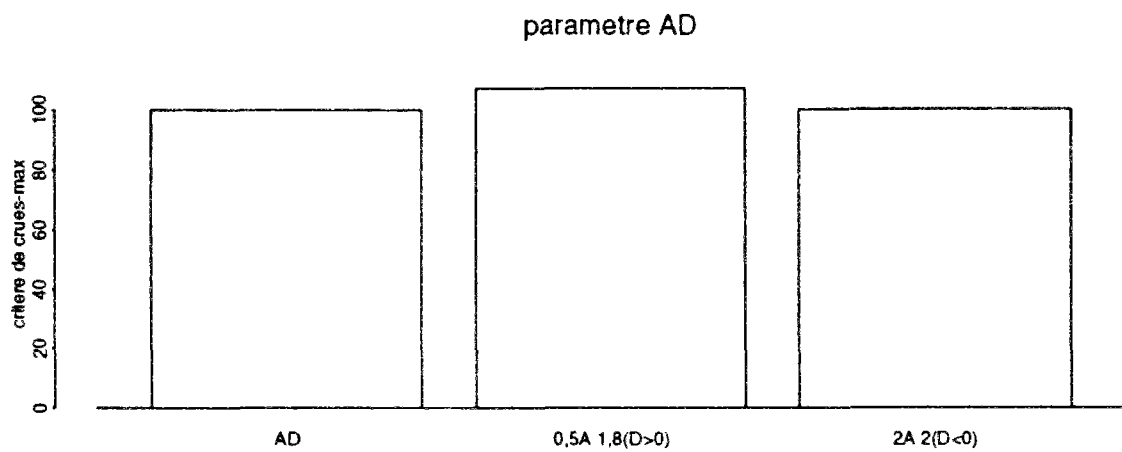
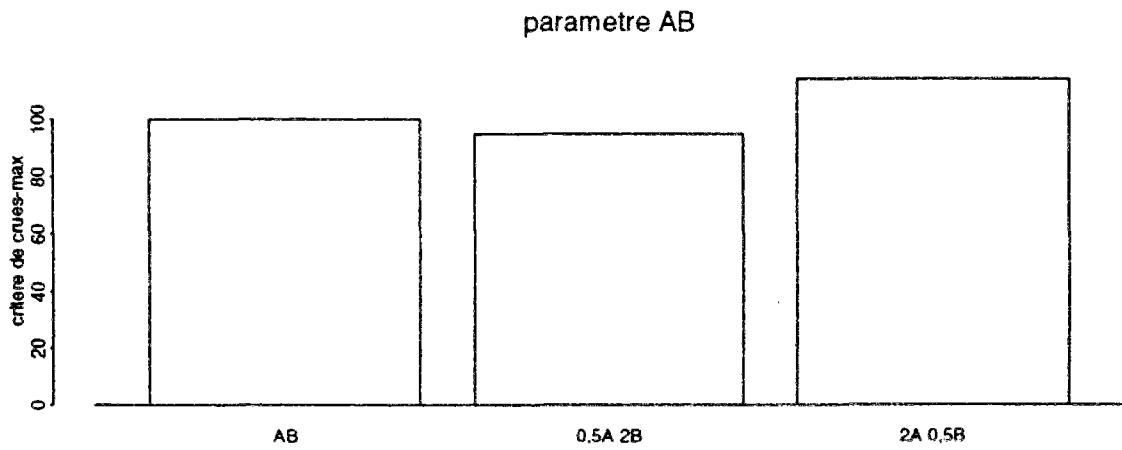
Annexe 6.3 - suite



