

ORSTOM

IIRSDA

MODELISATION PLUIE-DEBIT
*ETUDE ET SELECTION DES CRITERES DE CALAGE
DES MODELES PLUIE-DEBIT*

E. SERVAT
A. DEZETTER
J.M. LAPETITE

NOVEMBRE 1989

*PROGRAMME ERREAU
NOTE 2*

SOMMAIRE

<u>SOMMAIRE</u>	1
<u>1. INTRODUCTION</u>	2
<u>2. MODELES ET CRITERES UTILISES</u>	4
2.1. Les modèles globaux	4
2.1.1. Le modèle CREC	4
2.1.2. Le modèle MODGLO	4
2.1.3. Le modèle GR3	6
2.2. Les fonctions critères utilisées	6
2.2.1. Le critère Crec	9
2.2.2. Le critère CrecBi	9
2.2.3. Le critère de Fortin	10
2.2.4. Le critère de Nash	10
2.2.5. Le critère SExpER	10
<u>3. DONNEES UTILISEES</u>	11
3.1. La Bagoé à Guingérini	11
3.2. La Bagoé à Kouto	11
3.3. Le Bou à Boron	12
3.4. Le Lafigue à route de Badikaha	12
<u>4. RESULTATS DES CALAGES</u>	14
4.1. Méthodologie	14
4.1.1. Les fichiers de données	14
4.1.2. Le calage	15
4.2. Exploitation des résultats des calages	15
4.2.1. La Bagoé à Kouto 1973-1976	17
4.2.2. La Bagoé à Kouto 1981-1985	17
4.2.3. La Bagoé à Guingérini 1981-1983	24
4.2.4. Le Bou à Boron 1981-1985	24
4.2.5. Le Lafigue à route de Badikaha 1981-1984	24
<u>5. COMPORTEMENT DES CRITERES NUMERIQUES</u>	25
5.1. Caractérisation graphique	25
5.2. Caractérisation hydrologique	25
5.2.1. Le module d'évaluation comparative	25
5.2.2. Evaluation des critères	27
5.3. Convergence	34
<u>CONCLUSION</u>	38
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	40
<u>ANNEXES</u>	42

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du programme ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en EAU) une première phase a consisté en la constitution de fichiers opérationnels de précipitations et de débits (SERVAT et DEZETTER, 1988 b), et d'une banque de modèles de relation pluie-débit, globaux et distribués.

En ce qui concerne les modèles, ont finalement été retenus:

*) modèles conceptuels globaux: CREC (GUILBOT, 1986), MODGLO (SERVAT, 1986), GR3 (EDIJATNO et MICHEL, 1989);

*) modèles conceptuels distribués ou semi-distribués: MDOR (VILLENEUVE et ISABEL, 1984), MODSUR (module d'écoulement de surface du modèle de GIRARD, non encore véritablement disponible à l'heure actuelle sur micro, GIRARD et al, 1981);

*) et un modèle rendant compte des principaux processus impliqués dans les transferts d'eau dans le système sol-plante à l'échelle locale (RAMBAL, 1987).

D'autres modèles, initialement retenus, ont finalement été éliminés, du fait de leur complexité de mise en oeuvre et du nombre important de paramètres qu'ils nécessitent. Ceci est, en effet, difficilement compatible avec les objectifs "appliqués" et "opérationnels" du programme ERREAU. Aménageurs et gestionnaires ne peuvent, en pratique, utiliser que des modèles relativement simples, et pour lesquels données et paramètres (précipitations, évapotranspiration, autres paramètres caractéristiques du climat, du sol ou de la végétation, débits observés) doivent pouvoir être obtenues à partir des réseaux de mesure nationaux ou de travaux antérieurs aisément accessibles.

C'est une des raisons pour lesquelles nous avons, en particulier, renoncé à utiliser les modèles OMEGA (CORREIA et MOREL-SEYTOUX, 1984) et SWATCH (MOREL-SEYTOUX et ALHASSOUN, 1987) relativement sophistiqués du point de vue des équations et des concepts qu'ils utilisent, mais difficiles à mettre en oeuvre sur de grands bassins et dans le cadre d'un projet d'aménagement.

La deuxième phase du programme ERREAU consiste en l'utilisation de ces modèles dans un but de détermination des apports à un pas de temps qui soit au moins décadaire.

Avant de nous lancer dans une opération systématique de calage, de validation, de reconstitution et d'exploitation des résultats à différents niveaux, il nous a semblé important d'avoir un premier aperçu des performances que l'on pouvait obtenir de ces algorithmes. Ceci afin de mieux orienter les travaux qui devaient suivre.

Dans un premier temps, nous avons donc considéré uniquement un nombre réduit de bassins versants (la Bagoé à Kouto, la Bagoé à Guingérini, le Bou à Boron, le Lafigue à route de Badikaha). Ce sont les performances optimales et donc celles obtenues à l'issue des calages qui ont retenu notre attention. Les périodes sur lesquelles nous avons travaillé font état d'années dont la pluviométrie est très variable. Dans ces conditions, nous avons procédé à des calages sur les séries chronologiques disponibles et à des calages année par année, à titre de comparaison. L'ensemble de ce

travail nous a permis d'apprécier globalement les performances de ces modèles, de redéfinir certaines orientations pour la suite du programme, et d'évaluer assez précisément les performances des différents critères de calage.

C'est essentiellement ce dernier aspect que nous développerons dans le cadre de ce rapport.

2. MODELES ET CRITERES UTILISES

2.1. Les modèles globaux

Nous avons utilisé 3 modèles globaux différents que nous présenterons rapidement ici, renvoyant le lecteur à la bibliographie pour plus de détails.

2.1.1. Le modèle CREC (COMBES 1985, GUILBOT 1986, SERVAT 1986)

CREC est un modèle de conception relativement ancienne puisqu'il a été mis au point au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences de Montpellier au début des années 1970.

C'est un modèle conceptuel global basé sur un schéma à réservoirs relativement classique, qui permet d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert.

La fonction de production tient compte de l'état d'humidité du sol, par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration, et fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement.

La fonction de transfert comprend, elle, un terme d'écoulement rapide et un terme d'écoulement lent (représenté par une exponentielle décroissante).

La version de CREC que nous avons utilisée comprend 10 paramètres. Elle offre la possibilité d'un ruissellement de surface transitant par un réservoir linéaire.

Le modèle travaille au pas de temps journalier et calcule donc un débit moyen journalier Q_j qui est la somme d'un éventuel ruissellement de surface Q_j^S , d'un écoulement rapide Q_j^H et d'un écoulement lent Q_j^G .

Les différents paramètres sont optimisés à l'aide des méthodes de Rosenbrock et de Nelder et Mead (SERVAT et DEZETTER, 1988 a) utilisées en séquence.

La figure 1 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.

2.1.2. Le modèle MODGLO (SERVAT 1986, DEZETTER 1987)

MODGLO est un modèle conçu en 1974, à l'ORSTOM, par G. GIRARD.

C'est un modèle conceptuel global pour lequel il est également possible d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert.

Au niveau de la fonction de production, il est fait appel à certains mécanismes physiques de la transformation pluie-débit (prise en compte de la capacité de rétention en eau des sols, des processus d'infiltration), bien que de nombreuses hypothèses simplificatrices y aient été apportées.

La fonction de transfert initiale a été remplacée par une fonction comprenant trois réservoirs en parallèle. Chacun d'eux est caractérisé par un coefficient d'alimentation (répartition entre les différents réservoirs de la lame d'eau issue de la fonction de production) et un coefficient de vidange.

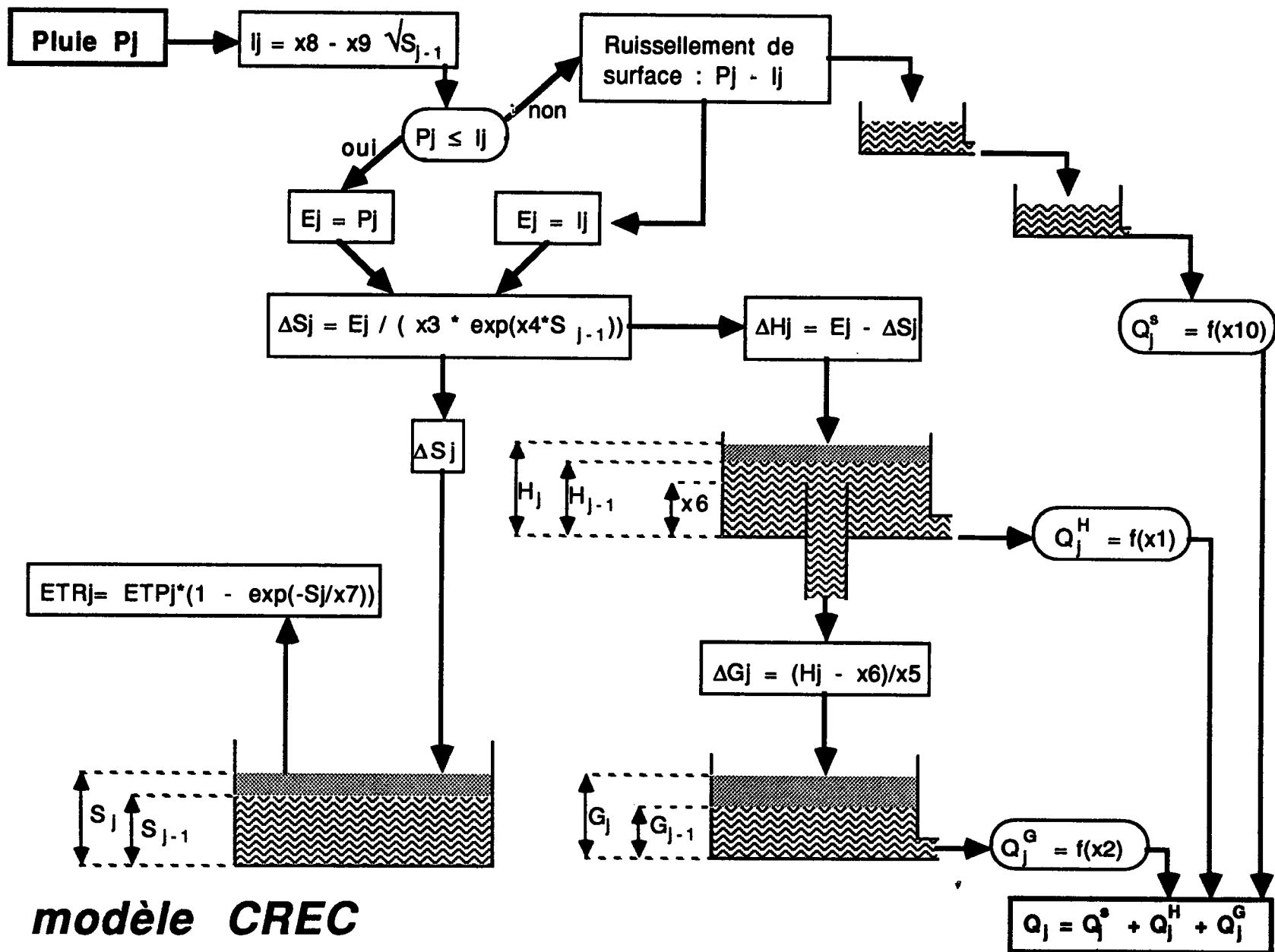


Figure 1 : Modèle CREC - Schéma conceptuel.

Ce modèle travaille au pas de temps journalier et calcule donc un débit moyen journalier.

Les paramètres de MODGLO sont optimisés selon la même procédure que pour CREC.

La figure 2 présente le schéma conceptuel du modèle MODGLO.

2.1.3. Le modèle GR3 (EDIJATNO et MICHEL, 1989)

Le modèle GR3 appartient, lui aussi, à la catégorie des modèles à réservoirs.

L'architecture de cet algorithme, conçu au CEMAGREF, repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire:

- le réservoir-sol ayant comme seule sortie le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage;
- un hydrogramme unitaire, décrivant la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir qui est:
- le réservoir-eau-gravitaire. Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière et sa loi de vidange est du type quadratique.

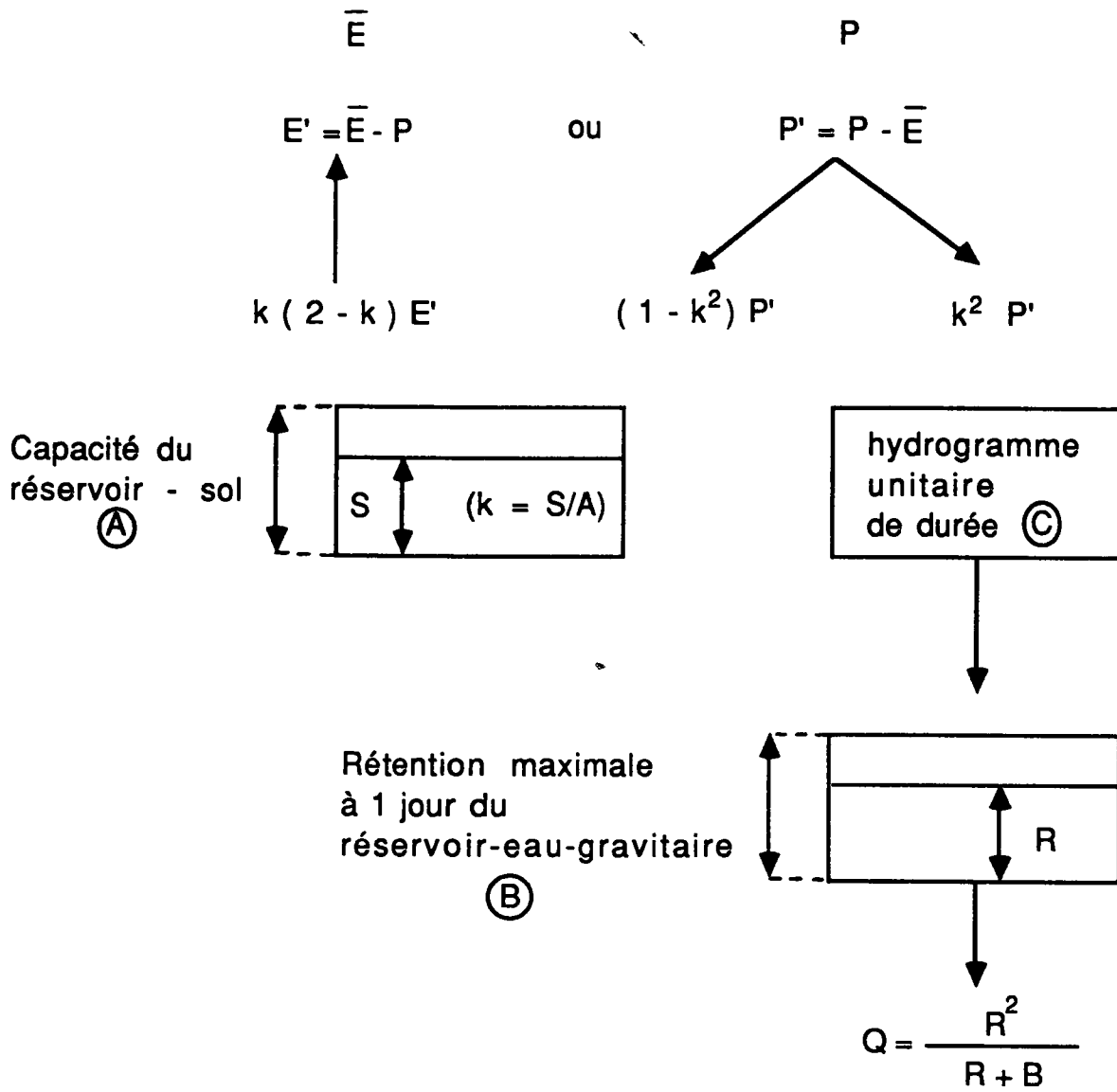
D'après EDIJATNO et MICHEL (1989), cet ensemble de trois opérateurs dont chacun dépend d'un seul paramètre semble être, à l'heure actuelle, le schéma le plus simple pour rendre compte de façon acceptable de la transformation "pluie-débit".

La figure 3 présente le schéma conceptuel du modèle GR3.

2.2. Les fonctions critères utilisées

L'optimisation automatique des paramètres d'un modèle nécessite l'utilisation d'une fonction critère, "objet" numérique de référence devant permettre l'amélioration du calage. Le choix d'un critère n'est cependant pas sans influence sur la nature et la qualité du calage obtenu au terme du processus.

Considérer différentes fonctions critères, c'est, en effet, considérer différentes formulations mathématiques faisant toujours intervenir, cependant, l'écart entre les valeurs observées et les valeurs calculées (écart auquel on applique différentes pondérations ou transformations). Pour un modèle donné à n paramètres, on conçoit donc facilement, que la représentation de chaque fonction critère dans l'hyperespace correspondant (n paramètres donc n dimensions) conduise à autant d'hypersurfaces différentes. L'optimisation des paramètres se traduit par un déplacement sur ces hypersurfaces jusqu'à ce que, idéalement, le point correspondant au minimum de la fonction critère soit atteint. En pratique, ces hypersurfaces ont un aspect très irrégulier, et le processus d'optimisation conduit, avec une convergence variable, à des minima qui sont généralement différents d'un cas sur l'autre. Pour une application donnée, chaque fonction critère pourrait donc avoir un comportement spécifique conduisant à des solutions différentes. De la même façon, on pourrait imaginer de bâtir des critères numériques en fonction d'objectifs particuliers.



modèle GR3

Figure 3 : Modèle GR3 - Schéma conceptuel.

Dans le cadre de cette étude nous avons testé plusieurs formulations de fonctions critères afin de juger de leurs performances et d'en sélectionner une que nous utiliserons dans la suite du programme. Les objectifs que nous nous étions fixés sont les suivants:

- reconstitution la plus précise possible des volumes de crues en saison des pluies (nous rappelons ici que le programme ERREAU a comme objectif la détermination des apports),
- restitution de la dynamique des hydrogrammes,
- absence de décalage dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés.

Nous avons accordé moins d'importance à la reconstitution précise des étiages qui sont souvent très faibles, issus de longues périodes sans ou à très faibles précipitations, et généralement assez simples à reproduire pour des modèles à réservoirs.

Il existe, dans la littérature, un très grand nombre de critères. Il n'entraîne pas dans nos intentions d'en mener une étude exhaustive, ce qui est pratiquement irréalisable. Nous avons donc étudié 5 critères différents dont 3 ont déjà été souvent utilisés en modélisation hydrologique, les deux derniers ayant été construits en prenant en compte des éléments qui semblaient importants.

2.2.1. Le critère Crec

Ce critère est ainsi dénommé car c'est celui qui était utilisé, à l'origine, dans le modèle CREC. Son expression est la suivante:

$$1/N * \sum [|1-(Q_c/Q_o)| * |1-(Q_o/Q_{mo})|]$$

avec, N: nombre d'observations
 Qc: débit calculé
 Qo: débit observé
 Qmo: débit moyen observé

Cette expression tend vers 0 lorsque Qc tend vers Qo.

2.2.2. Le critère CrecBi

Ce critère n'est autre que le critère Crec auquel nous avons rajouté un terme de bilan. La formulation devient donc:

$$1/N * \sum [|1-(Q_c/Q_o)| * |1-(Q_o/Q_{mo})|] + 1/N * |\sum (Q_o - Q_c)/Q_{mo}|$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Qc tend vers Qo.

Dans un premier temps, nous avons utilisé ce terme de bilan comme coefficient de pondération multiplicateur. Son influence était alors prépondérante et nuisait à la qualité de la dynamique des hydrogrammes reconstitués. Il a donc finalement été pris en compte sous la forme d'un élément additif dont l'ordre de grandeur est comparable au premier terme du critère.

2.2.3. Le critère de Fortin

Appelé ainsi parce que proposé par FORTIN et al (1971). Son expression est la suivante:

$$1/N * \Sigma |((Q_C - Q_O)/Q_O) * (1 + (|Q_O - Q_{MO}|/Q_{MO}))|$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_C tend vers Q_O .

2.2.4. Le critère de Nash

Proposé par NASH (1969) et repris par NASH et SUTCLIFFE (1970), ce critère a pour formulation:

$$1 - [\Sigma(Q_C - Q_O)^2 / \Sigma(Q_O - Q_{MO})^2]$$

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_C tend vers Q_O .