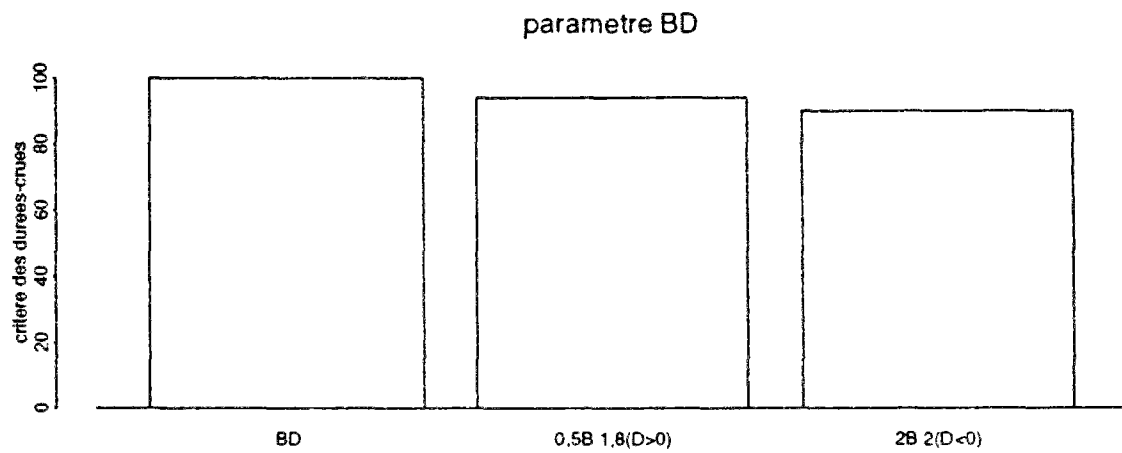
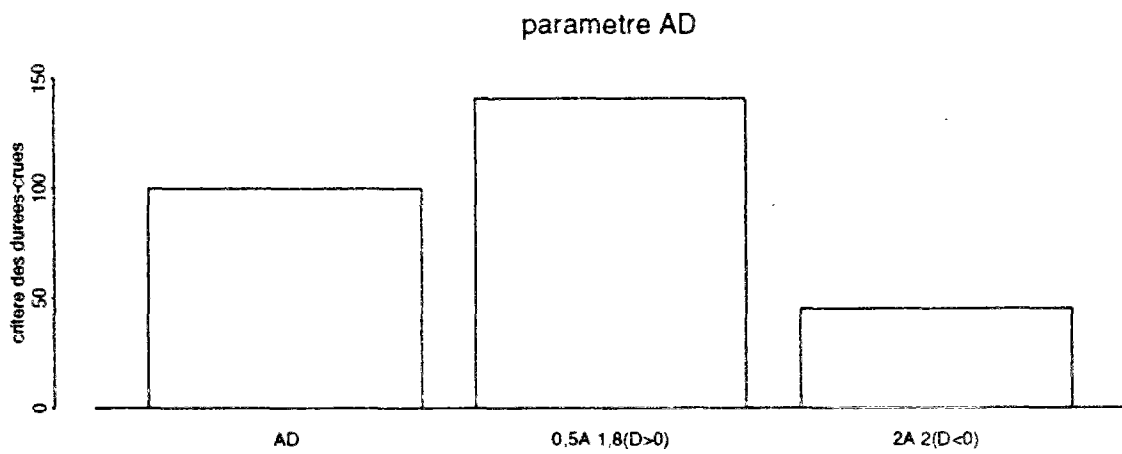
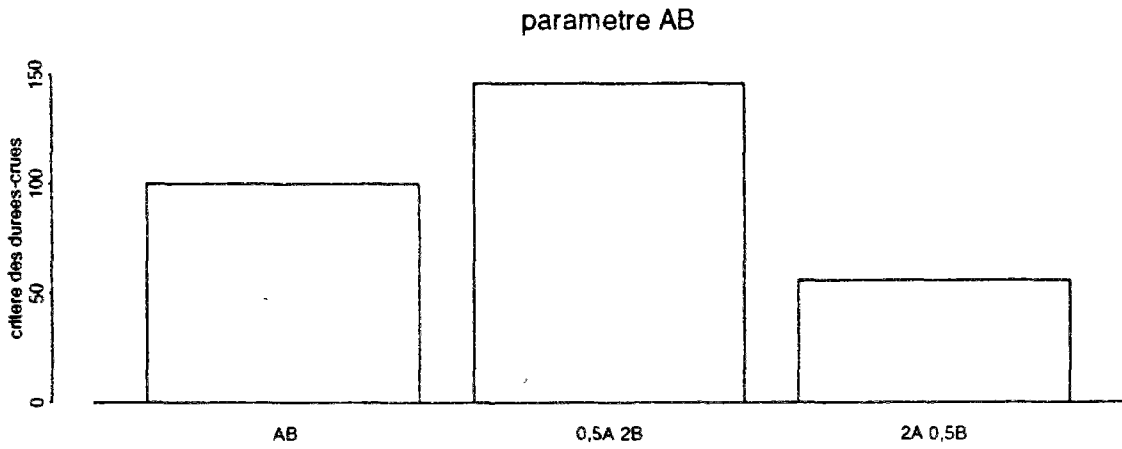
Annexe 6.3 - suite



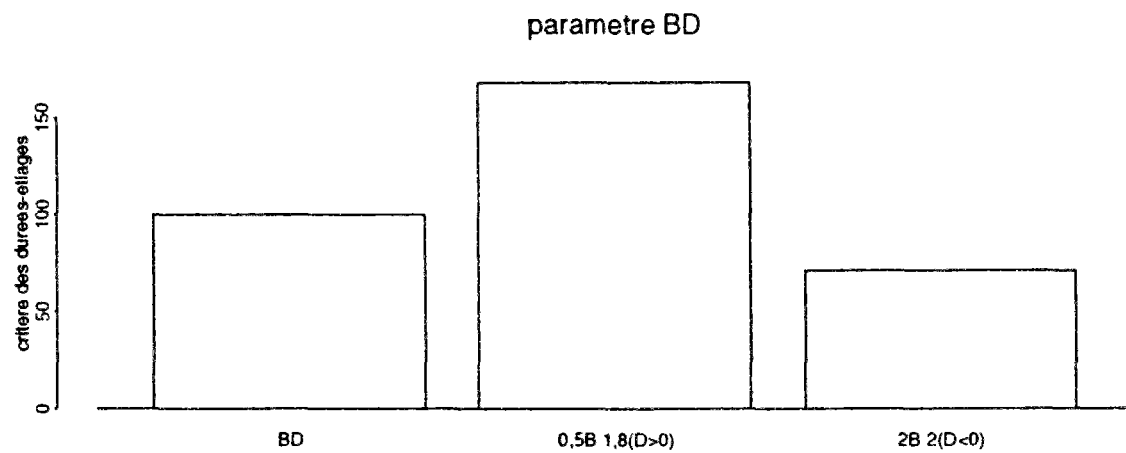
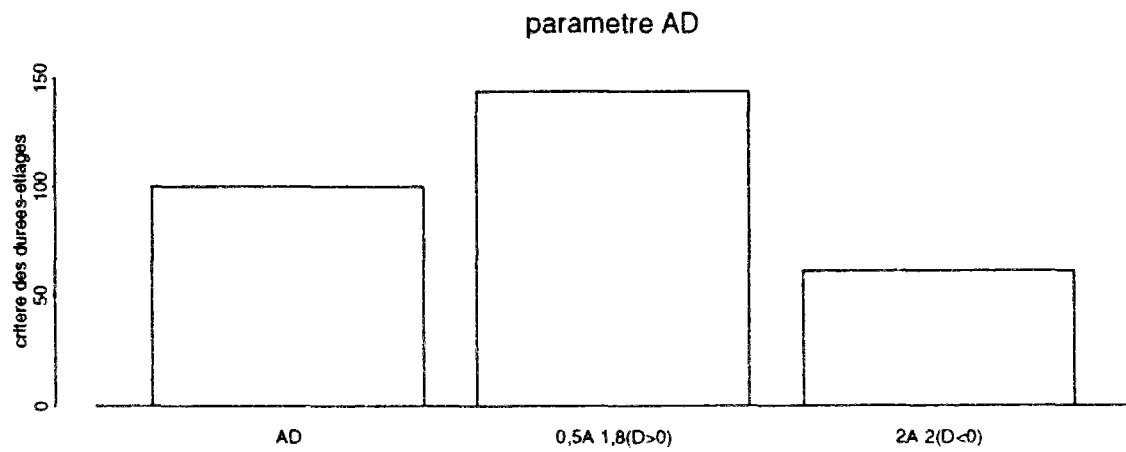
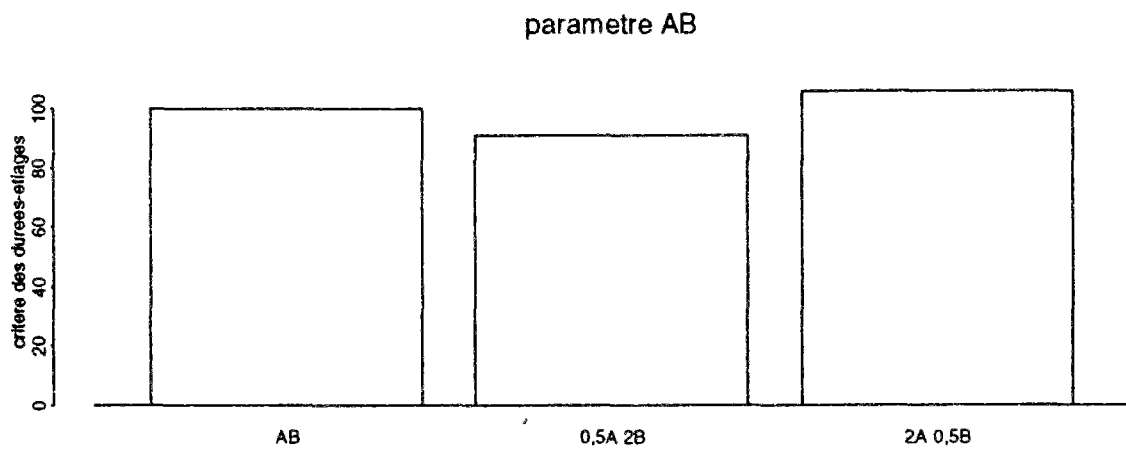
Annexe 6.3 - suite



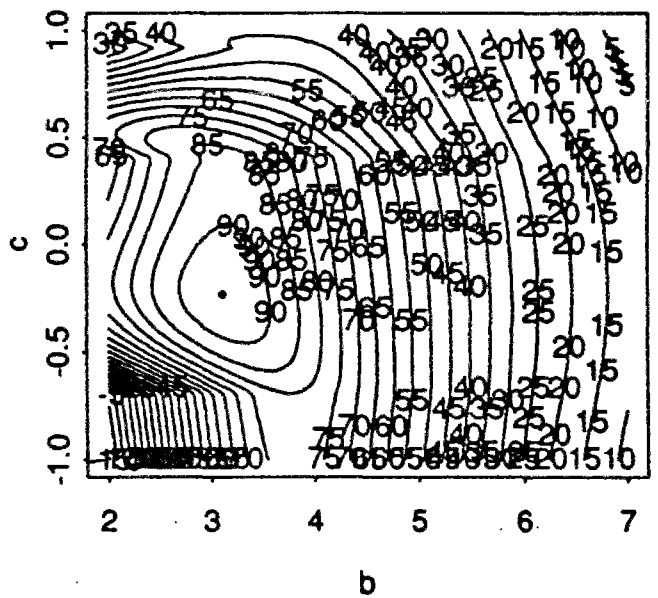
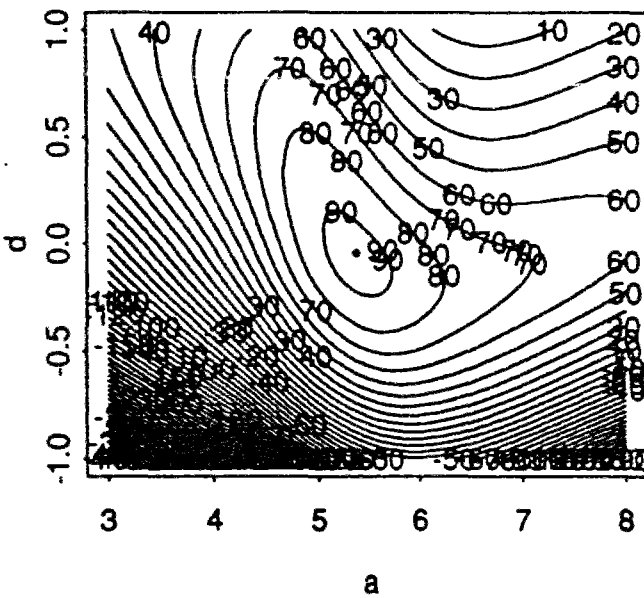
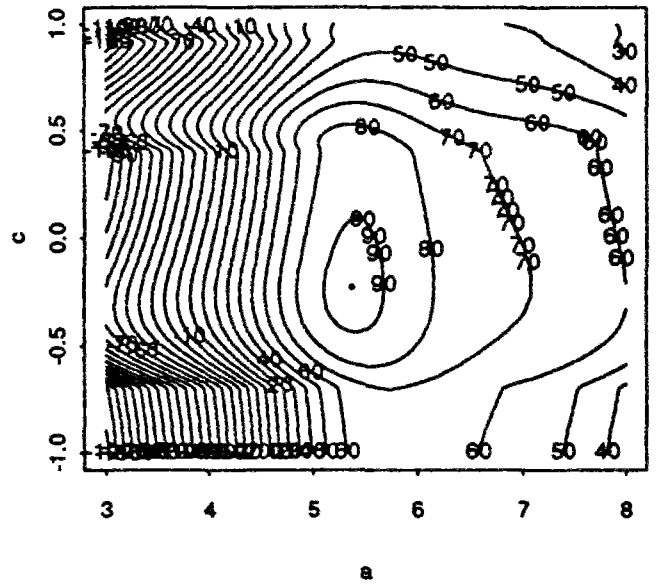
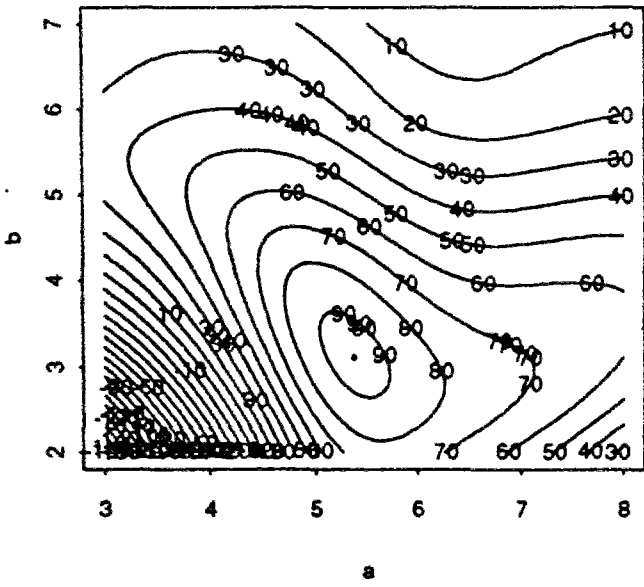
Annexe 6.3 - suite