Il est facile de faire, en ce qui le concerne, une analogie avec une régression. Le terme $\Sigma(Q_O - Q_{MO})^2$ correspond à un terme de variance de la série observée. Le terme $\Sigma(Q_C - Q_O)^2$ peut être assimilé à un terme de variance résiduelle. La formulation du critère traduit donc une certaine "efficacité" (ou "rendement") du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression.

D'un point de vue pratique, nous avons utilisé une forme modifiée du critère de Nash:

$$\Sigma(Q_C - Q_O)^2 / \Sigma(Q_O - Q_{MO})^2$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_C tend vers Q_O . Elle ne donne pas la proportion de variance expliquée par le modèle, mais le pourcentage de variance résiduelle par rapport à la variance totale.

2.2.5. Le critère SExpER (Somme des Exponentielles des Ecart Relatifs)

Ce critère a une formulation inhabituelle puisqu'il fait intervenir un terme qui le rend très sensible aux modifications sur Q_C :

$$1/N * \Sigma [\text{Exp}(|Q_C - Q_O|/Q_O) * (Q_O/Q_{MO})]$$

Le terme pondérateur Q_O/Q_{MO} est destiné à donner un poids plus important aux fortes valeurs (le débit moyen observé étant généralement très faible, le rapport Q_O/Q_{MO} atteint des valeurs importantes en période de crue et faibles durant les étiages).

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_C tend vers Q_O , mais, par souci d'homogénéité, c'est l'écart à 1 que nous avons cherché à minimiser.

Ces 5 critères numériques ont été utilisés en calage avec chacun des trois modèles présentés. L'examen des solutions optimales auxquelles nous sommes ainsi arrivés peut être envisagé sous plusieurs aspects. Nous avons, en ce qui nous concerne, privilégié l'utilisation systématique d'un module d'évaluation de la qualité des hydrogrammes ainsi reconstitués. Nous disposons alors de données permettant d'apprécier, globalement ou en fonction du modèle utilisé, les performances de tel ou tel critère. Nous y reviendrons plus loin.

3. DONNEES UTILISEES

Quatre bassins versants ont été utilisés à ce niveau du programme.

3.1. La Bagoé à Guingérini

Ce bassin versant a une superficie de 1042 km². Il est situé sur le bassin du Niger à l'Est d'Odienné.

Les deux postes pluviométriques qui ont été retenus sont Madinani (ville située sur le bassin) et Boundiali (ville située à l'extérieur du bassin vers l'Est). La lame précipitée sur le bassin a été composée à l'aide de la méthode de Thiessen avec les coefficients suivants: Madinani 0.73, Boundiali 0.27.

La période sur laquelle nous avons procédé aux calages couvre les années 1981, 1982 et 1983.

Les caractéristiques annuelles des précipitations et de l'écoulement ont été regroupées dans le tableau suivant:

Année	1981	1982	1983
Lame précipitée (mm)	1412.0	1454.0	1103.7
Lame écoulée (mm)	299.5	233.9	52.1
Coefficient d'écoulement (%)	21.2	16.1	4.7

1983 apparaît comme une année sèche à très faible écoulement. Ce qui était vérifié sur l'ensemble du territoire de Côte d'Ivoire.

3.2. La Bagoé à Kouto

Ce bassin versant a une superficie de 4700 km². Il englobe le bassin versant de la Bagoé à Guingérini, et se trouve donc lui aussi sur le bassin du Niger à l'Est d'Odienné.

Les trois postes pluviométriques qui ont été retenus sont Madinani (ville située sur le bassin), Boundiali (ville située sur le bassin) et Kouto (ville située sur le bassin). La lame précipitée sur le bassin a été composée à l'aide de la méthode de Thiessen avec les coefficients suivants: Madinani 0.36, Boundiali 0.48, Kouto 0.16.

Nous avons procédé aux calages sur deux périodes distinctes: 1973 à 1976 et 1981 à 1985. Les caractéristiques annuelles de chacune de ces périodes ont été regroupées dans les tableaux ci-dessous:

Année	1973	1974	1975	1976
Lame précipitée (mm)	1424.0	1827.4	1463.1	1290.9
Lame écoulée (mm)	141.3	126.7	183.8	111.9
Coef. écoulement (%)	9.9	6.9	12.6	8.7

Année	1981	1982	1983	1984	1985
Lame précipitée (mm)	1340.2	1315.9	970.6	1146.6	1376.8
Lame écoulée (mm)	221.1	166.5	45.0	67.1	223.4
Coef. écoulement (%)	16.5	12.7	4.6	5.9	16.2

Les années 1983 et 1984 présentent des lames écoulées et des coefficients d'écoulement particulièrement faibles.

3.3. Le Bou à Boron

Le bassin versant du Bou à Boron a une superficie de 3170 km². Il se trouve sur le bassin du Bandama, au Sud-Ouest de Khorogo.

Les deux postes pluviométriques qui ont été retenus sont Sirasso (ville située sur le bassin) et Dianra (ville située à l'extérieur du bassin vers l'Ouest. La lame précipitée sur le bassin a été composée à l'aide de la méthode de Thiessen avec les coefficients suivants: Sirasso 0.69, Dianra 0.31.

Nous avons procédé au calage sur la période 1981 à 1985, dont nous avons reproduit ci-dessous les caractéristiques.

Année	1981	1982	1983	1984	1985
Lame précipitée (mm)	1052.9	1076.4	852.6	1055.6	1437.5
Lame écoulée (mm)	113.4	49.1	11.3	39.1	157.0
Coef. écoulement (%)	10.8	4.6	1.3	3.7	10.9

Les coefficients d'écoulement des années 1982 à 1984 sont particulièrement faibles avec, en particulier, cette valeur de 1.3% en 1983 qui laisse envisager de sérieuses difficultés en matière de modélisation.

3.4. Le Lafigue à route de Badikaha

Le bassin versant du Lafigue à route de Badikaha a une superficie de 443 km². Il se trouve sur le bassin du Bandama. La ville de Khorogo est située sur le bassin.

C'est, bien entendu, le poste pluviométrique de Khorogo qui a été

retenu pour fournir les données d'entrée des modèles.

Nous avons procédé au calage sur la période de 1981 à 1984, dont nous avons reproduit les caractéristiques ci-dessous.

Année	1981	1982	1983	1984
Lame précipitée (mm)	1198.2	1170.7	835.6	1410.1
Lame écoulée (mm)	195.5	115.4	35.6	160.7
Coef. écoulement (%)	16.3	9.9	4.3	11.4

On notera, encore une fois, la sécheresse prononcée et le très faible coefficient d'écoulement de l'année 1983.

4. RESULTATS DES CALAGES

4.1. Méthodologie

Pour toute cette phase de calage, une même méthodologie a été employée:

- *) création de fichiers "pluie-débit" opérationnels couvrant la période de travail. Elaboration des fichiers d'évapotranspiration potentielle (calculée par la formule de Penman à partir des données fournies par l'ASECNA puis par l'ANAM). Constitution du fichier contenant le jeu de paramètres initiaux pour chaque modèle.
- *) recherche du jeu de paramètres optimal à l'aide des méthodes de Rosenbrock et de Nelder et Mead utilisées en séquence. Cette recherche étant faite, bien entendu, pour chacune des fonctions critères retenues. Le calcul des valeurs des critères s'effectuant au pas de temps journalier.
- *) Exploitation, au pas de temps décadaire, des résultats des calages effectués au pas de temps journalier (LEVIANDIER et MA, 1987) (le pas de temps décadaire est le pas de temps d'interprétation retenu dans le cadre du programme ERREAU en matière de simulation et de reconstitution).

4.1.1. Les fichiers de données

Les données pluviométriques et hydrométriques proviennent de banques de données distinctes gérées par les logiciels PLUVIOM et HYDROM développés à l'ORSTOM.

Dans un premier temps, la phase d'examen et de critique de ces données nous a conduit à créer des fichiers opérationnels par station. Ces fichiers ont une forme standard: ils sont au format ASCII en colonne. Une ligne contient le numéro de station, l'année considérée et le nombre de jours; il y a ensuite une ligne par donnée. Un tel format de fichier, très simplifié, présente l'avantage d'être lisible par la quasi totalité des logiciels du marché. Ces fichiers sont, en particulier, importables dans n'importe quel tableur (Multiplan, Lotus, Excel,...) ce qui facilite la production de graphiques. On peut également les lire sans difficultés à l'aide d'un éditeur de texte classique ou dans le cadre d'un programme écrit dans un langage quelconque (Pascal, FORTRAN, C, Basic,...).

A partir de ces fichiers distincts de pluviométrie et d'hydrométrie, on a élaboré un programme de fabrication de fichiers utilisables par les programmes de modélisation. Il permet d'obtenir des fichiers "pluie-débit" à partir d'un fichier de débits et d'un ou plusieurs fichiers de pluies (prise en compte des coefficients de pondération). Les fichiers issus de ce programme ont un format ASCII en colonnes de type 61.., et sont directement utilisables par les modèles globaux.

Les données d'ETP sont stockées dans des fichiers comportant une année de données par ligne, sous forme de moyennes mensuelles journalières (mm/j). Ces fichiers ont été créés en utilisant la formule de Penman pour les stations synoptiques de la zone étudiée (Odienné et Korhogo).

4.1.2. Le calage

Pour chacun des couples "modèle-fonction critère", et à partir du jeu initial de paramètres retenu, les algorithmes de calage enchainent automatiquement les méthodes de Rosenbrock et de Nelder et Mead, avec 50 itérations par paramètre à optimiser. On utilise deux fois consécutivement ces programmes de calage. Dans le deuxième passage, c'est le jeu de paramètres obtenu à la première étape qui constitue le nouveau point de départ du processus d'optimisation.

Au cours de ce processus d'optimisation, la séquence des améliorations du critère (avec le jeu de paramètres correspondant) est conservée dans un fichier. Ces fichiers permettront une exploitation ultérieure éventuelle en termes d'étude de la convergence des critères.

A l'issue de cette phase de calage, on obtient un jeu de paramètres optimal. C'est celui-ci qui est utilisé avec les algorithmes de simulation qui fournissent les fichiers de lames décennales observées et calculées, base de toute exploitation ultérieure, tant numérique que graphique.

4.2. Exploitation des résultats des calages

L'ensemble des valeurs prises par les fonctions critères à l'issue des phases de calage a été regroupé dans le tableau 1.

Plusieurs remarques s'imposent:

- Toutes les fonctions critères utilisées doivent tendre vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o . Or, en règle générale, les valeurs obtenues en fin de calage en sont relativement éloignées, signe d'une concordance souvent moyenne entre les séries observées et calculées.
- Une interprétation simple des valeurs des critères est difficile. Seul le critère de Nash peut être directement relié à une grandeur statistique: le pourcentage de variance résiduelle par rapport à la variance totale observée. Celle ci varie, selon les cas, entre 13% et 63%.
- L'association du modèle GR3 et du critère SExpER semble ne pas fonctionner correctement puisque dans 4 cas sur 5 la valeur du critère reste très élevée.
- Hormis l'association avec SExpER, on notera que le modèle GR3 a certaines difficultés avec les calages de la Bagoé à Kouto (1973-1976) et de la Bagoé à Guingerini. Il est cependant difficile de faire la part entre les influences respectives du modèle lui-même, de la fonction critère, et de l'association "modèle-critère" dans ces mauvais résultats. Ceci, a fortiori, lorsque l'on considère le résultat de GR3 sur la Bagoé à Guingerini avec le critère de Nash.

Le seul examen des valeurs prises par les fonctions critères à l'issue des calages ne peut suffire à juger de la qualité des hydrogrammes calculés. Mis à part le critère de Nash, il est difficile d'apprécier qualitativement les résultats. Les critères sont, en effet, une aide au calage dans la mesure où ils constituent un objectif à atteindre. Leurs formulations ne sont cependant pas sans influence sur l'allure et les valeurs des séries calculées. Telle fonction critère aura un poids important sur les étiages, telle autre sur les pointes de crue. Leur

Modèle	Critère de Calage					
	Fortin			Nash		
	CREC	MODGLO	GR3	CREC	MODGLO	GR3
La Bagoé à Kouto 81-85	1.3618	1.0473	1.9137	0.1368	0.1329	0.1310
La Bagoé à Kouto 73-76	1.8771	1.4039	8.4243	0.3339	0.3668	0.6324
La Bagoé à Guingérini 81-83	1.3852	1.1141	5.8032	0.1838	0.1845	0.1782
Le Bou à Boron 81-85	2.2792	1.4555	1.7889	0.1971	0.2049	0.1987
Le Lafigue à Rte de Badikaha 81-84	1.5107	1.4597	1.4518	0.3531	0.4902	0.3892

Modèle	Critère de Calage					
	SEXP			Crec		
	CREC	MODGLO	GR3	CREC	MODGLO	GR3
La Bagoé à Kouto 81-85	1.5814	0.5072	5.615E+146	0.6671	0.7166	1.3051
La Bagoé à Kouto 73-76	1.3884	0.9553	6.854E+146	0.9676	0.8943	6.9142
La Bagoé à Guingérini 81-83	1.2546	0.5108	1.1289E+39	0.7686	0.7648	5.2485
Le Bou à Boron 81-85	1.7327	1.0404	1.0013E+37	1.1634	0.8632	1.0981
Le Lafigue à Rte de Badikaha 81-84	1.2280	1.3551	1.0147	0.7963	0.8068	0.7609

Modèle	Critère de Calage		
	CrecBi		
	CREC	MODGLO	GR3
La Bagoé à Kouto 81-85	0.7362	0.6211	1.7929
La Bagoé à Kouto 73-76	1.1727	0.9429	8.3054
La Bagoé à Guingérini 81-83	0.8061	0.7815	5.6815
Le Bou à Boron 81-85	1.3589	1.1109	1.6018
Le Lafigue à Rte de Badikaha 81-84	0.8809	0.9028	0.8727

Tableau 1 :

Valeurs des fonctions critères
à l'issue des différents calages.

convergence sera plus ou moins rapide et précise, leur pertinence pouvant être variable selon l'algorithme (et donc les équations) auquel ils sont associés. En conséquence, si la valeur du critère peut permettre d'éliminer ou de rejeter certaines solutions, il faut déterminer d'autres éléments d'appréciation, permettant de juger de la qualité des hydrogrammes calculés, d'un point de vue "hydrologique". Le premier de ces éléments qui vient à l'esprit est l'examen des tracés des séries chronologiques observées et calculées.

Dans un prochain rapport, moins focalisé sur l'aspect "critères numériques", nous reviendrons sur la mise au point d'un module d'évaluation des performances des modèles.

Nous ne présenterons pas ici l'ensemble des graphiques, ce qui serait très fastidieux et ce qui, dans certains cas, n'apporterait rien.

Pour chaque bassin et pour chaque modèle, on a retenu deux tracés correspondant à deux critères différents. On trouvera à titre d'exemple:

- figures 4 et 5: la Bagoé à Kouto, modèle CREC, critère de Nash;
- figures 6 et 7: la Bagoé à Guingérini, modèle MODGLO, critère CrecBi;
- figures 8 et 9: le Bou à Boron, modèle GR3, critère de Nash.

Au vu de ces tracés on perçoit mieux la très forte particularité de l'année 1983, et, à un degré moindre, de l'année 1984. On mesure aisément le biais important introduit dans le calage à ce niveau.

D'autres tracés, deux par modèle et pour chaque bassin, ont été regroupés en Annexe 1. L'examen de ces tracés, bassin par bassin, permet de tirer certaines conclusions.

4.2.1. La Bagoé à Kouto 1973-1976

L'ensemble des calages obtenus sur la Bagoé à Kouto est d'une qualité très moyenne, quels que soient le critère et les modèles considérés.

A titre d'exemple on trouvera en Annexe 1 les meilleurs hydrogrammes calculés, obtenus pour chacun des modèles avec le critère de Nash. Ils présentent tous les mêmes caractéristiques, à savoir:

- des étiages surestimés,
- l'hydrogramme de 1974 surestimé,
- les hydrogrammes de 1973, 1975, et 1976 sous-estimés.

L'année 1974 a un coefficient d'écoulement relativement faible (6.9%) qui peut introduire un biais important dans le processus d'optimisation. Ceci pourrait expliquer le dysfonctionnement systématique: 1974 d'une part, 1973, 1975 et 1976 d'autre part.

4.2.2. La Bagoé à Kouto 1981-1985

Les hydrogrammes calculés sont généralement d'assez bonne qualité malgré la prise en compte de deux années très faibles en 1983 et 1984.

Les années 1981 et 1982 sont généralement un peu sous-estimées (exemple de GR4 + SExpER) alors que 1985 se révèle un peu excédentaire (CREC + Crec).

On n'observe généralement pas ou peu de décalages. La dynamique des

Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle CREC Critère de Nash

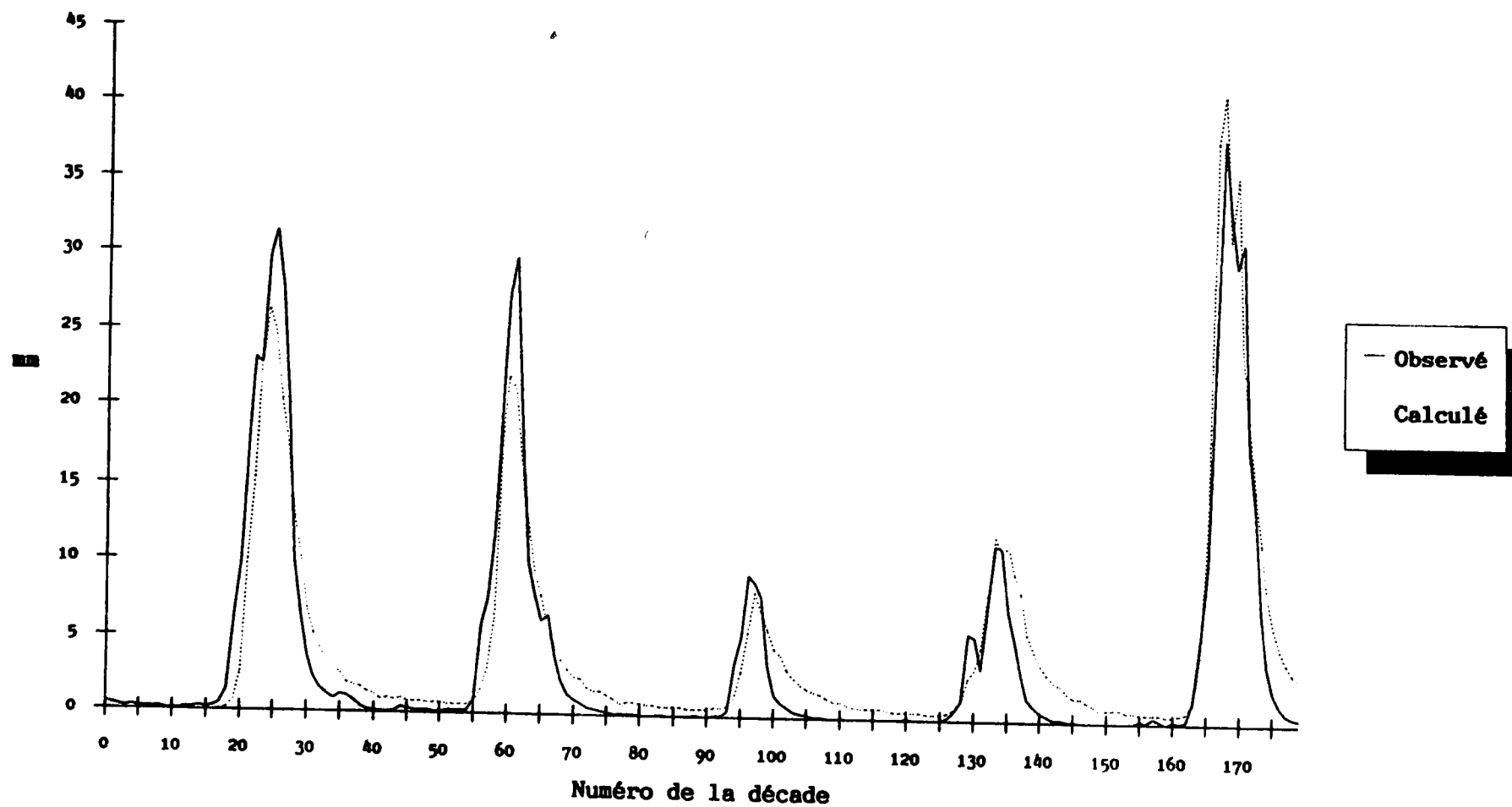


Figure 4.

Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle CREC
Critère de Nash

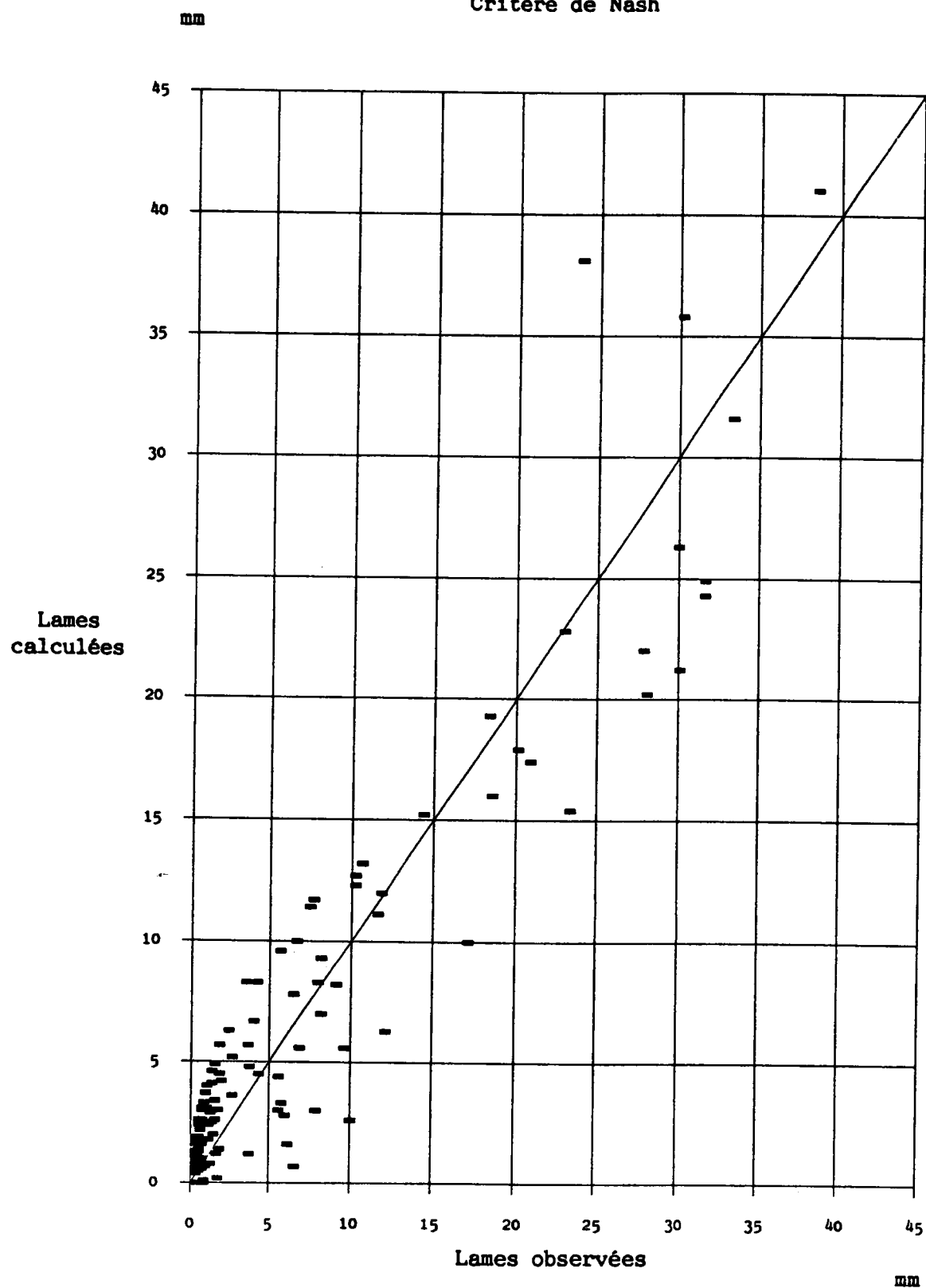


Figure 5.

Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle MODGLO Critère CrecBi

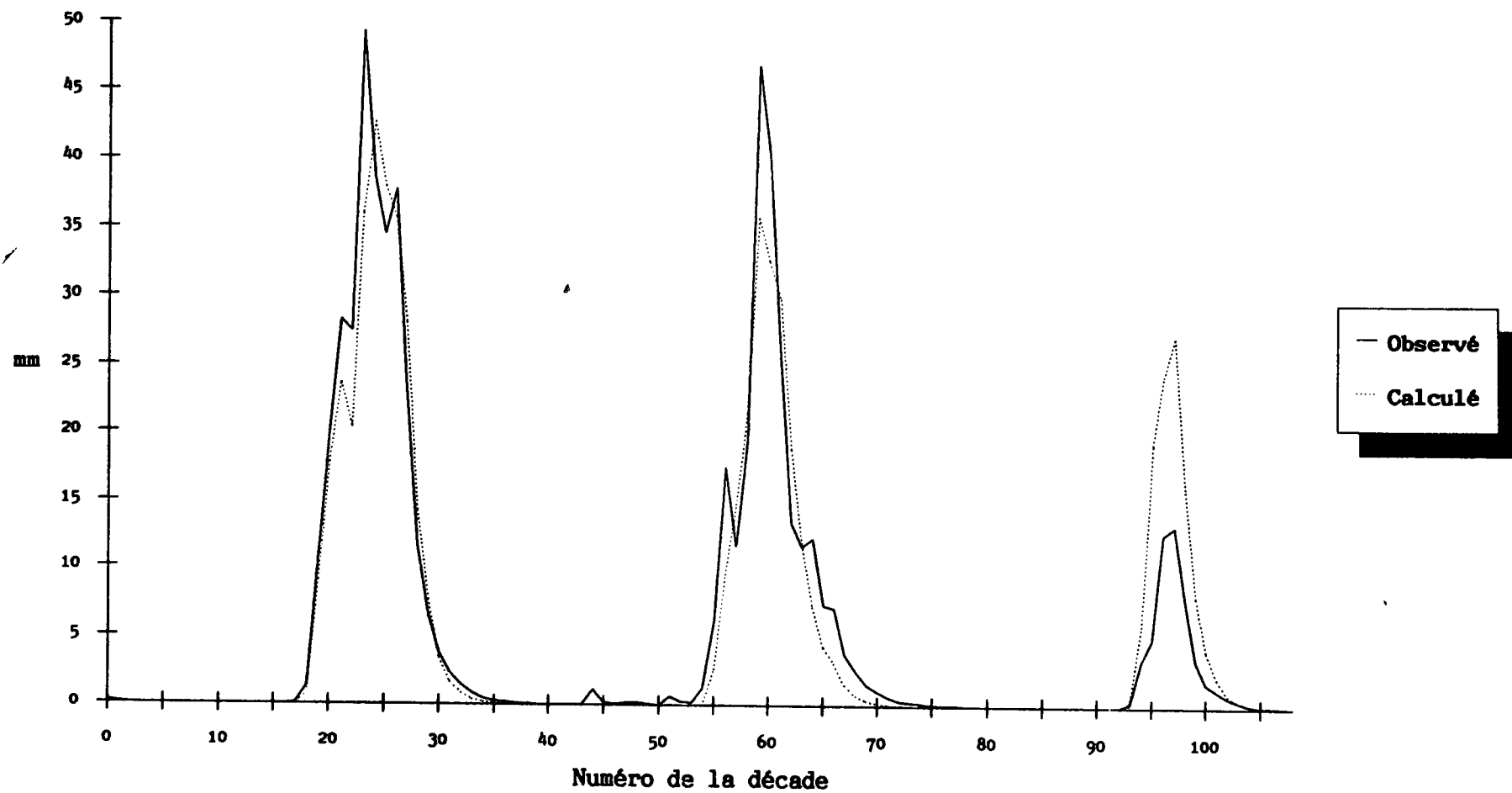


Figure 6.

Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle
MODGLO Critère CrecBi

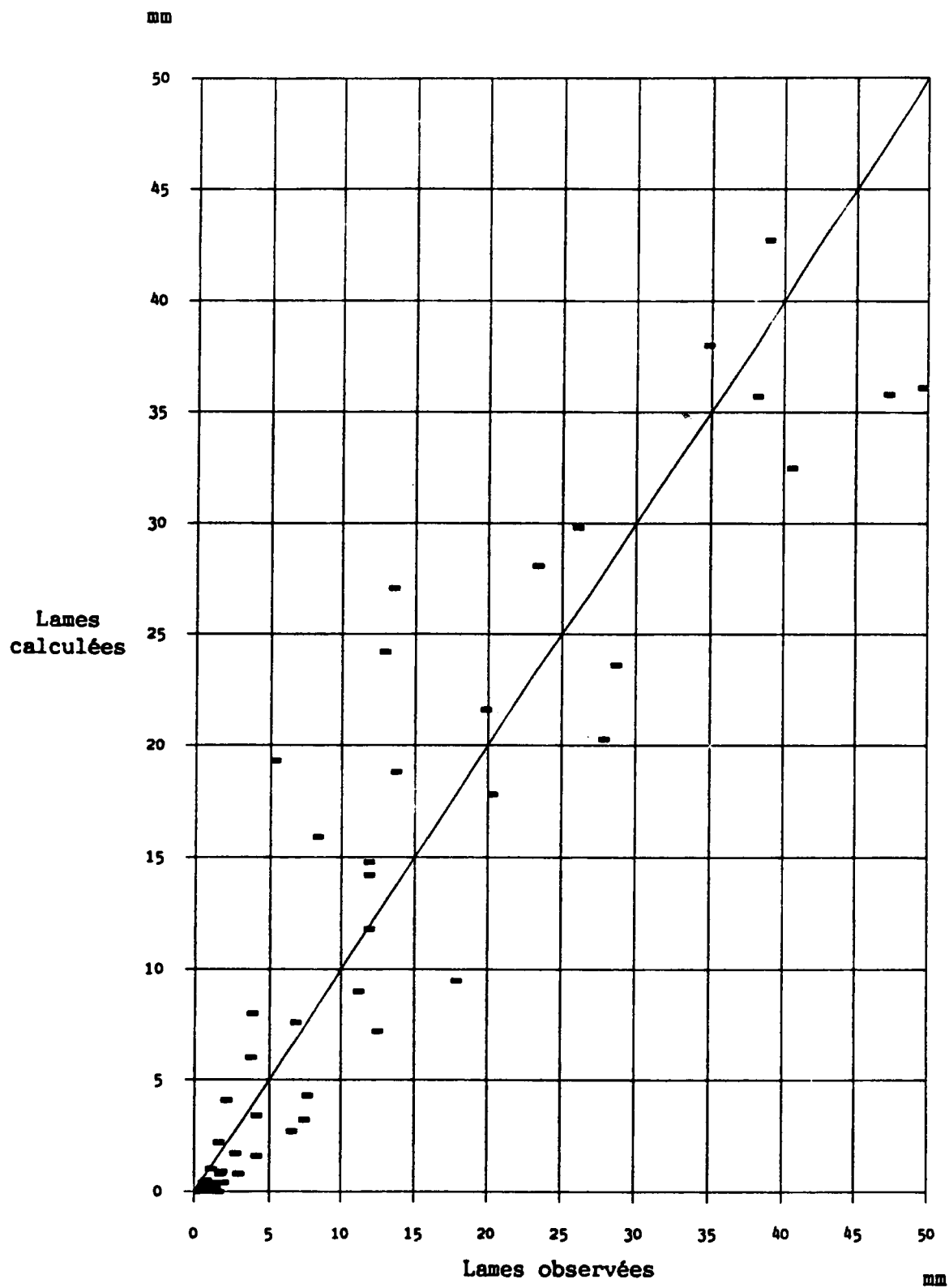


Figure 7.

Lames décadaires - Le Boul à Boron 1981 à 1985 - Modèle GR3 Critère de Nash

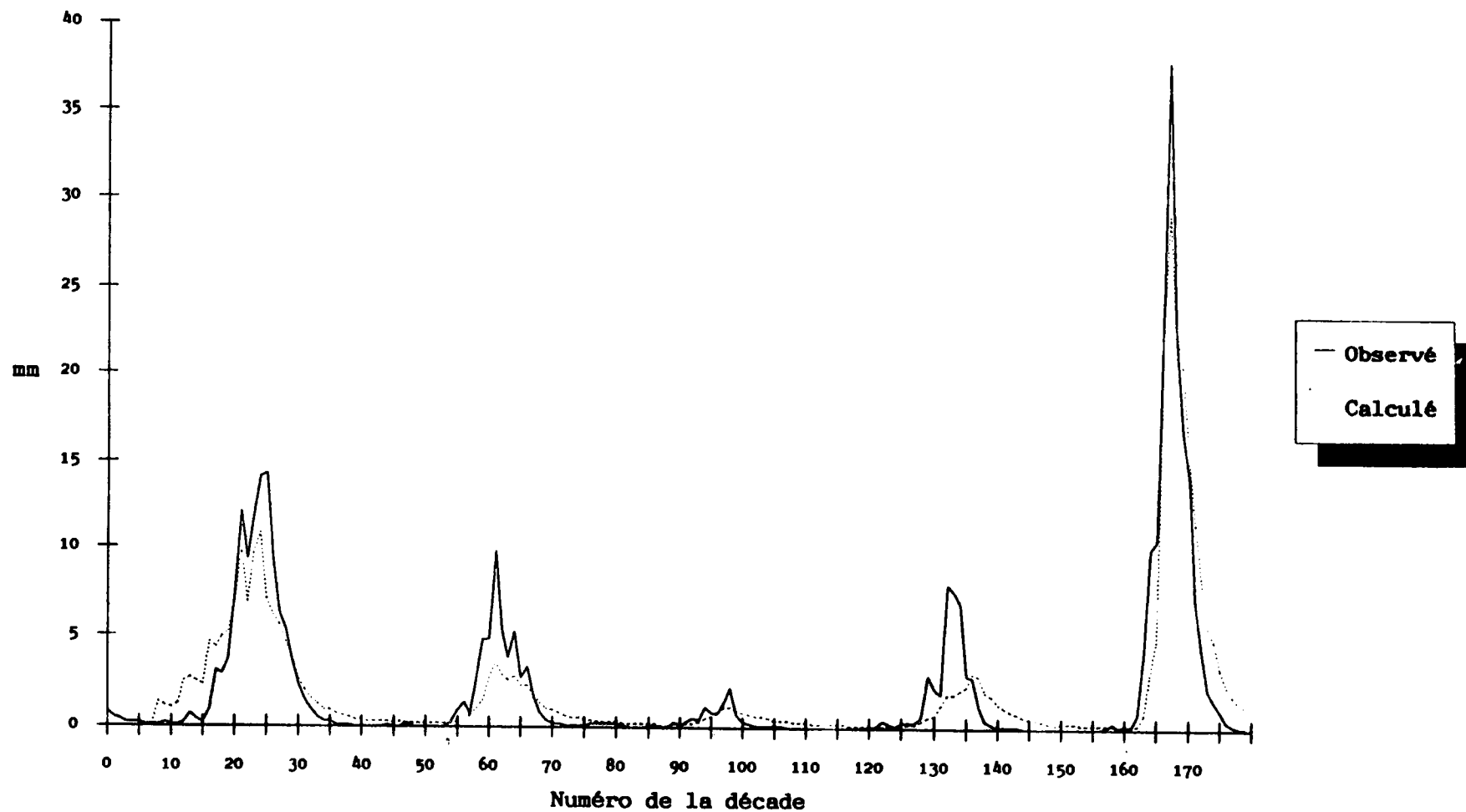


Figure 8.

Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle GR3
Critère de Nash

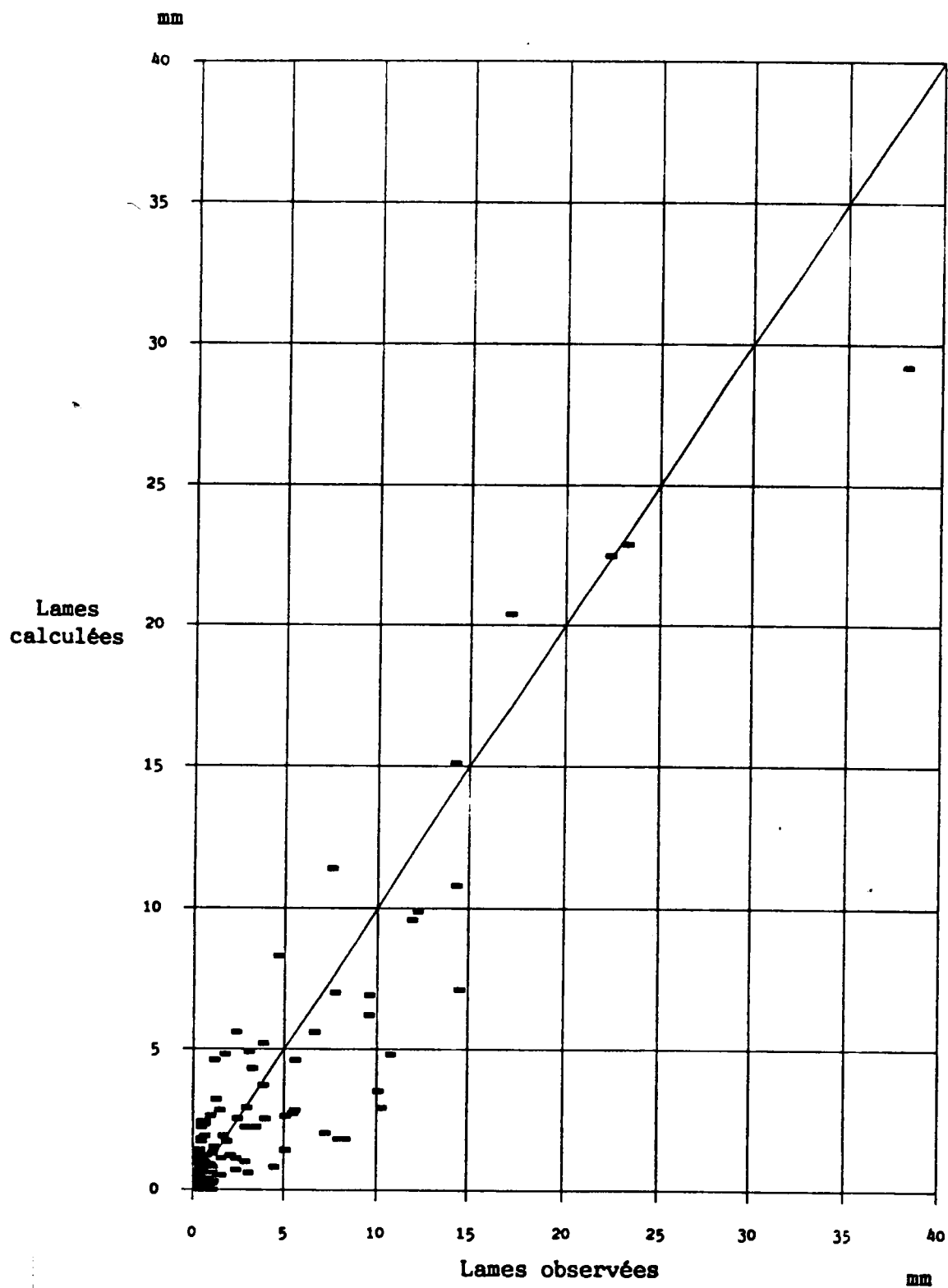


Figure 9.

hydrogrammes est bonne, notamment en décrue, malgré, parfois, un excédent pour les étiages (CREC + Nash).

4.2.3. La Bagoé à Guingérini 1981-1983

Dans tous les cas présentés, 1983, année au coefficient d'écoulement particulièrement faible (4.7%), apparaît comme surestimée. Son influence dans le processus de calage est certainement importante, et a pour conséquence une légère et systématique sous-estimation des hydrogrammes calculés en 1981 et 1982. Cependant, le niveau d'adéquation atteint pour ces deux années, laisse supposer que les algorithmes utilisés, sont en mesure de reproduire correctement les hydrogrammes observés pour des années "normales".