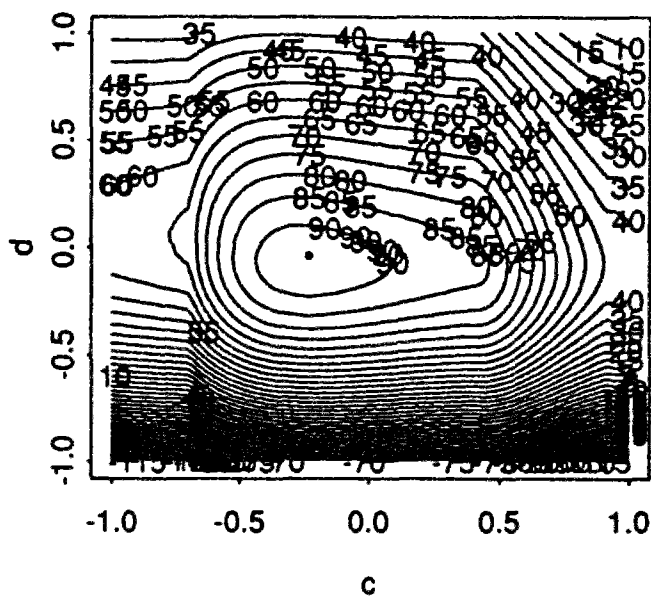
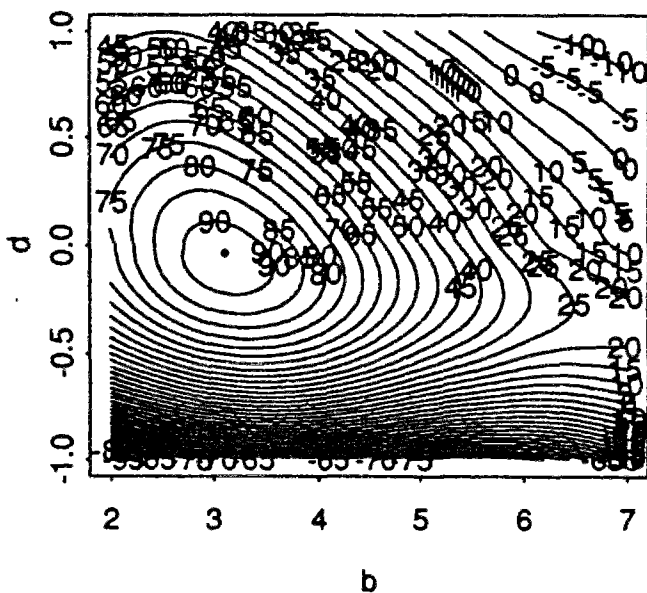
Annexe 6.3 - suite



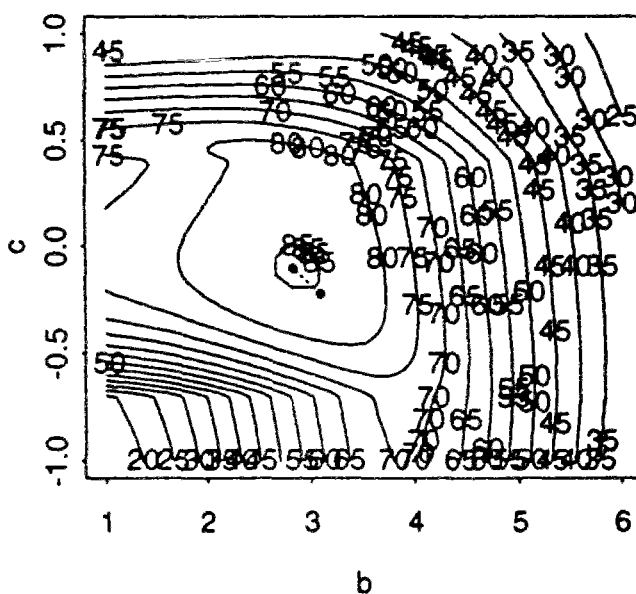
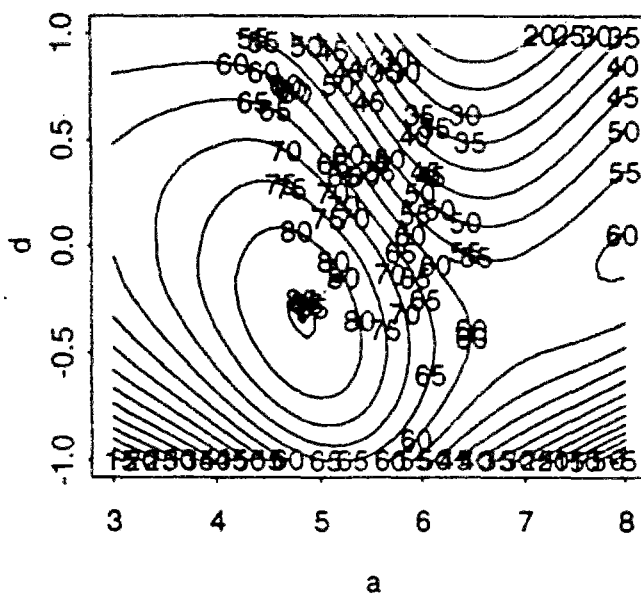
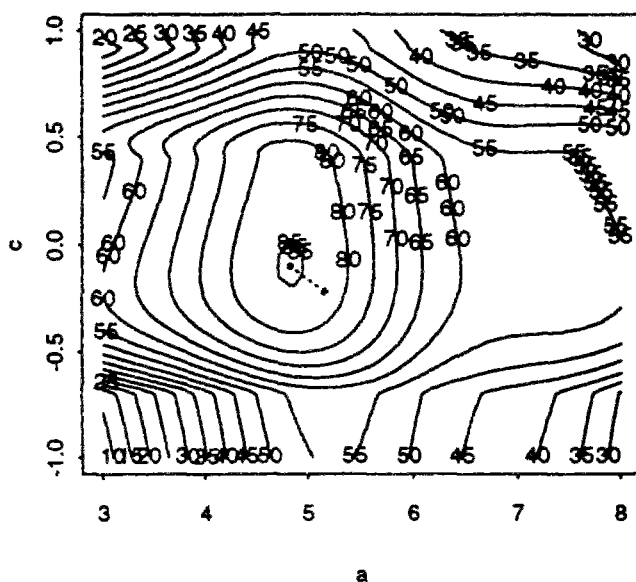
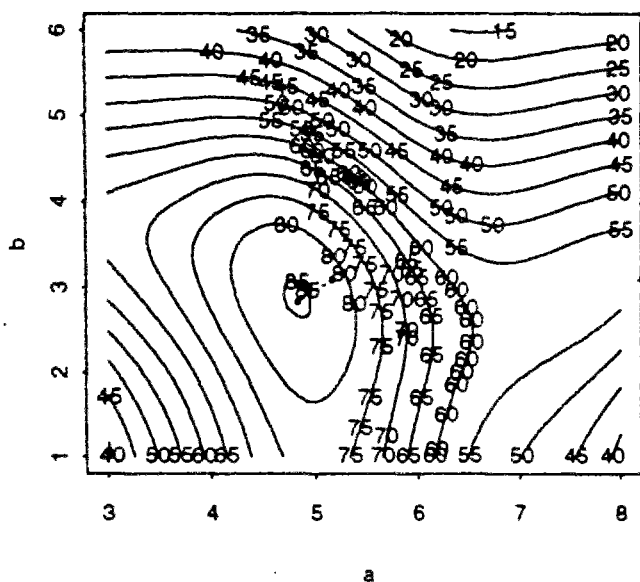
Annexe 6.4 - Série [0,2pq] - Méthode EG Courbes d'isocritères