4.2.4. Le Bou à Boron 1981-1985

Les coefficients d'écoulement des années 1982 à 1984 sont particulièrement faibles (4.6%, 1.3%, 3.7%). Quant à l'année 1985 elle est beaucoup plus pluvieuse que les 4 années qui la précèdent. Cette série chronologique présente donc des comportements extrêmes et opposés qui rendent la tâche plus difficile en matière d'optimisation des paramètres.

Etant donné la particularité de la période disponible pour le calage, les résultats obtenus avec l'association "modèle CREC + critère de Nash" sont plutôt satisfaisants. Seule l'année 1981 est largement sous-estimée.

On retrouve cette même tendance, plus ou moins accentuée, dans chacun des cas présentés avec, toutefois:

- l'année 1985 très surestimée avec "CREC + CrecBI",
- des étiages très surestimés (mauvaises conditions initiales ?) avec "MODGLO + Nash",
- des hydrogrammes sous-estimés avec "MODGLO + SExpER",
- une tendance à la sous-estimation (en particulier en 1981) avec "GR3 + Crec".

4.2.5. Le Lafigue à route de Badikaha 1981-1984

Ce bassin versant est d'une taille nettement inférieure aux précédents, ce qui explique le tracé plus irrégulier des hydrogrammes observés.

C'est l'association CREC + Nash qui permet d'obtenir le meilleur tracé d'hydrogramme calculé. L'année 1983 pose, une nouvelle fois, des problèmes qui se révèlent difficiles à résoudre pour les algorithmes utilisés.

L'association MODGLO + Nash conduit à une forte surestimation des étiages.

5. COMPORTEMENT DES CRITERES NUMERIQUES

5.1. Caractérisation graphique

Quel que soit le modèle utilisé, l'examen des tracés des séries observées et calculées dégage certains enseignements relatifs au comportement des fonctions critères

- A) Le critère Crec se révèle un peu "réducteur" dans la mesure où l'hydrogramme calculé a un volume qui est souvent inférieur à l'observé. Il respecte, par contre, assez bien la dynamique des hydrogrammes.
- B) La prise en compte du terme de bilan sous une forme purement additive dans CrecBi lui accorde certainement une influence excessive. Cela se traduit, dans certains cas, par une compensation en terme de bilan (et donc de volume de crue) qui se répercute sur une seule année.
- C) Le critère de Fortin a un comportement similaire au critère Crec, en ce sens qu'il est généralement assez "réducteur".
- D) Le critère de Nash se révèle très performant en matière de dynamique d'hydrogramme et de pointes de crues. Son comportement est, par contre, plus mauvais lorsque l'on s'intéresse aux étiages.
- E) Le critère SExpER a un comportement qui est assez comparable à ceux des critères Crec et Fortin.

5.2. Caractérisation hydrologique

Partant de l'hypothèse que nous avons, dans chacun des cas, obtenu un calage optimal pour chaque association "modèle-critère", il nous a paru intéressant de chercher à évaluer les performances des critères proprement dits pour une série d'observations et pour un modèle donné.

Nous avons, pour cela, défini un module d'évaluation comparative de la qualité des calages obtenus, dont les éléments ont été choisis en fonction de caractéristiques hydrologiques.

Cette approche est assez voisine de celle de DISKIN et SIMON (1977), mais elle paraît plus appropriée car réalisée par référence à des éléments hydrologiques et non à la seule valeur du critère. En effet, et ainsi que nous l'avons déjà dit, le critère n'est qu'un "objet" numérique d'aide au calage. Dans ces conditions, il peut paraître arbitraire d'établir un jugement ou une sélection par rapport à sa seule valeur.

5.2.1. Le module d'évaluation comparative

Ce module d'évaluation comparative est bâti autour de plusieurs éléments d'appréciation du calage que nous allons détailler.

5.2.1.1. Le coefficient de corrélation lames observées-lames calculées

Ce coefficient permet de prendre en compte, principalement, les décalages dans le temps entre hydrogrammes observés et calculés, et, à un degré moindre, les écarts quantitatifs entre les deux séries.

5.2.1.2. L'écart entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 observés et calculés

Les écarts d'ordre 1 sont assez peu significatifs. Nous avons donc utilisé les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 comme témoins de la

dynamique des hydrogrammes, en particulier en décrue.

5.2.1.3. Deux coefficients d'appréciation du bilan volumique

$$\text{Bilan1} = |\Sigma(L_O - L_C)|$$

$$\text{Bilan2} = \Sigma |(L_O - L_C)|$$

avec: L_O = lame écoulée observée (mm)

L_C = lame écoulée calculée (mm)

Bilan1 et Bilan2 tendent vers 0 quand L_C tend vers L_O .

Ces deux bilans sont calculés sur la totalité de la période de calage.

Le seul Bilan1 ne peut suffire car des compensations numériques peuvent intervenir qui donneront une faible valeur à ce coefficient sans que, pour autant, l'hydrogramme calculé soit de bonne qualité.

Le seul Bilan2 ne peut suffire non plus dans la mesure où l'on peut accepter, malgré tout, de légères oscillations de part et d'autre de la courbe observée. Celles-ci confèreraient donc une valeur élevée à Bilan2 alors que l'allure générale de l'hydrogramme observé et le volume de la crue seraient bien restitués.

5.2.1.4. L'Indice de Reconstitution du Volume de Crue (IRVC)

Comme nous l'indiquions plus haut, les objectifs de ce programme concernent principalement la détermination des apports. Dans notre approche, nous avons donc privilégié les crues par rapport aux étiages.

Pour la région concernée, et afin de nous limiter dans le temps, nous avons défini comme lame de crue, la lame écoulée entre les décades 19 et 30 incluses (c'est à dire du 1^{er} Juillet au 31 Octobre). Le tableau 2 montre que pour les bassins étudiés la lame écoulée durant cette période est toujours de l'ordre ou supérieure à 80%.

	Lame écoulée totale (mm)	Lame écoulée décades 19-30	% écoulé entre 1/07 et 31/10
Bagoé à Kouto 1981-1985	723.0	668.5	92.5
Bagoé à Kouto 1973-1976	563.1	485.0	86.1
Bagoé à Guingérini 1981-1983	585.3	552.1	94.3
Bou à Boron 1981-1985	370.1	340.4	92.0
Lafigue rte Badik. 1981-1984	506.9	386.9	76.3

Tableau 2: Lames écoulées du 1/07 au 31/10

Nous avons donc cherché un moyen d'apprécier la reconstitution de ce volume de crue à l'issue des différents calages, et nous avons défini pour cela l'Indice de Reconstitution du Volume de Crue (IRVC).

Cet indice est défini sur l'ensemble de la période considérée. Pour chaque année on évalue l'écart en % entre la crue calculée et la crue observée. Pour chacune des années, la valeur absolue de cet écart est pondérée par un coefficient traduisant l'importance de la crue annuelle par rapport au volume de crue écoulé sur toute la période. L'IRVC est la somme de ces écarts pondérés. ²⁷

Pour une série observée de n années, on aura:

$$IRVC = \sum_{i=1 \text{ à } n} \left[\frac{\text{Crue année } i}{\sum_{i=1 \text{ à } n} \text{Crues annuelles}} \times 100 \left| \frac{\text{Crue année } i \text{ Calc.}}{\text{Crue année } i \text{ Obs.}} - 1 \right| \right]$$

c'est à dire:

$$IRVC = \sum_{i=1 \text{ à } n} \text{Coef. pondération } i * \left| \text{Ecart "Observé-Calculé" année } i \text{ en \%} \right|$$

IRVC tend vers 0 lorsque la crue calculée tend vers la crue observée.

A titre indicatif, une erreur systématique de 10% sur les crues annuelles d'une série donnée correspond à une valeur de 10 pour l'IRVC.

5.2.2. Evaluation des critères

5.2.2.1. Méthodologie

Ayant défini un module d'évaluation comparative des performances des critères représentatif de caractéristiques hydrologiques, nous avons alors suivi une méthodologie calquée sur celle de DISKIN et SIMON (1977).

Pour une période et pour un modèle donné, nous avons donc procédé comme suit:

- les valeurs des différents termes du module sont calculées pour chacun des critères;
- pour chaque terme du module, on établit un classement des performances des critères auxquels on attribue donc un rang (rang 1 pour le meilleur, rang 5 pour le plus mauvais);
- pour chaque critère, on somme les différents rangs obtenus, et on obtient ainsi une "note" comprise entre 5 et 25 (5 dans le meilleur des cas, 25 dans le pire).

L'ensemble des doubles tableaux (valeurs des termes du module d'évaluation - rangs des critères) a été reporté en Annexe 2. On trouvera cependant ici, et à titre d'exemple:

Tableau 3: La Bagoé à Kouto, modèle CREC, 1981-1985;

Tableau 4: La Bagoé à Guingérini, modèle MODGLO, 1981-1984;

Tableau 5: Le Bou à Boron, modèle GR3, 1981-1985;

5.2.2.2. Interprétation

Le tableau 6 fait apparaître les classements respectifs de chaque critère et leur fréquence.

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.939	0.946	0.942	0.945	0.674
Diff aut cor2	0.03229	0.02598	0.02141	0.00630	0.19372
Bilan1	44.7	84.2	1.1	86.1	635.4
Bilan2	232.7	267	248.3	309.7	635.4
IRVC	22.1	25.7	27.8	15.7	87.2

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	4	1	3	2	5
Diff aut cor2	4	3	2	1	5
Bilan1	2	3	1	4	5
Bilan2	1	3	2	4	5
IRVC	2	3	4	1	5
Somme	13	13	12	12	25

Tableau 3 : Valeurs des termes du module d'évaluation.
Rangs des critères.
Bagoé à Kouto - 1981-1985 - Modèle CREC.

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.944	0.945	0.946	0.948	0.943
Diff aut cor2	0.03439	0.03438	0.02614	0.01832	0.02647
Bilan1	86.3	76.5	0.1	18.5	131.8
Bilan2	178.1	174.5	179.3	174.5	193.4
IRVC	26.7	25.8	17.8	20.2	30.6

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	4	3	2	1	5
Diff aut cor2	5	4	2	1	3
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	3	1	4	1	5
IRVC	4	3	1	2	5
Somme	20	14	10	7	23

Tableau 4 :

Valeurs des termes du module d'évaluation.
Rangs des critères .
Bagoé à Guinguérini - 1981-1983 - Modèle MODGLO.

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.913	0.918	0.719	0.925	0.694
Diff aut cor2	0.11141	0.11016	0.18331	0.04176	0.20355
Bilan1	155.7	146.4	23.1	15.8	105.2
Bilan2	173.9	166	237.7	180.6	233.6
IRVC	41.8	39.7	36.2	20.7	32.3

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	2	4	1	5
Diff aut cor2	3	2	4	1	5
Bilan1	5	4	2	1	3
Bilan2	2	1	5	3	4
IRVC	5	4	3	1	2
Somme	18	13	18	7	19

Tableau 5 :

Valeurs des termes du module d'évaluation.
Rangs des critères.
Bou à Boron - 1981-1985 - Modèle GR3.

Critère Rang	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	1	2	12	1
2	1	5	4	2	4
3	6	4	6	1	-
4	5	2	3	-	2
5	3	3	-	-	8

Tableau 6: Fréquences absolues des classements des critères

Les ex-aequo n'ont pas été départagés, ce qui explique que le total par ligne ne soit pas toujours égal à 15.

Le critère de Nash semble s'imposer nettement au vu de l'examen du Tableau 6, étant classé 1^{er} 12 fois sur 15, et en étant, au pire, classé 3^{ème}.

Derrière lui, les critères CrecBi et Fortin, respectivement classés 12 et 10 fois dans les trois premiers semblent avoir les meilleurs comportements.

Une étude plus détaillée peut être menée en examinant le comportement des critères relativement à chaque élément du module d'évaluation.

A) le coefficient de corrélation

Critère Rang	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	1	2	-	12	-
2	-	4	5	2	4
3	9	3	1	-	2
4	4	4	4	-	3
5	1	2	5	1	6
valeur min.	0.400	0.391	0.570	0.760	0.470
valeur max.	0.944	0.946	0.946	0.955	0.943

Tableau 7: Fréquences absolues des classements des critères pour le coefficient de corrélation

Le critère de Nash semble très supérieur aux autres en matière de corrélation entre lames observées et calculées. Il apparaît 12 fois sur 15 en première position et il présente l'intervalle de valeurs le plus réduit (0.760-0.955). Les autres critères ont des performances qui sont tout à

fait comparables entre elles, mais qui sont nettement inférieures au ³² critère de Nash.

B) Ecart entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 observés et calculés

Critère Rang	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	1	-	4	6	4
2	2	5	3	2	3
3	6	3	2	-	4
4	3	5	3	4	-
5	3	2	3	3	4
valeur min.	0.016	0.007	0.021	0.003	0.001
valeur max.	0.134	0.699	0.183	0.123	0.203

Tableau 8: Fréquences absolues des classements des critères pour les écarts sur les coefficients d'autocorrélation

Les critères Crec et Fortin semblent assez peu performants en matière d'autocorrélation. Il est, par contre assez difficile de séparer les trois autres. On notera simplement que le critère de Nash présente l'intervalle de variation le plus réduit. Les performances de ces trois critères sont assez bonnes en ce qui concerne la prise en compte de la dynamique des hydrogrammes.

C) Bilan1 et Bilan2

$$\text{Bilan1} = |\Sigma(L_O - L_C)|$$

Critère Rang	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	-	11	4	-
2	1	-	1	10	3
3	3	8	3	-	1
4	7	6	-	1	1
5	4	1	-	-	10
valeur min.	20.0	18.8	0.1	6.1	70.1
valeur max.	792.7	729.0	723.7	138.7	692.2

Tableau 9: Fréquences absolues des classements des critères pour Bilan1

CrecBi et Nash apparaissent très nettement comme les deux critères respectant le mieux le volume écoulé, en admettant, au besoin, des compensations d'un pas de temps sur l'autre. Une fois encore, c'est Nash, qui s'il ne descend pas, ponctuellement, au niveau de précision de CrecBi, présente le plus petit intervalle de variation.

$$\text{Bilan2} = \sum |(L_O - L_C)|$$

Critère Rang	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	1	4	1	11	-
2	3	4	3	-	3
3	6	2	2	1	4
4	3	4	2	3	3
5	2	1	7	-	5
valeur min.	173.9	166.0	179.3	174.5	193.4
valeur max.	826.3	779.0	774.5	412.5	435.8

Tableau 10: Fréquences absolues des classements des critères pour Bilan2

Une fois encore, le critère de Nash s'impose nettement. C'est celui grâce auquel le tracé calculé suit nettement le tracé observé. C'est, en effet, avec ce critère que, 11 fois sur 15, la somme des écarts absolus entre valeurs observées et calculées est la plus faible. L'association avec Bilan1 indique également qu'il y a moins de compensations numériques que pour les autres critères. La qualité du calage obtenu avec le critère de Nash est donc meilleure que celle des autres critères numériques utilisés.

D) IRVC

Critère Rang	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	-	2	13	-
2	4	5	2	1	4
3	4	4	4	1	1
4	3	5	3	-	4
5	4	1	4	-	6
valeur min.	19.6	24.7	12.6	14.6	25.7
valeur max.	154.7	144.1	142.9	48.6	119.2

Tableau 11: Fréquences absolues des classements des critères pour IRVC

34

Au regard de l'Indice de Reconstitution du Volume de Crue, le critère de Nash fait état d'une certaine supériorité. Il n'atteint jamais de valeurs très élevées et devance très nettement les autres critères. Le calage à l'aide de cette fonction critère semble donc permettre une meilleure prise en compte de la lame de crue.

5.3. Convergence

L'utilisation d'une fonction critère particulière est également liée à sa capacité de convergence rapide vers une solution stable. Disposant des enregistrements des progressions vers la solution finalement retenue, nous avons tracé quelques uns de ces processus de convergence.

Sur ce point, les différents critères ont généralement un comportement assez similaire. Leur vitesse de convergence est du même ordre, ainsi qu'en témoignent les tracés que nous avons retenus. Ils concernent la Bagoé à Kouto (période 1981 à 1985) calée avec chacun des trois modèles utilisés. (Figures 7, 8 et 9).

Si, du point de vue des modèles, la convergence apparaît plus rapide pour GR3, cela est uniquement dû au nombre plus réduit de paramètres à optimiser que compte cet algorithme.

La capacité de convergence des critères n'apparaît donc pas comme un élément supplémentaire permettant d'effectuer une sélection parmi les différentes fonctions étudiées.

Figure 10 : Modèle CREC - Convergence des critères.

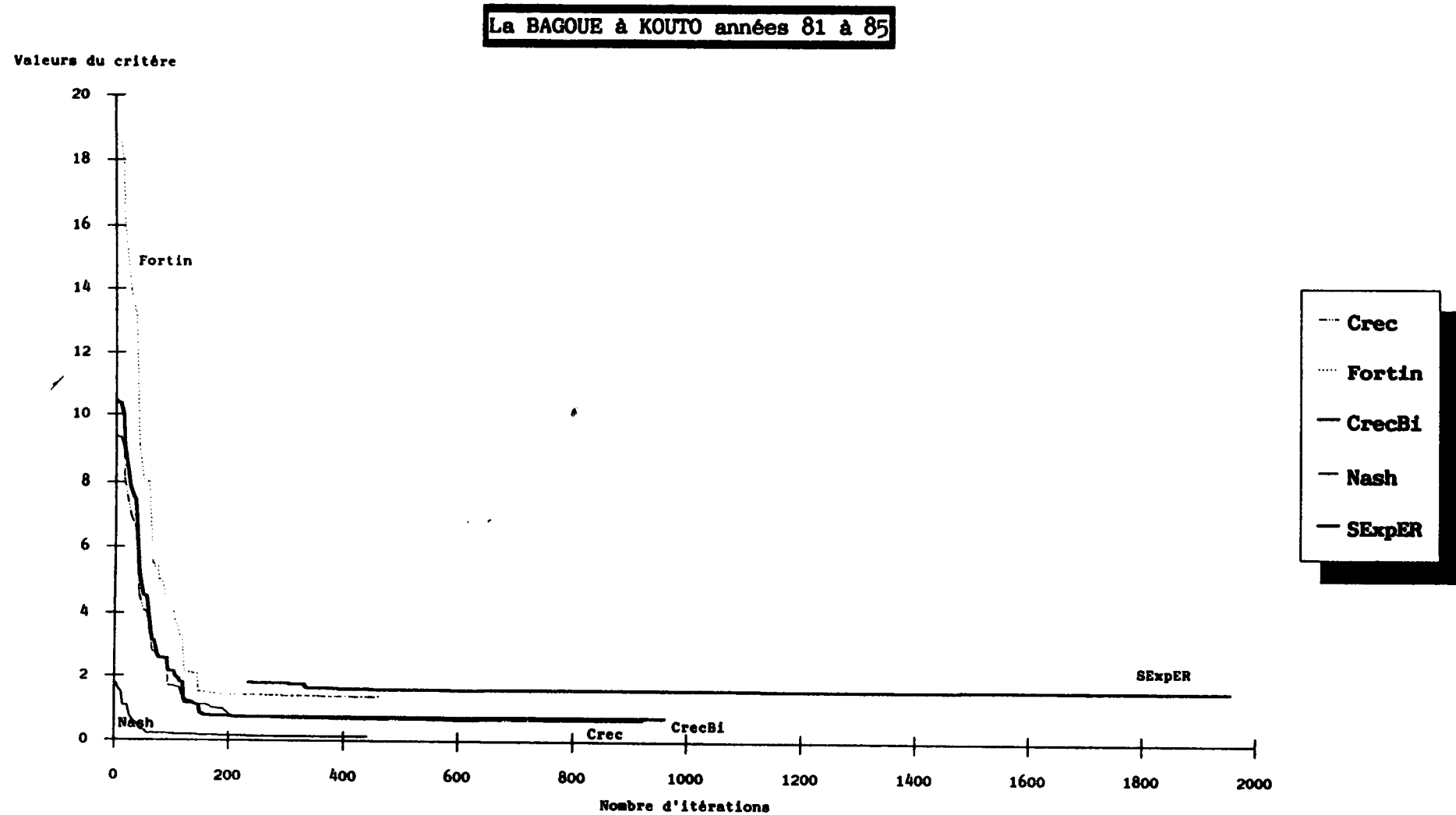


Figure 11 : Modèle MODGLO - Convergence des critères.