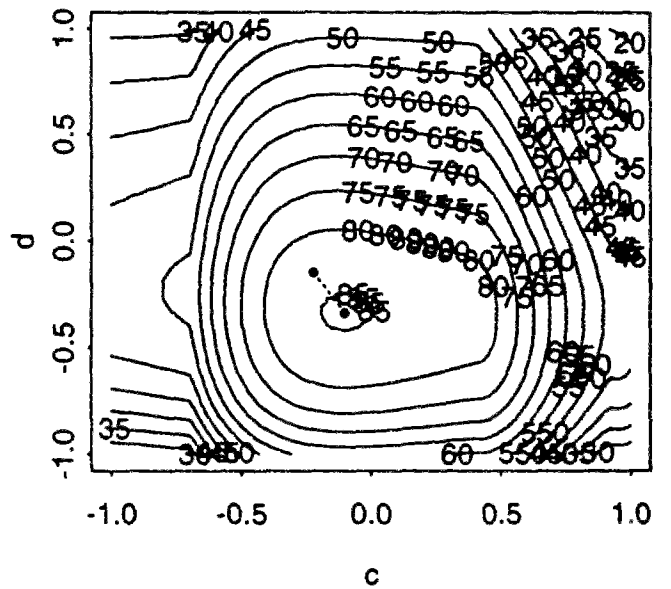
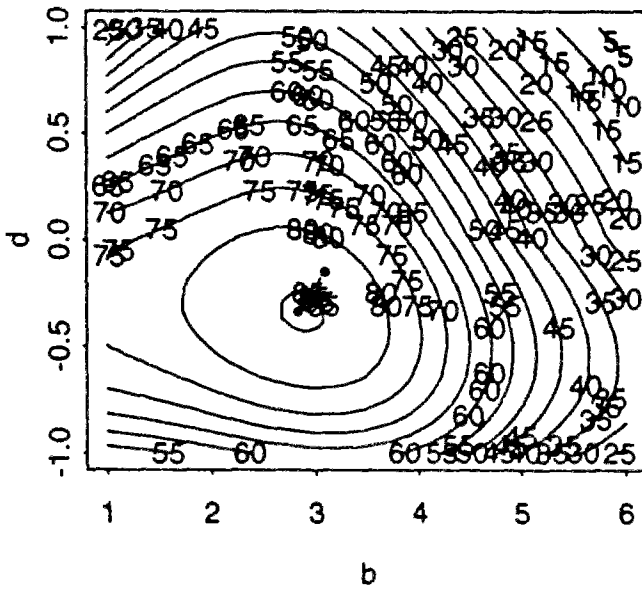
Annexe 6.4 - suite