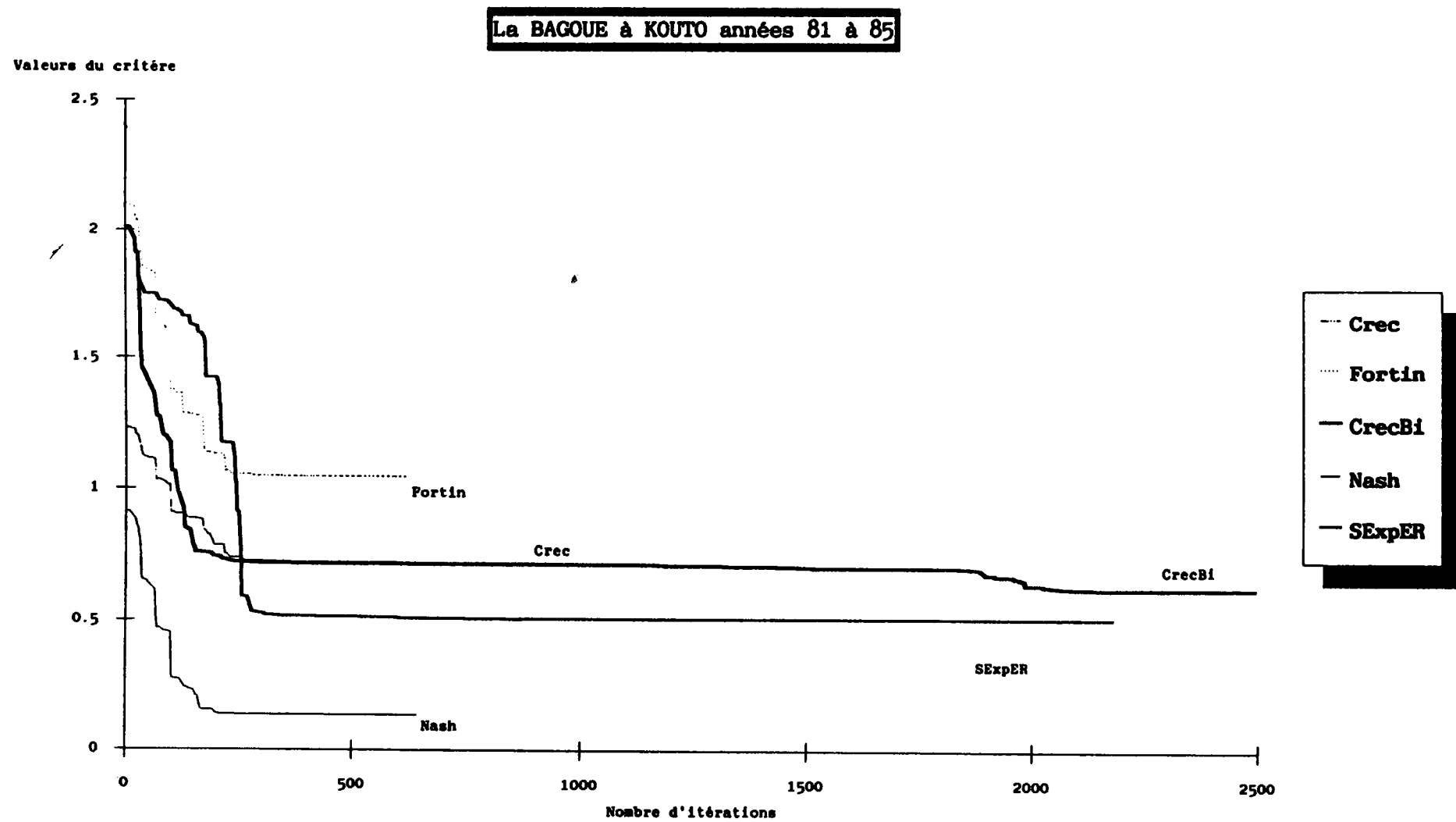
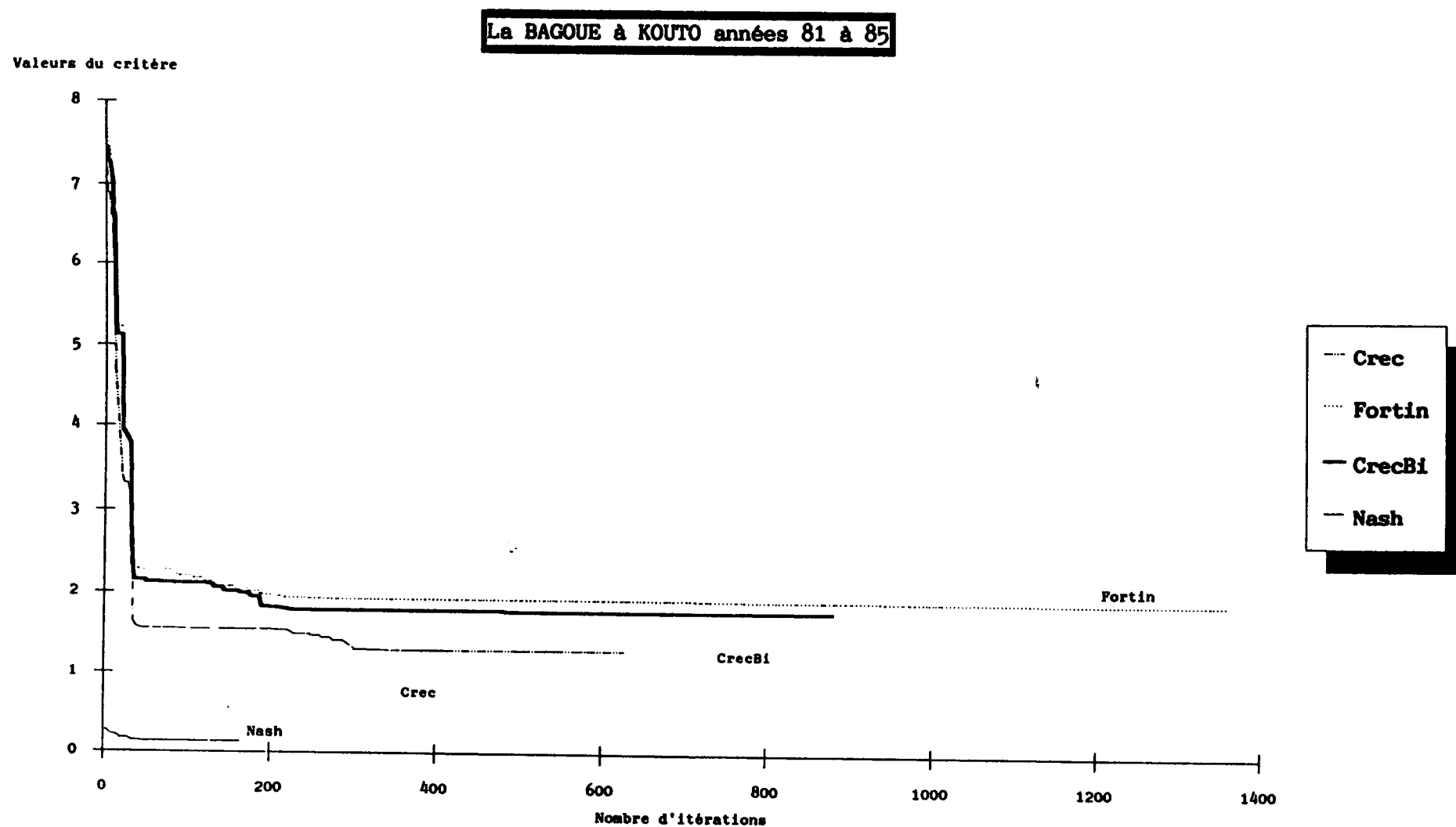


Figure 12 : Modèle GR3 - Convergence des critères.



CONCLUSION

Un premier travail de calage des modèles "pluie-débit" a porté sur un nombre réduit de bassins versants préalablement retenus dans le cadre d'ERREAU. L'objectif était multiple: apprécier globalement les performances des modèles et être à même de redéfinir certaines orientations pour la suite du programme, mais aussi évaluer les performances de différents critères de calage. C'est ce dernier aspect qui a été traité dans ce rapport.

Parmi ceux que nous avons utilisés, on peut distinguer trois sortes de critères:

- la première regroupe les critères Crec, Fortin et SExpER. Ils sont bâtis autour de l'écart relatif entre lame observée et lame calculée. Les coefficients de pondération utilisés diffèrent;
- la seconde concerne le critère CrecBi. Celui-ci n'est autre que le critère Crec auquel nous avons ajouté un terme de bilan;
- la troisième est représentée par le critère de Nash dont la formulation est liée à une approche statistique classique.

Les périodes pour lesquelles nous avons procédé au calage sont souvent critiques pour de classiques modèles à réservoirs, du type de ceux utilisés ici. Elles sont, en effet, caractérisées par une période exceptionnellement sèche observée principalement en 1983, mais aussi en 1984. Les coefficients d'écoulement y sont extrêmement faibles, la lame écoulée ne représentant plus alors qu'une partie presque négligeable du bilan hydrologique. C'est dire l'importance vraisemblable de l'évapotranspiration dont, malheureusement, la conceptualisation des mécanismes est généralement le parent pauvre des modèles "pluie-débit" élaborés par les hydrologues.

Malgré cette particularité, plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette étude au caractère systématique. Les performances des différents modèles utilisés n'ont rien d'exceptionnelles mais, de manière générale, on peut les estimer satisfaisantes. On note une certaine difficulté, pour les 3 algorithmes employés, à "redémarrer" après la saison sèche. Les premières crues sont souvent mal reproduites. La longue période de désaturation que l'on observe dans le Nord de la Côte d'Ivoire (peu ou pas de pluie pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois) pose de sérieux problèmes aux modèles construits sur un schéma de type à réservoir. Il est, de plus, difficile d'intégrer une année aussi exceptionnelle que 1983 dans une courte période de calage. Nous reviendrons dans un autre rapport sur les calages respectifs années sèches/années humides. L'ensemble de ces considérations sur les modèles sera, en effet, approfondi dans un rapport qui leur sera consacré.

Concernant les critères on note plusieurs points:

- les critères Crec, Fortin et SExpER ont un comportement très voisin et que nous qualifierons de "réducteur" dans la mesure où l'hydrogramme calculé est généralement inférieur à l'hydrogramme observé;
- dans CrecBi, la prise en compte d'un terme de bilan s'est montrée relativement inadaptée puisqu'elle conduit souvent à des compensations numériques par rapport à l'hydrogramme observé;

- le critère de Nash présente un bon comportement d'ensemble bien qu'il montre quelques faiblesses en étiage.

Une étude systématique à l'aide d'un module d'évaluation des performances des critères a confirmé ces premières conclusions.

Le tableau 6 montre clairement que le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage. Ce qui est confirmé lorsque l'on considère chaque élément du module pris séparément:

- coefficient de corrélation: le critère de Nash est très supérieur aux autres. Son utilisation n'introduit que peu de décalages entre hydrogrammes observés et calculés.
- coefficient d'autocorrélation: les critères CrecBi, Nash et SExpER sont les plus performants, avec, néanmoins, un avantage à Nash qui présente les écarts les plus faibles avec le coefficient observé. Il respecte donc bien la dynamique des hydrogrammes.
- Bilan1: le critère CrecBi apparaît comme largement supérieur aux autres. Il atteint, ponctuellement, des valeurs très faibles, mais il n'exclut pas des écarts importants. Le critère de Nash est plus régulier, ce que traduit son intervalle de variation plus réduit. Si, parfois, sa précision est inférieure à celle atteinte par CrecBi, il ne présente pas de valeurs excessivement élevées.
- Bilan2: on confirme, ici, ce que l'on observe avec Bilan1. Le critère de Nash a le meilleur comportement, ce qui se traduit par la plus faible somme des écarts absolus entre valeurs observées et calculées. Il présente moins de compensations numériques par rapport à l'hydrogramme observé que ne le fait CrecBi.
- IRVC: la prise en compte de cet indice est importante vu l'objectif affiché en matière de détermination d'apports par le programme ERREAU. On note là, une très nette supériorité du critère de Nash pour lequel on a toujours $IRVC < 50$, ce qui est loin d'être le cas avec les autres critères. Il permet donc une meilleure prise en compte de la lame de crue.

Arrivés au terme de ce rapport, la prédominance du critère de Nash sur les autres formulations testées ne semble guère faire de doute, au regard des objectifs visés:

- reconstitution la plus précise possible des volumes de crue en saison des pluies;
- restitution de la dynamique des hydrogrammes ;
- absence de décalage dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés.

En conséquence, c'est ce critère qui sera utilisé pour la suite des opérations de modélisation réalisées dans le cadre d'ERREAU.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COMBES V. 1985

"Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. application au modèle CREC". Thèse Docteur-Ingénieur en Sciences de l'Eau et Aménagement. USTL. Montpellier.

CORREIA F.N., MOREL-SEYTOUX H.J. 1984

"User's manual for OMEGA, a package of FORTRAN 77 programs for simulation, parameter calibration and real-time forecast of river flows". HYDROWAR program report, CER84-85FNC-HJM8, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

DEZETTER A. 1987

"Modèle global ORSTOM 74. Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation". DEA National d'Hydrologie. USTL. Montpellier.

DISKIN M.H., SIMON E. 1977

"A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models". J. Hydrol., 34: 129-149.

EDIJATNO, MICHEL C. 1989

"Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres". La Houille Blanche, n°2: 113-121.

FORTIN J.P., CHARBONNEAU R., LEFEVRE J., GIRARD G. 1971

"Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation". AISH Pub 101 Vol 2: 548-557. Actes du colloque de Varsovie.

GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P. 1981

"Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique". Cah. ORSTOM série Hydro Vol XVIII 4.

GUILBOT A. 1986

"Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France". Revue Internationale des Sciences de l'Eau, Vol 2-1: 19-26.

LEVIANDIER T., MA Z.C. 1987

"Influence du pas de temps sur les performances des modèles pluie-débit". Critères d'applications opérationnelles de modèles hydrologiques, Rapport final. EDF, CEMAGREF.

MOREL-SEYTOUX H.J., ALHASSOUN S.A. 1987

"SWATCH. Swiss watch watershed model for simulation of surface and sub-surface flows in stream-aquifer system". Colorado State University. Civil Engineering Department. Fort Collins. USA.

NASH J.E. 1969

"A course of lectures on parametric or analytical hydrology". Great Lakes Institute. University of Toronto Pr 38. Lecture 12.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. 1970

"River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles". J. Hydrol, 10: 282-290.

RAMBAL S. 1987

"Evolution de l'occupation des terres et ressources en eau en région méditerranéenne karstique". J. Hydrol, 93:339-357.

SERVAT E. 1986

"Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes. CREC5, MODGLO et MODIBI". ORSTOM Montpellier.

SERVAT E., DEZETTER A. 1988a

"SIMPLE et ROSEN: deux méthodes d'optimisation non linéaire. Théorie et pratique". Notice OVNIh 1. ORSTOM Montpellier.

SERVAT E., DEZETTER A. 1988b

"Etude pluviométrique de la zone géographique couverte par ERREAU". Programme ERREAU, Note 1. ORSTOM IIRSDA. Abidjan Côte d'Ivoire.

VILLENEUVE J.P., ISABEL D. 1984

"Le modèle hydrologique MDOR et sa calibration automatique". Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique. 52^{ème} Congrès de l'ACFAS. Université Laval. Québec.

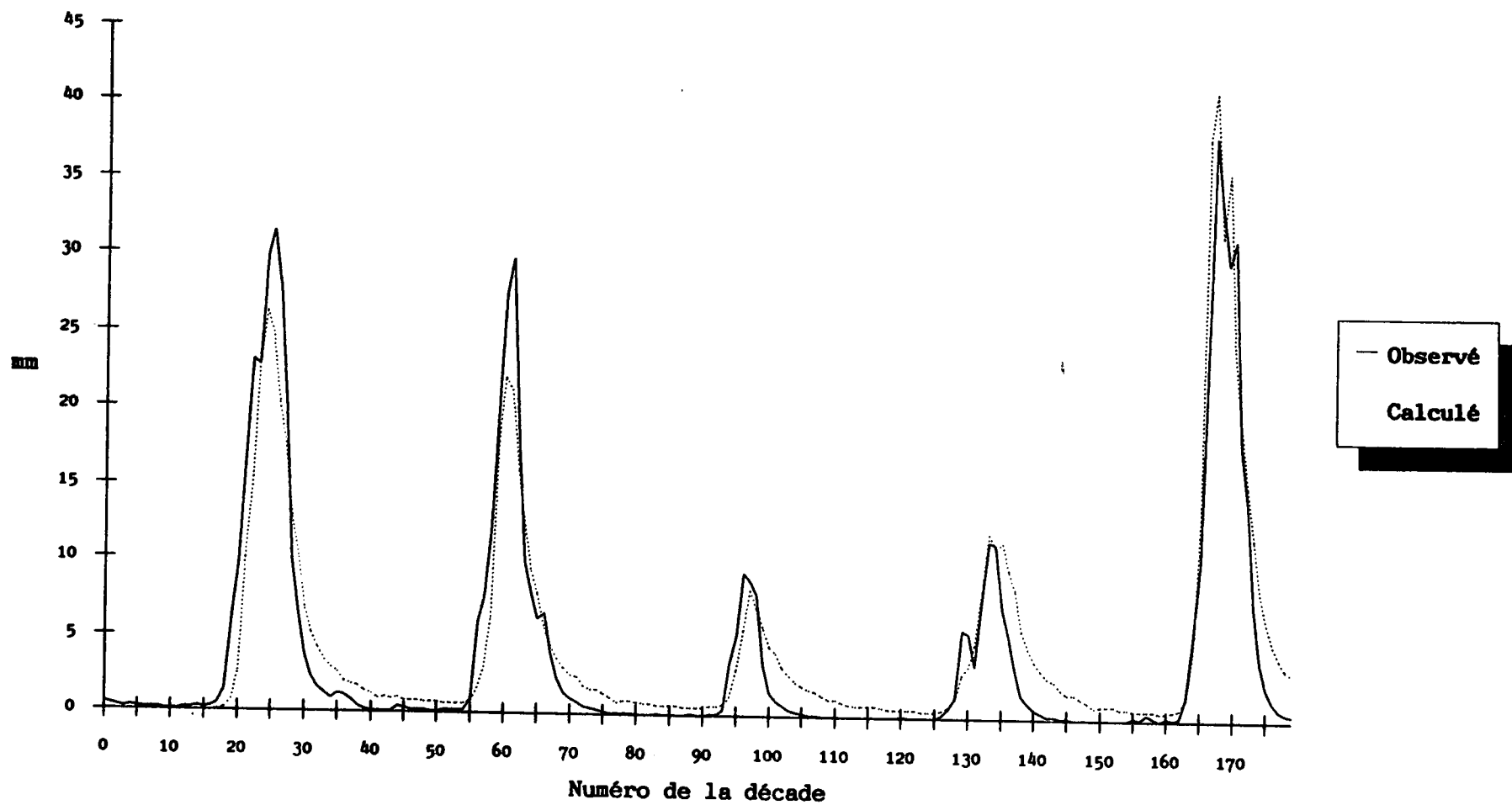
ANNEXES

Annexe 1: Tracés des hydrogrammes observés et calculés, au pas de temps décadaire.