Annexe 6.5 - Série [br.qtl/100] - Méthode 'EG' Courbes d'isocritères



Annexe 6.5 - suite



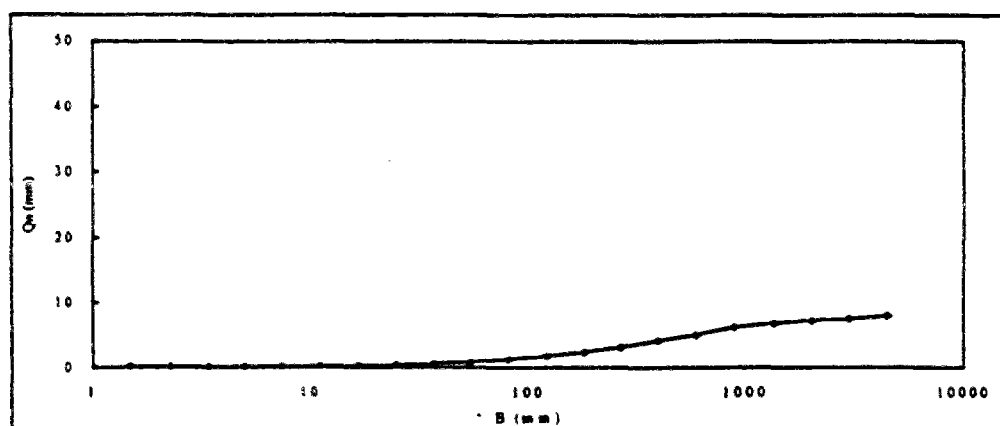
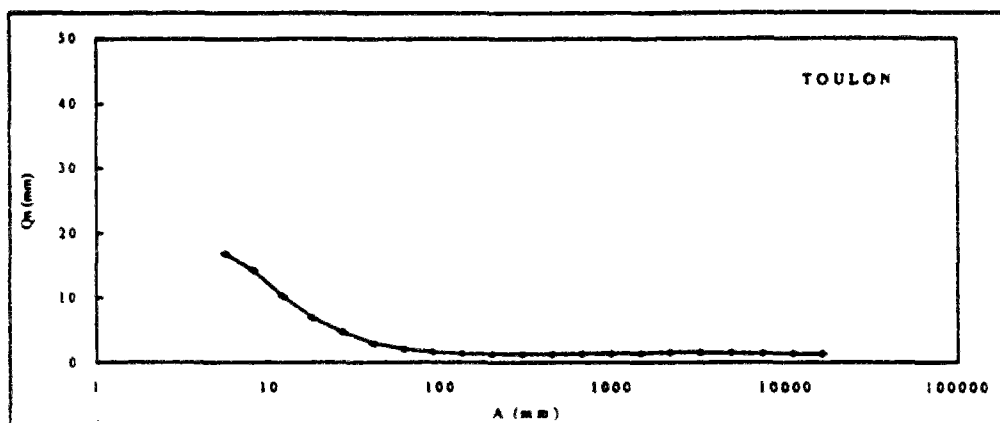
Annexes du Chapitre 7

**Annexe 7.1 - Interruptions de mesure de débit dans les bassins
versant du Rimbaud, du Vaubarnier et du Valescure
période : 1969-1992**

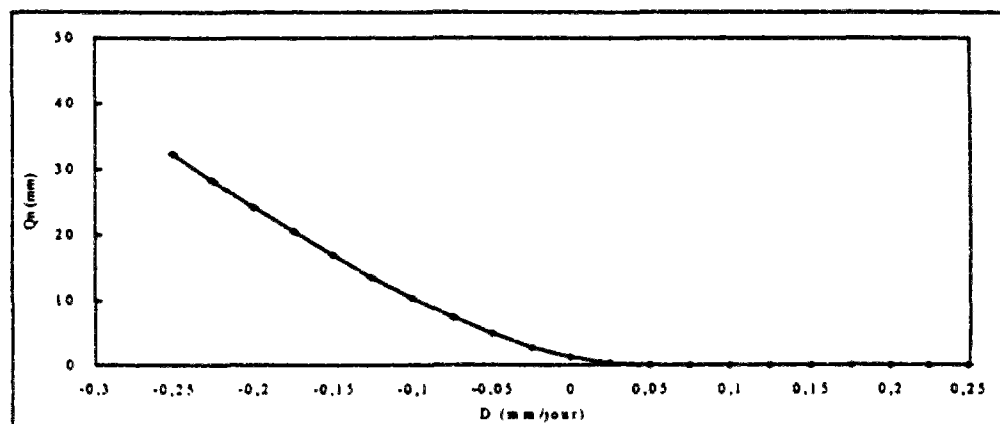
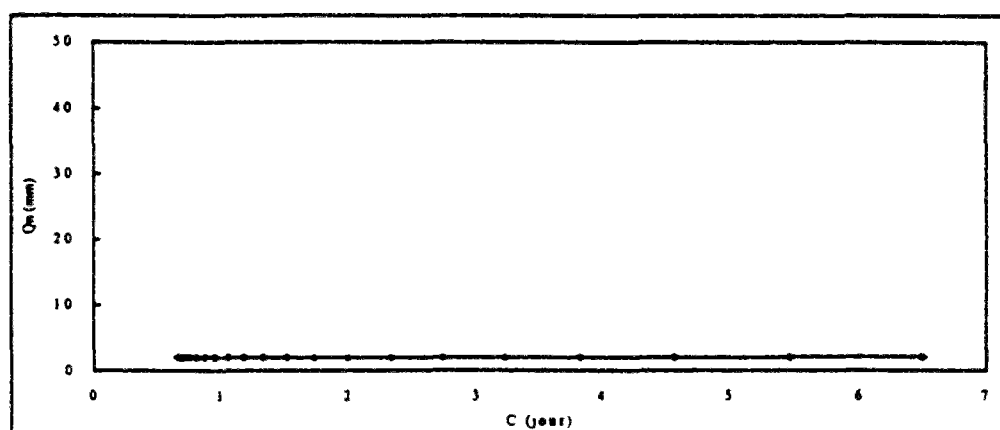
Tableau A7.1.1

bassin versant	année	mois	nombre de jours	lame d'eau écoulée (estimée par GR4J)
<i>BIC</i>				
	1978	01	4	49 mm
	1981	12	3	21 mm
	1984	09	10	3,2 mm
	1985	01, 10, 11 et 12	60	141 mm
	1986	2	6	35 mm
	1987	10	2	9 mm
	1988	1	8	93 mm
	1990	10	21	34 mm
<i>BT1</i>				
	1969	12	6	7 mm
	1970	1	4	11 mm
	1972	2	13	192 mm
	1974	2 et 3	24	293 mm
	1975	1	6	10 mm
	1984	9 et 10	36	16 mm
	1985	11	30	3 mm
	1986	7 et 10	11	2 mm
	1987	5, 10 et 11	12	47 mm
	1988	3	5	9 mm
	1992	1 et 2	25	16 mm
<i>BT2</i>				
	1971	12	2	5 mm
	1972	1	3	31 mm
	1984	12	3	33 mm
	1985	1, 6, 7, 8, 10 et 11	60	9 mm
	1986	1, 2, 3 et 12	33	171 mm
	1987	1 et 12	12	32 mm
	1988	2 et 10	7	2,4 mm
	1989	2	9	2,6 mm
	1990	3 et 4	7	2,6 mm

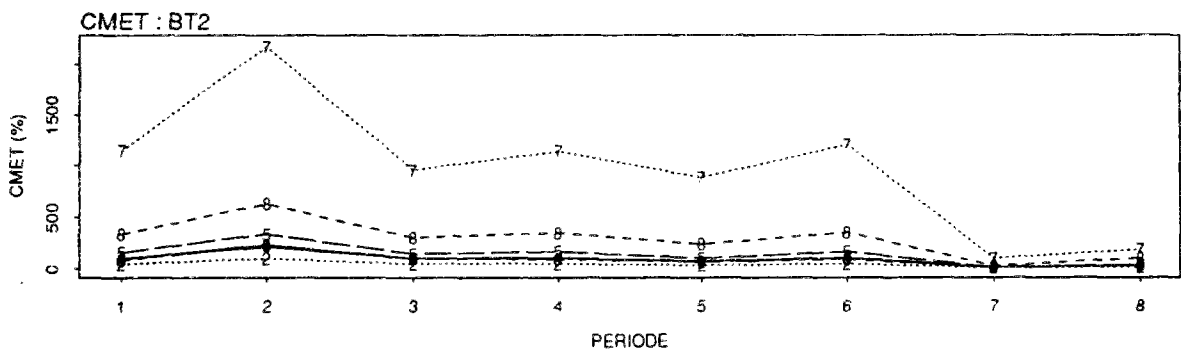
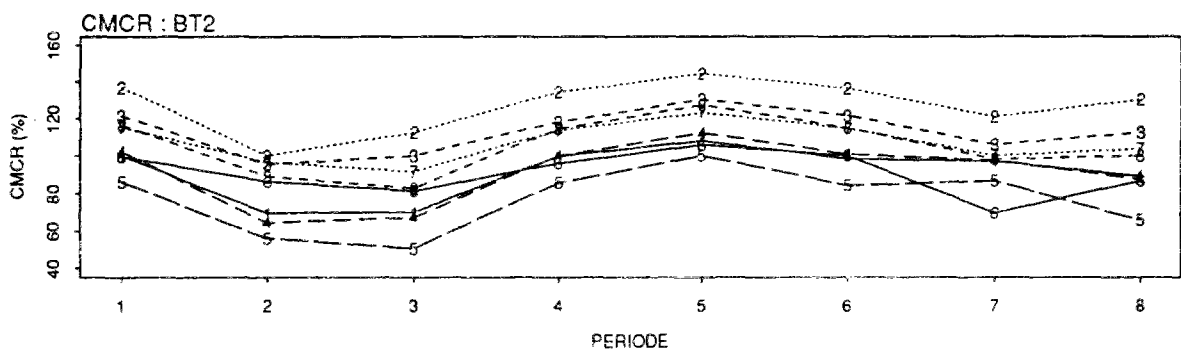
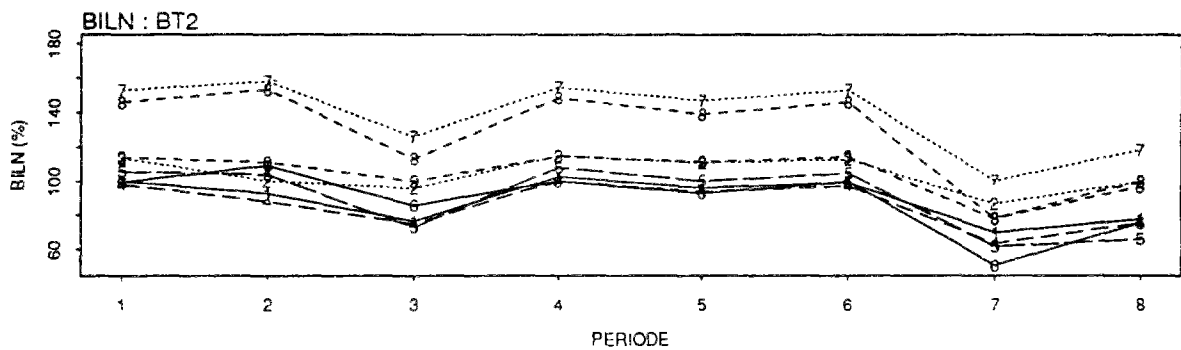
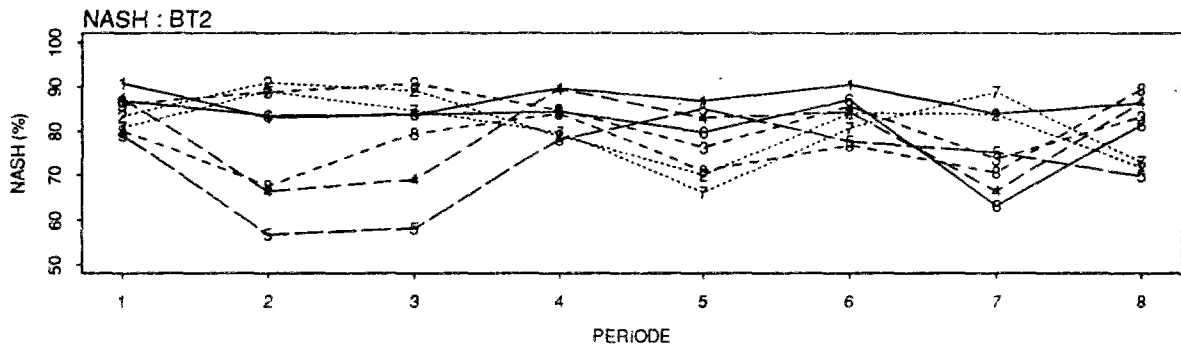
**Annexe 7.2 - L'évolution des variables hydrologiques comme
résultat de l'évolution des paramètres du modèle GR4J - Toulon
(d'après MAKHLOUF 1994)**



Annexe 7.2 - suite



Annexe 7.3 - Bassin Versant du Valescure - Evolution dans le temps des critères de qualité de GR4J - contrôles successifs



légende des périodes :