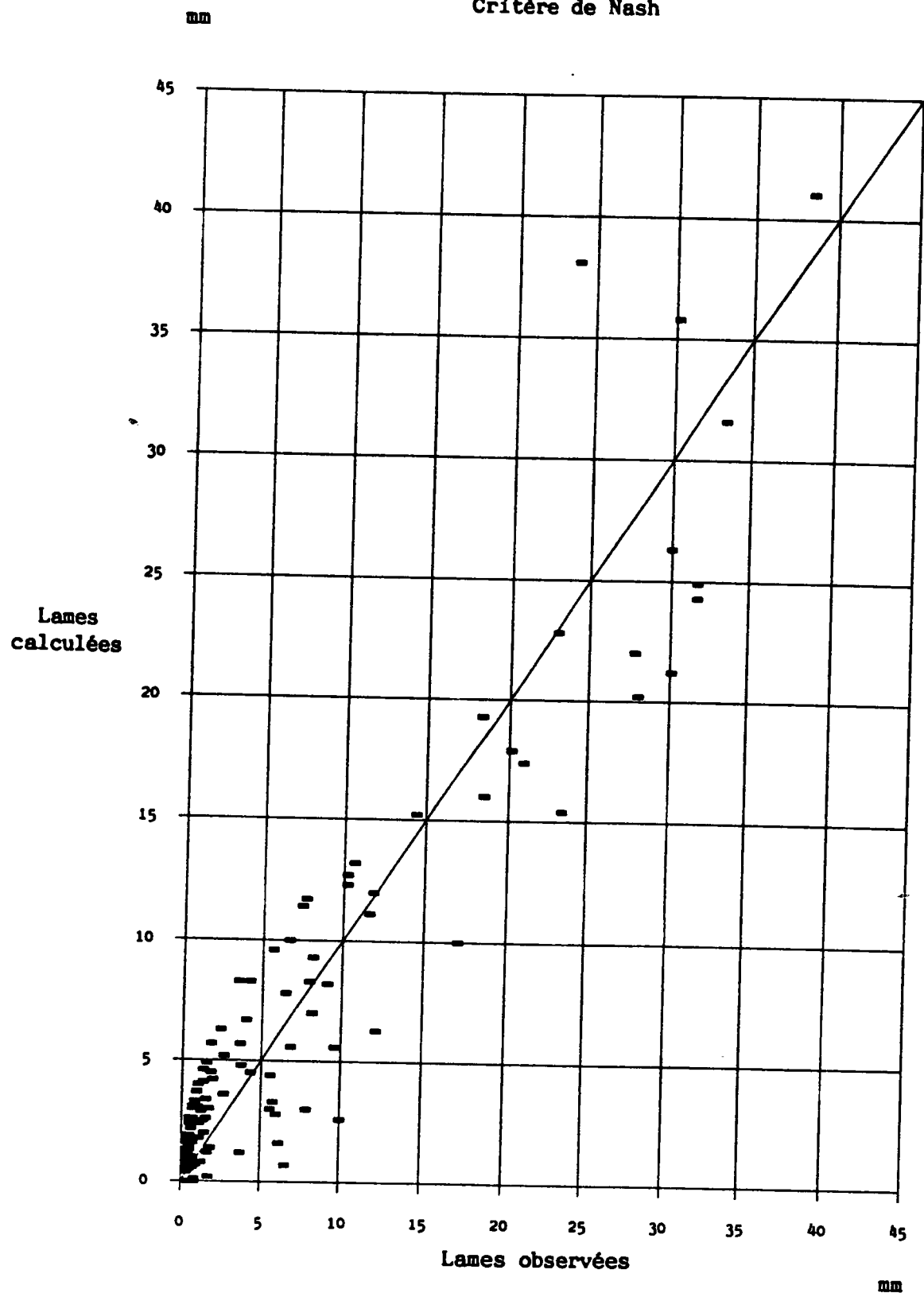
Annexe 2: Valeurs des termes du module d'évaluation - Rangs des critères.

ANNEXE 1

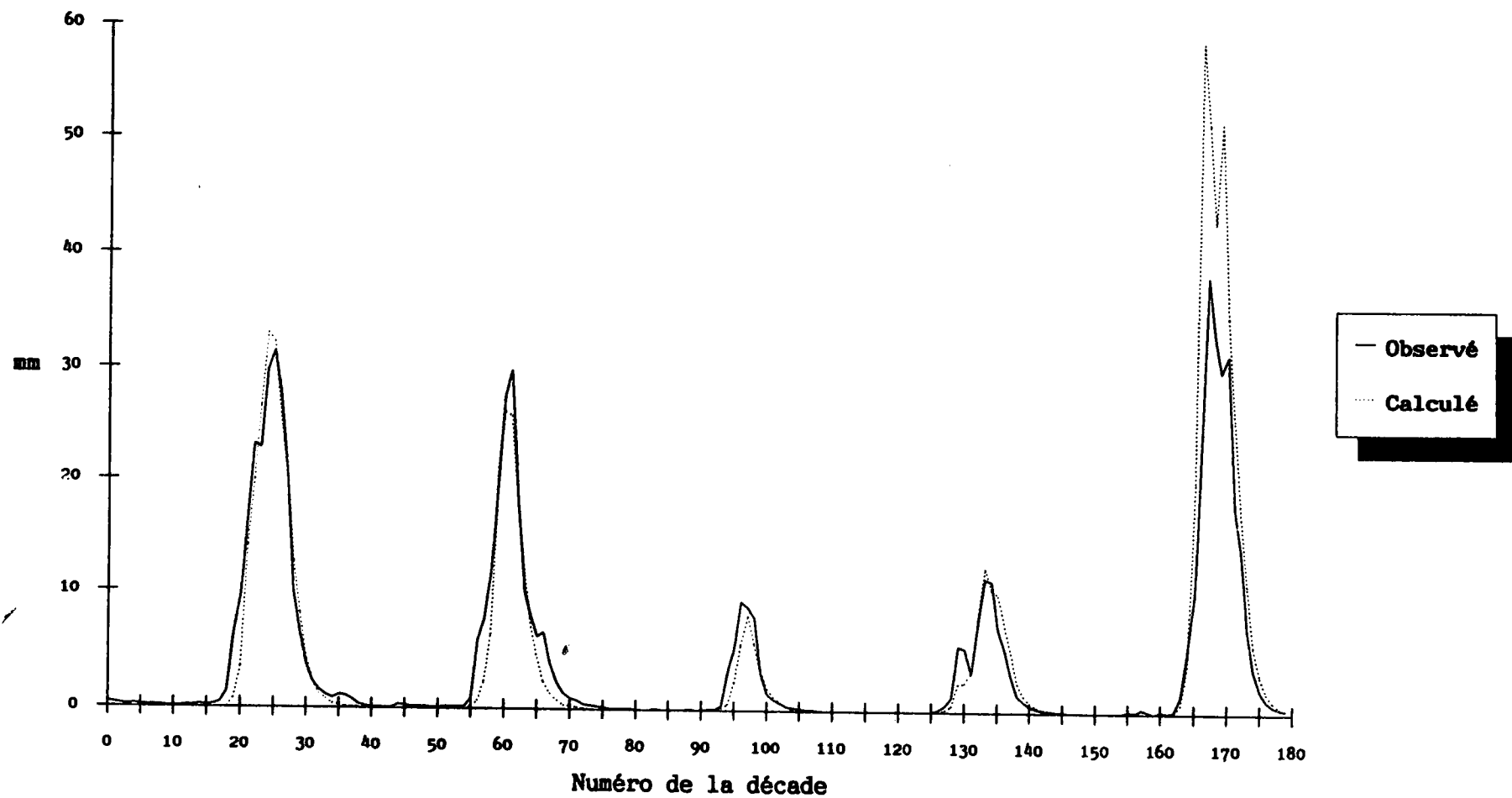
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle CREC Critère de Nash



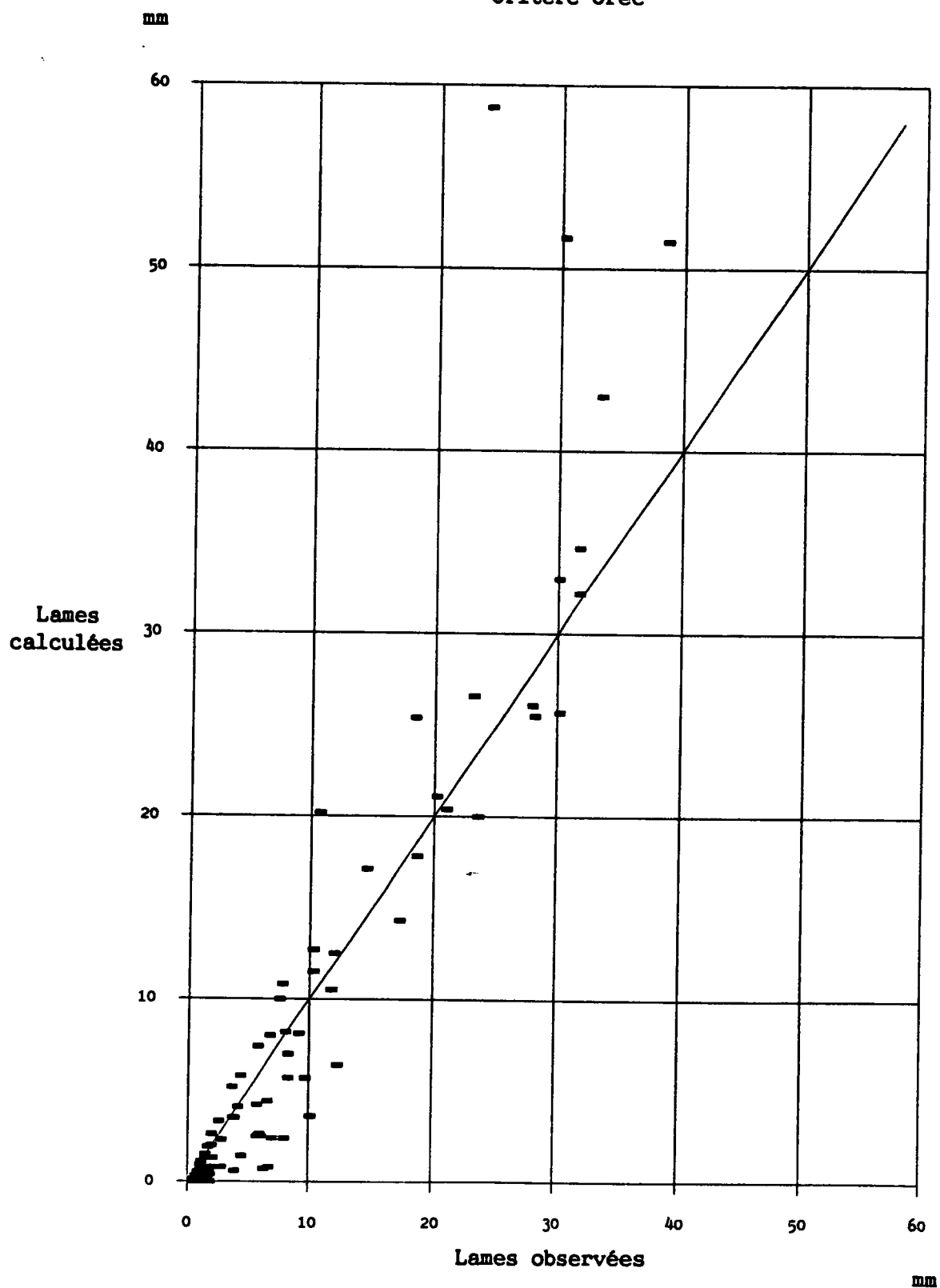
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle CREC
Critère de Nash



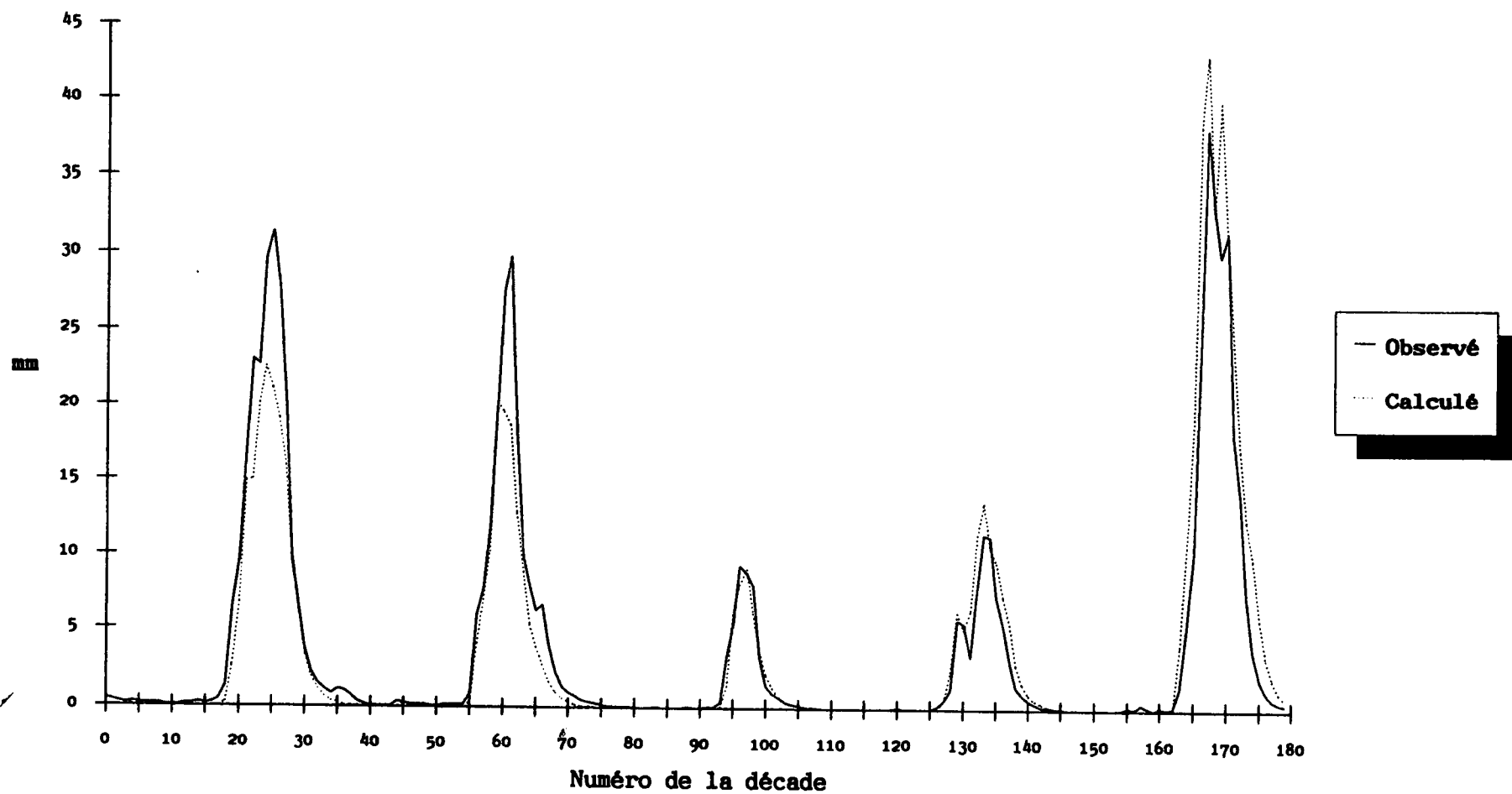
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle CREC Critère Crec



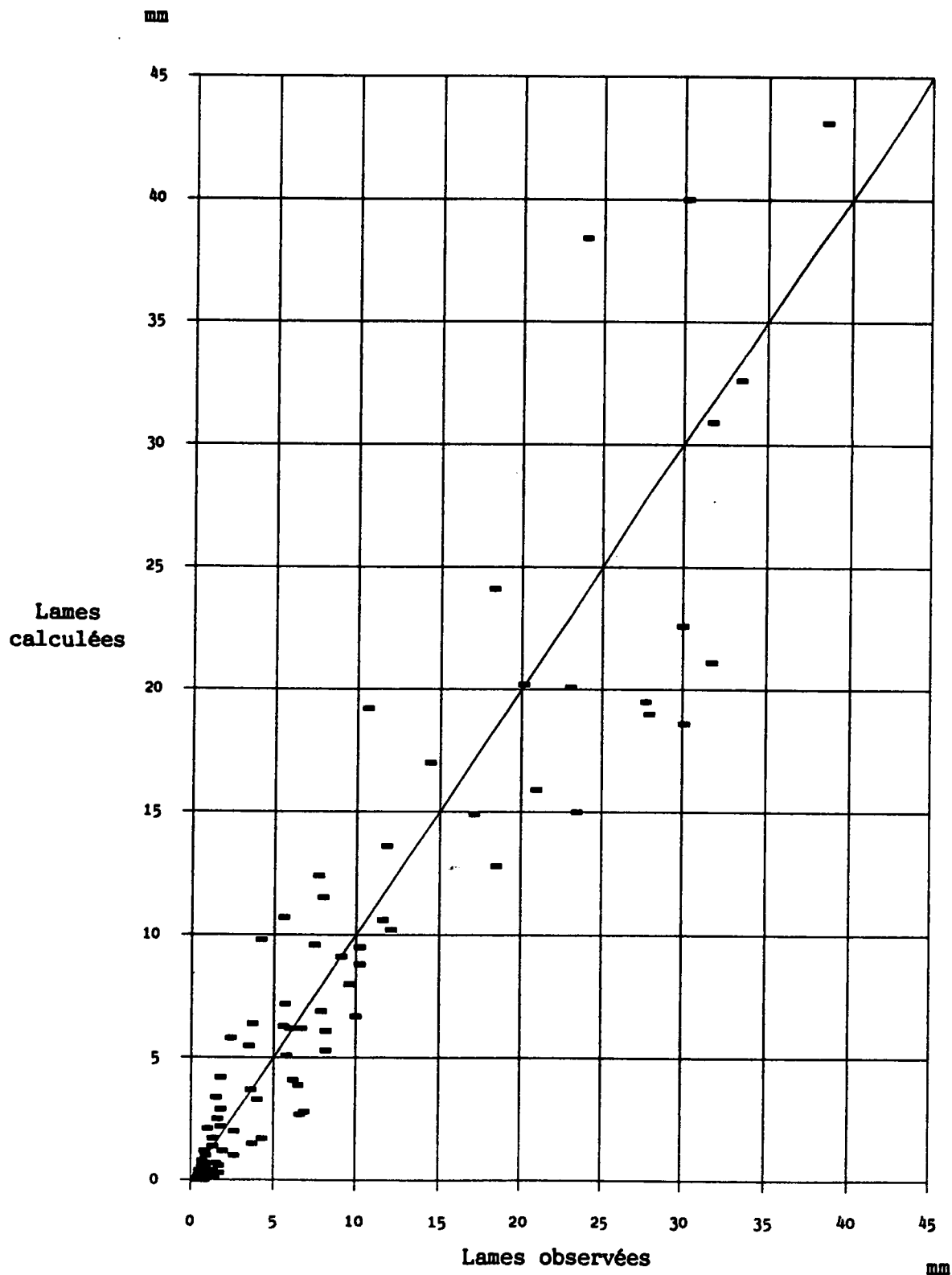
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle CREC
Critère Crec



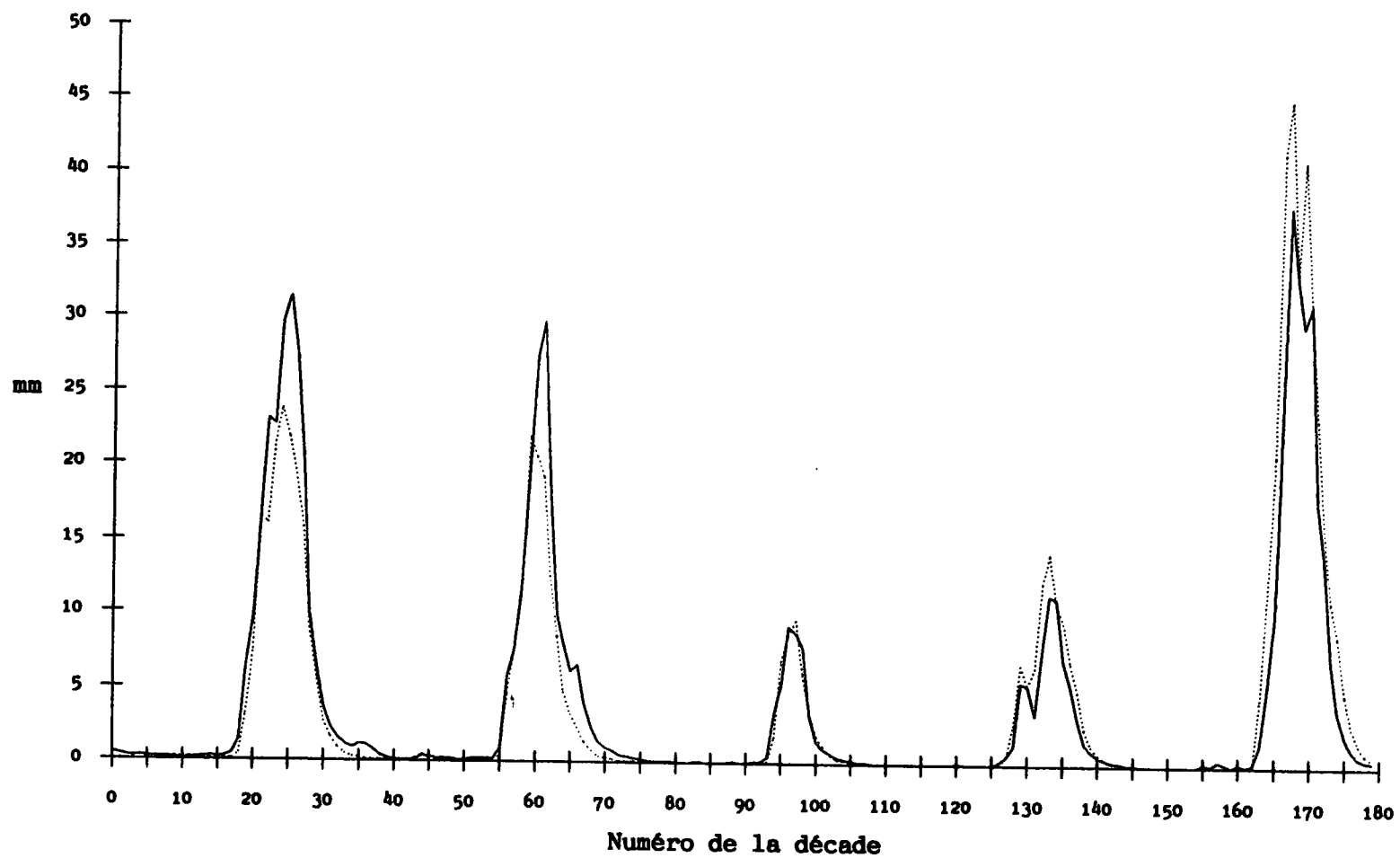
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle MODGLO Critère de Fortin



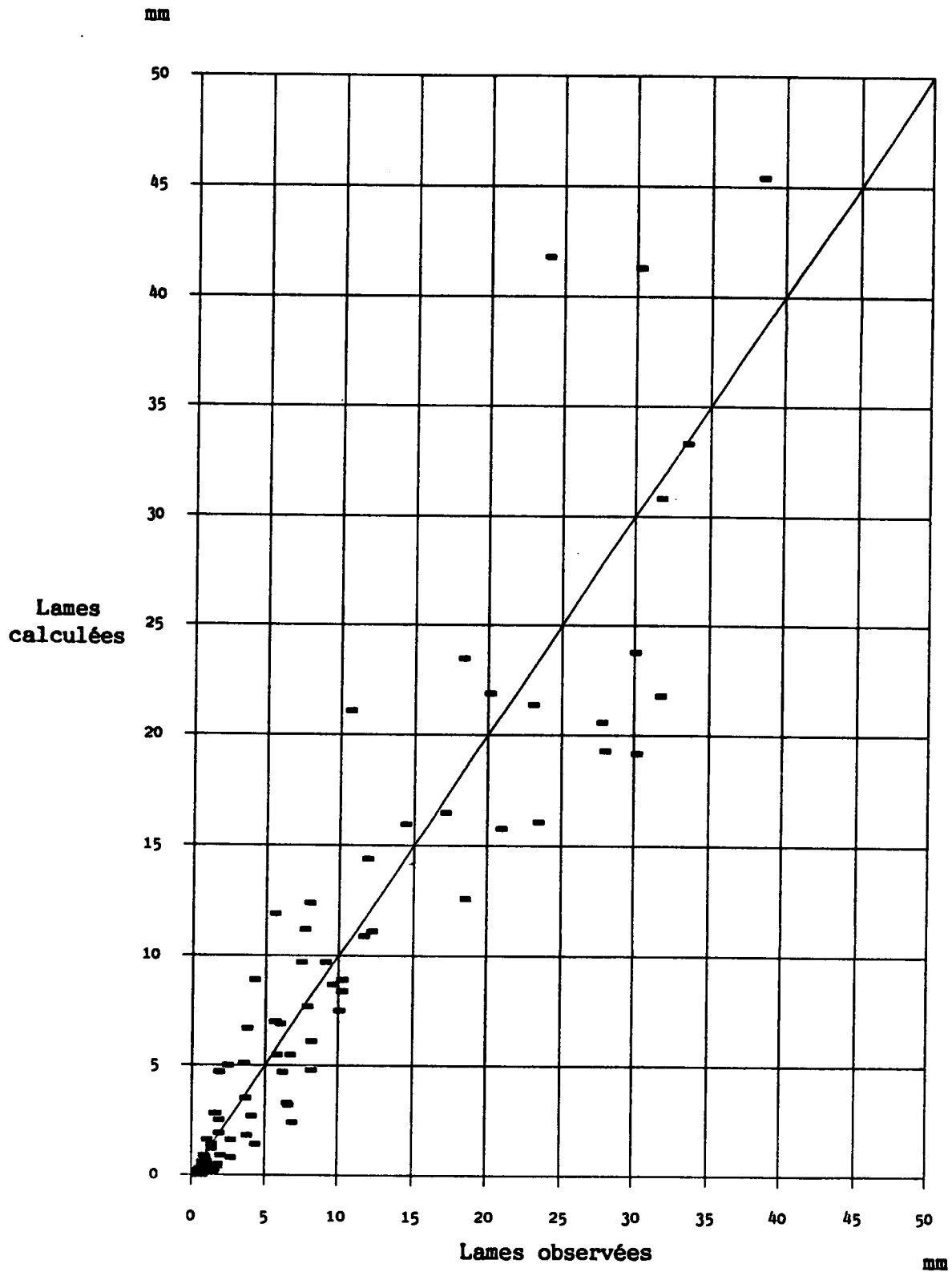
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle
MODGLO Critère de Fortin



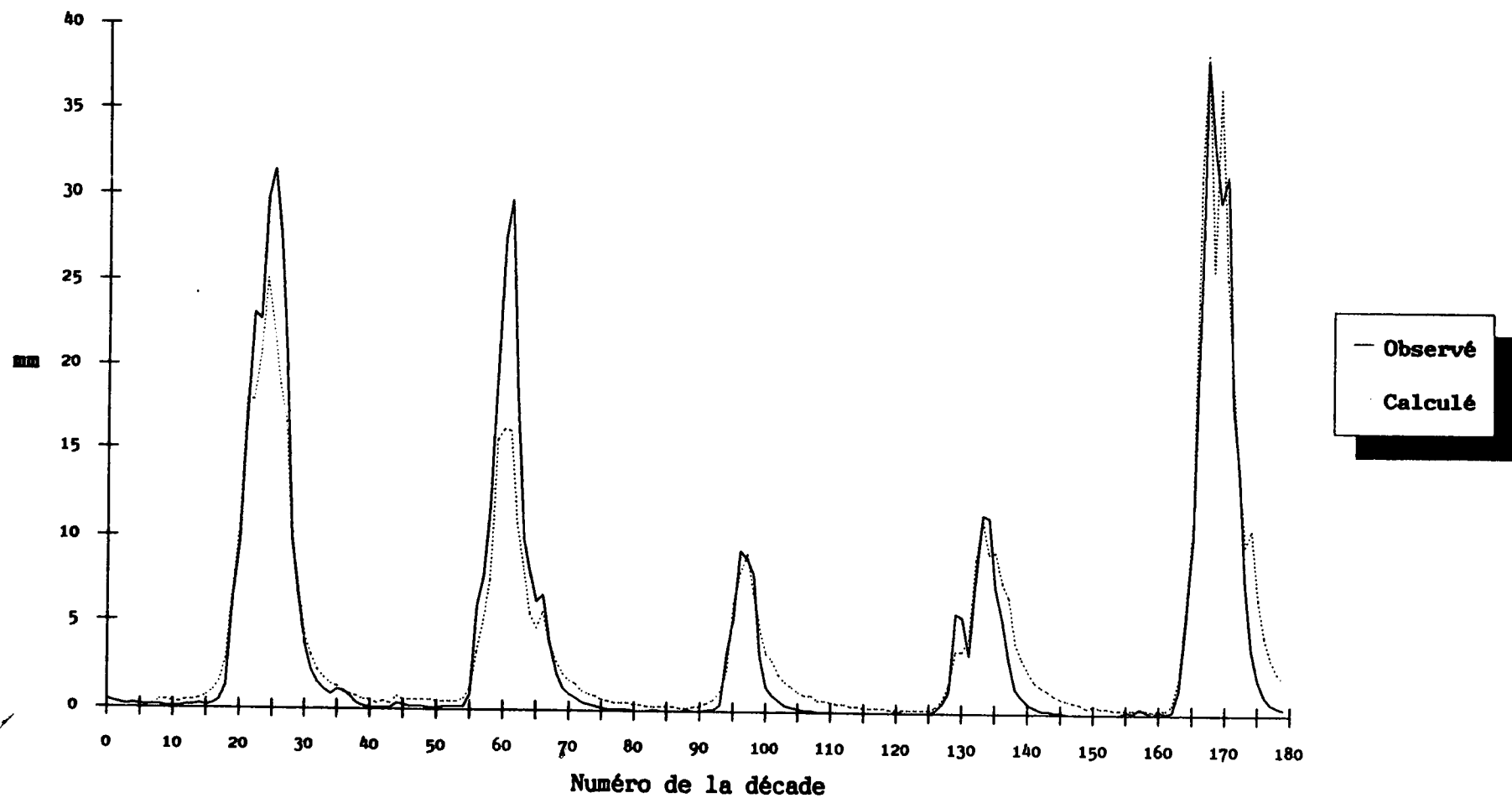
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle MODGLO Critère CrecBi



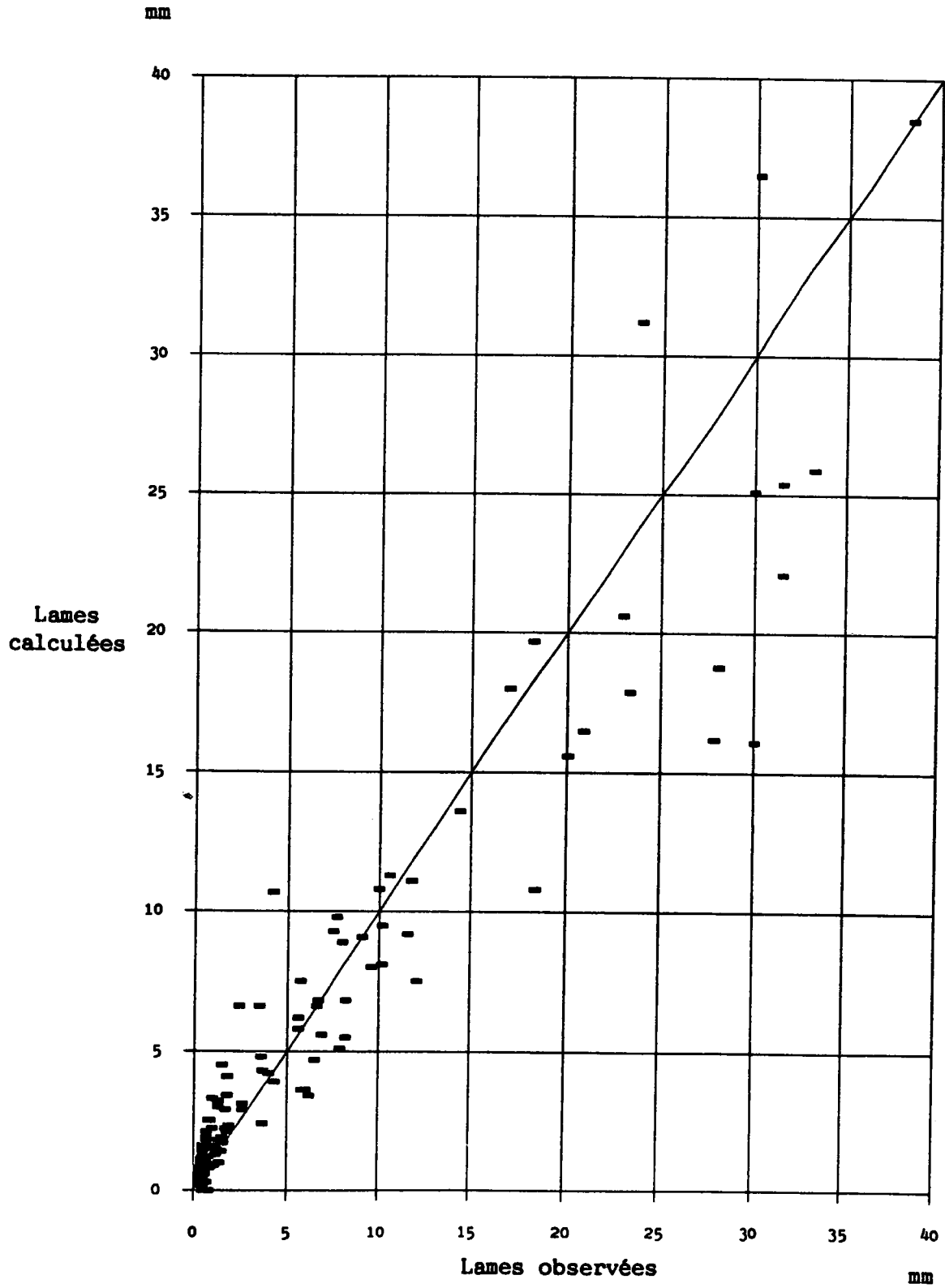
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle
MODGLO Critère CrecBi



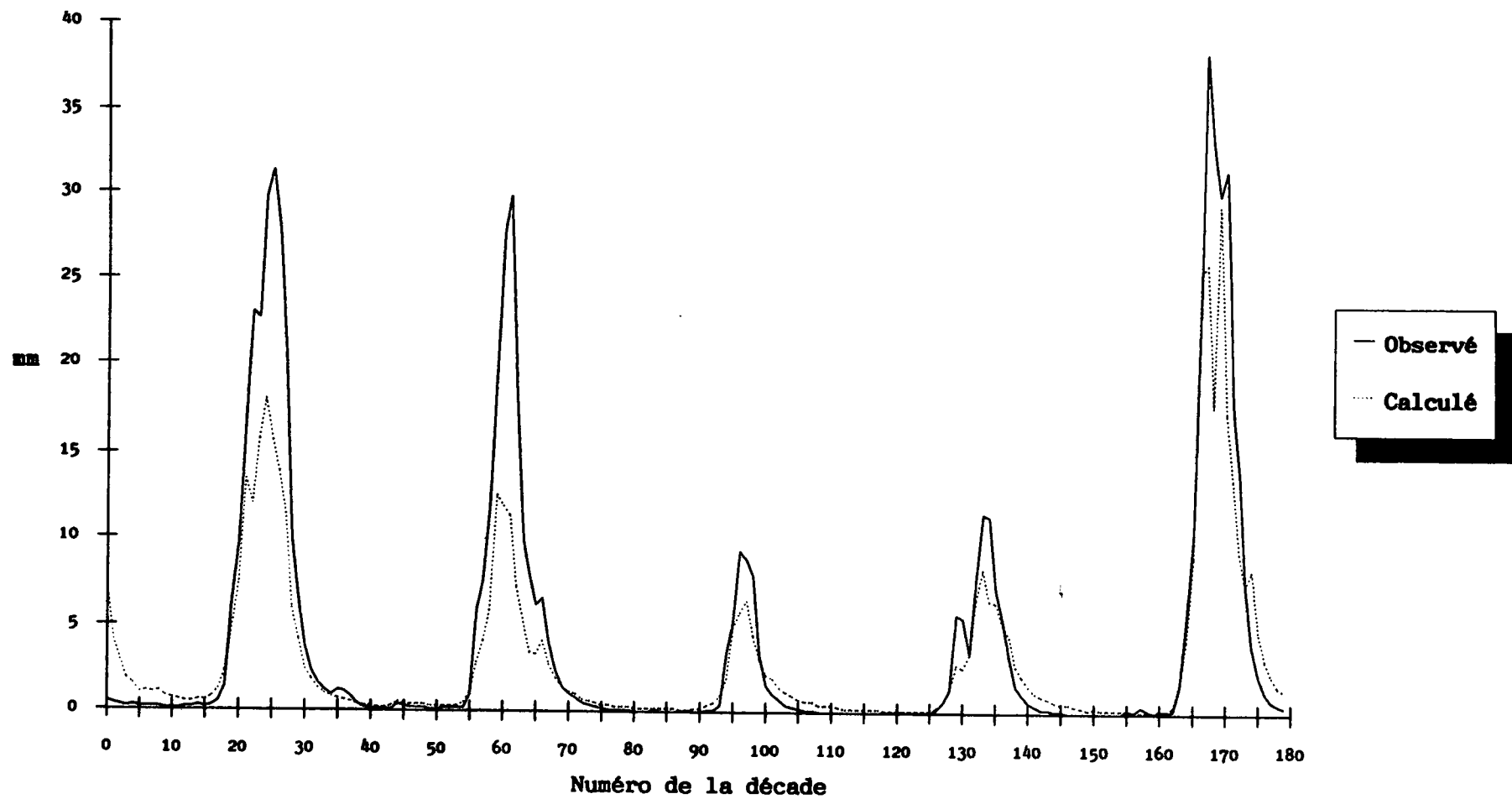
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle GR3 Critère de Nash



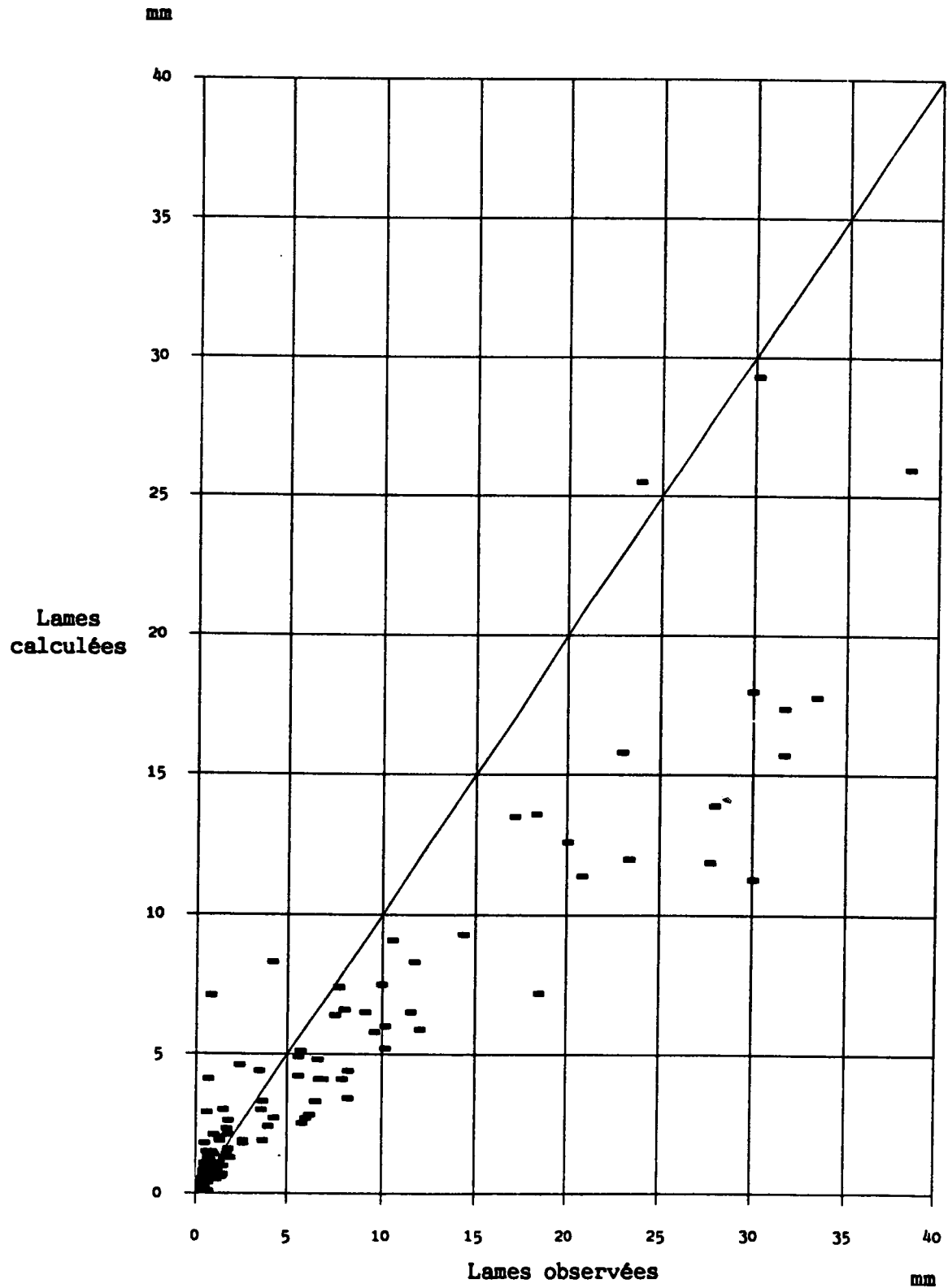
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle GR3
Critère de Nash