1 : 1969-1971

2 : 1972-1974

3 : 1975-1977

4 : 1978-1980

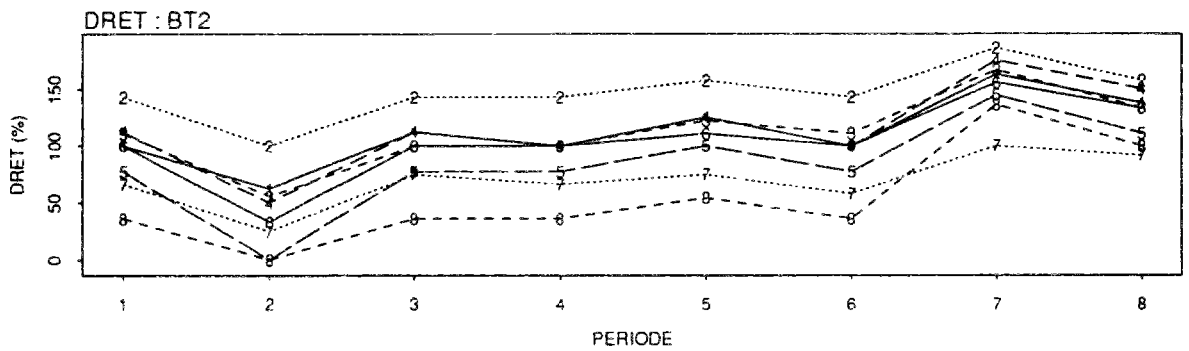
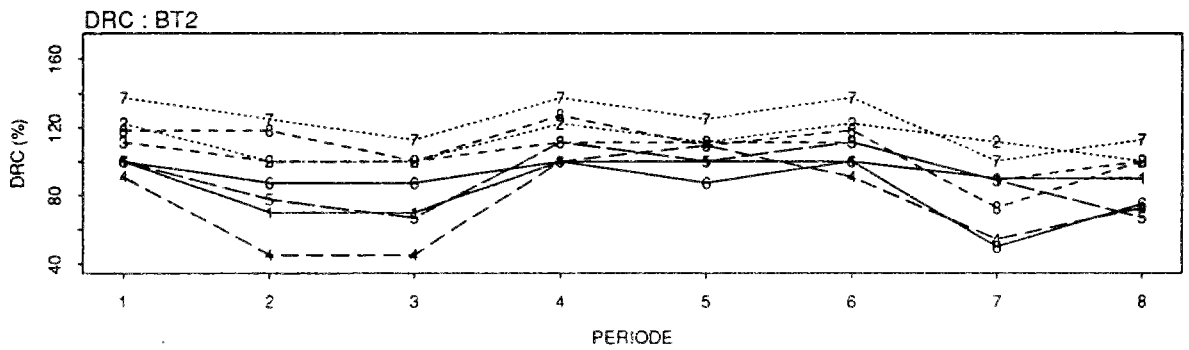
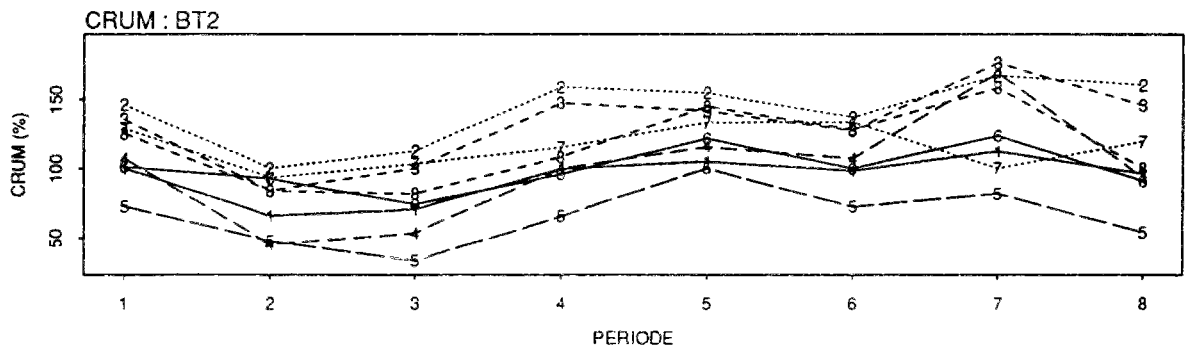
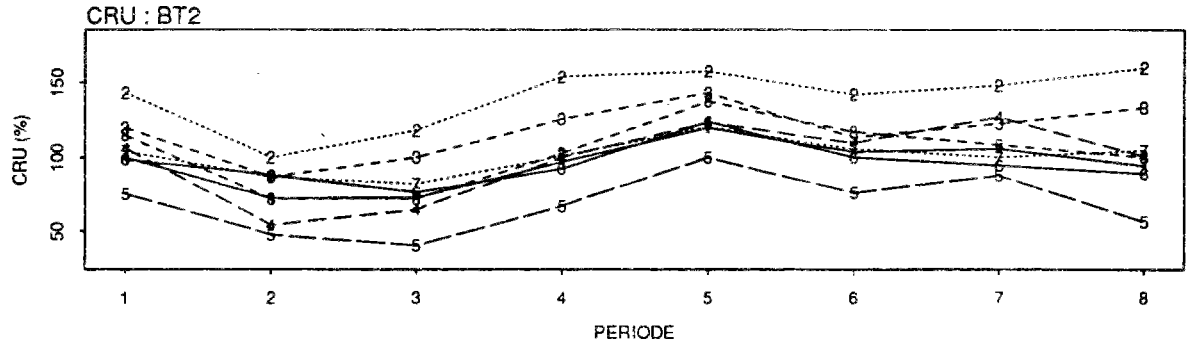
5 : 1981-1983

6 : 1984-1986

7 : 1987-1989

8 : 1990-1992

Annexe 7.3 - suite



NASH = critère de NASH BILN = rapport de bilan CMCR = r. des cumuls des crues CMET = r. des cumuls d'étiages
 CRU = r. des crues annuelles moy. CRUM = r. crues m.-maximum DRC = rapport des durées de crue DRET = r. des durées d'étiage