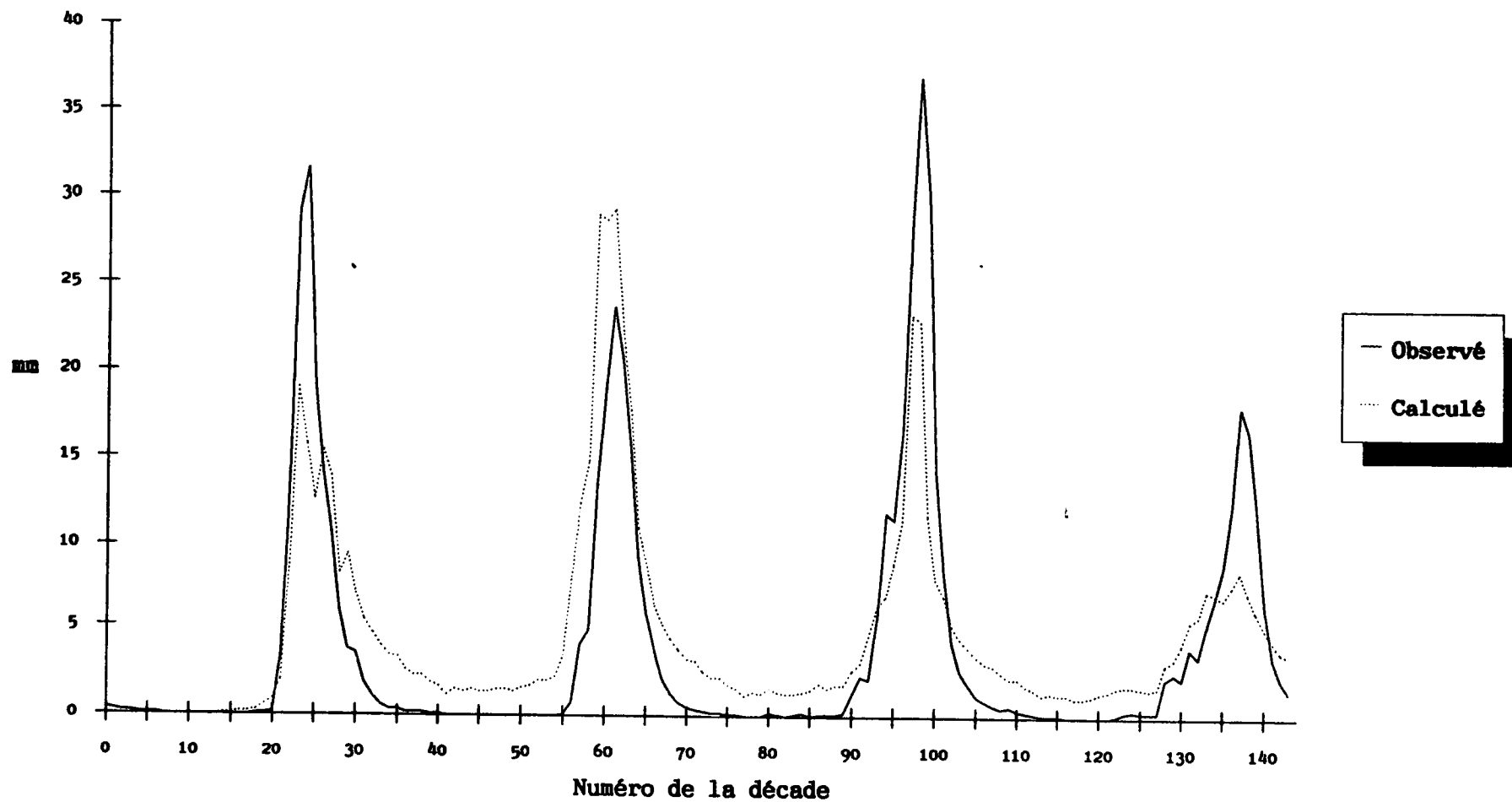
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle GR3 Critère SExpER



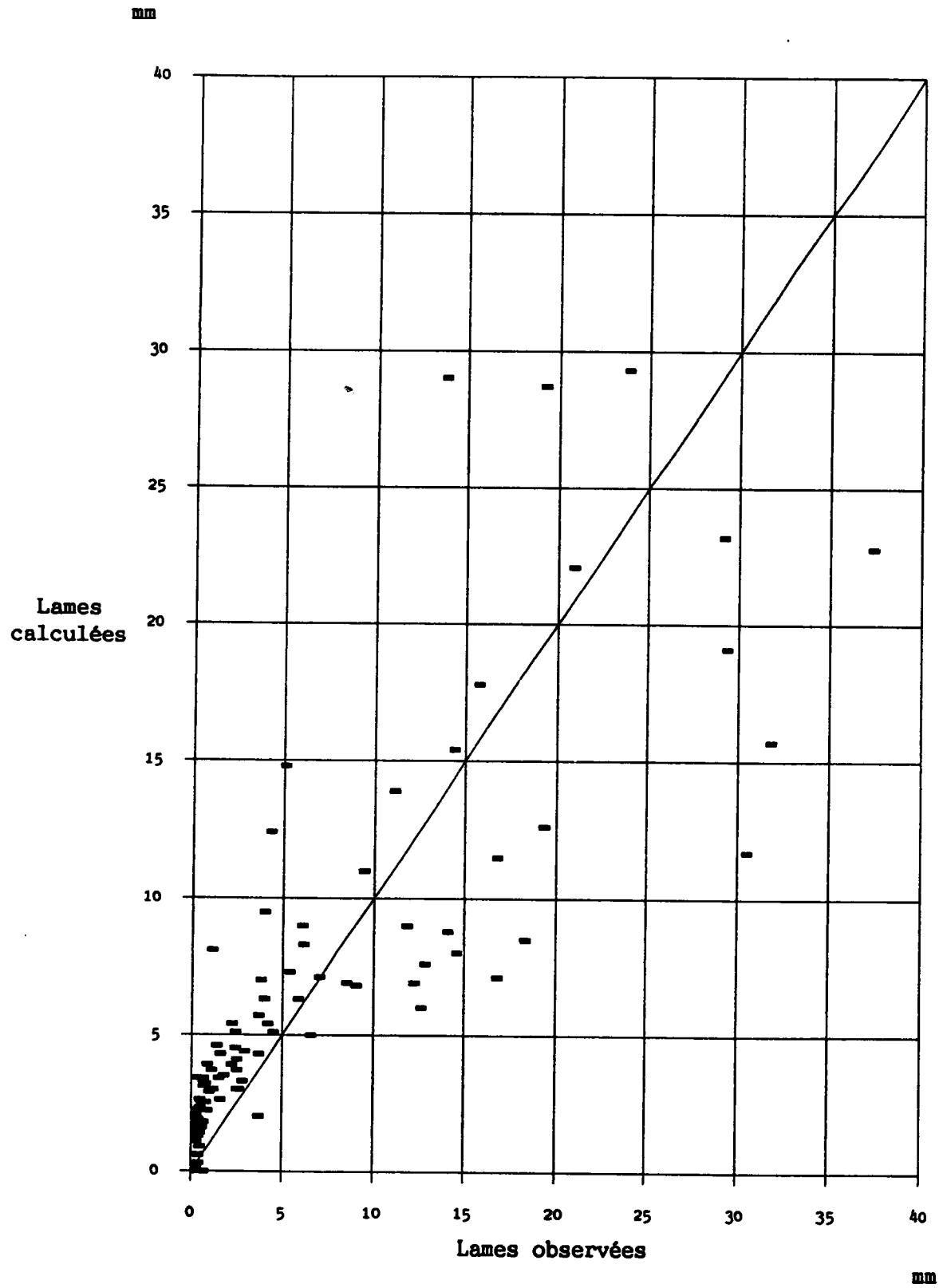
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1981 1985 - Modèle GR3
Critère SExpER



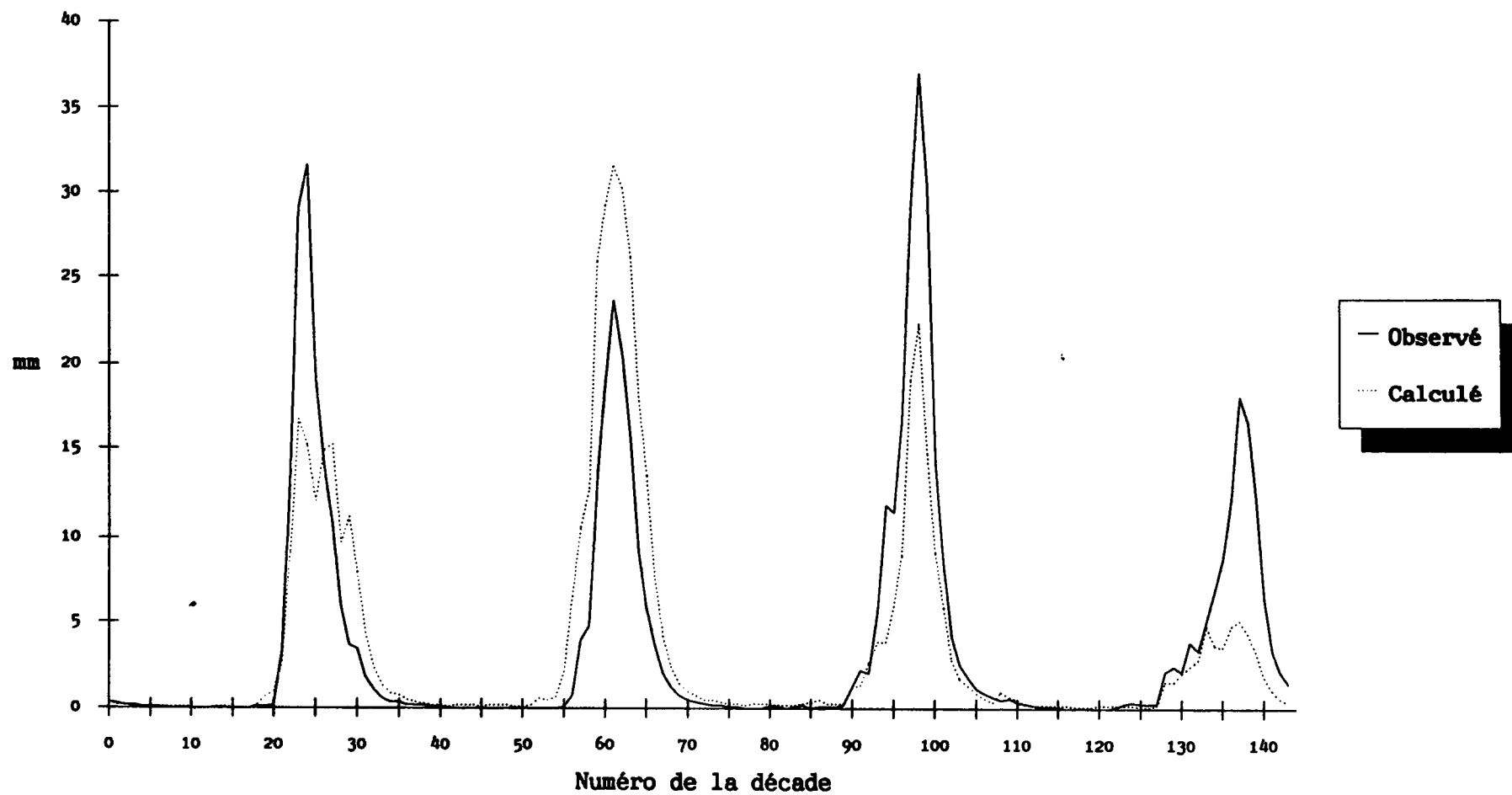
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1973 1976 - Modèle CREC Critère de Nash



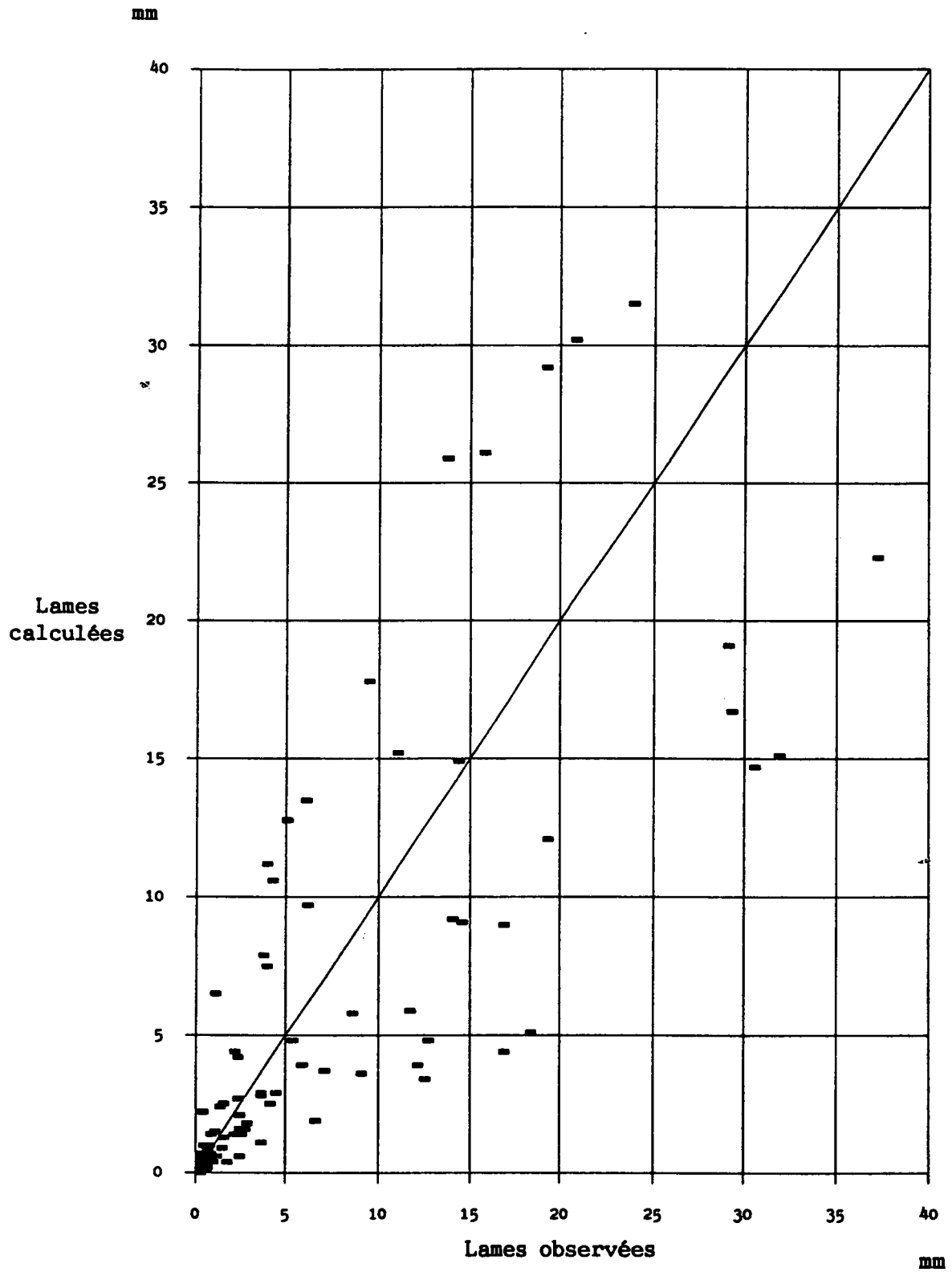
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1973 1976 - Modèle CREC
Critère de Nash



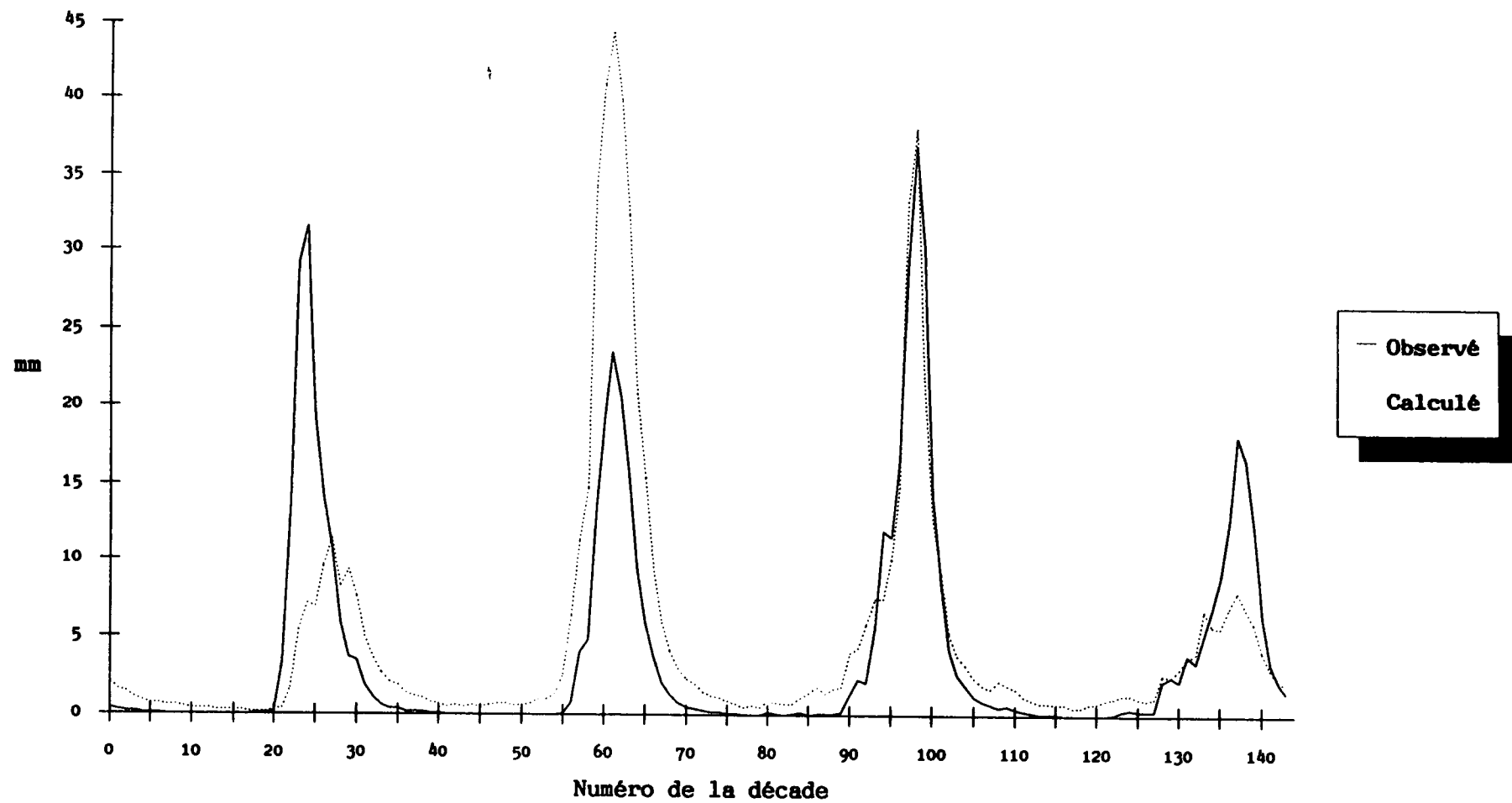
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1973 1976 - Modèle MODGLO Critère de Nash



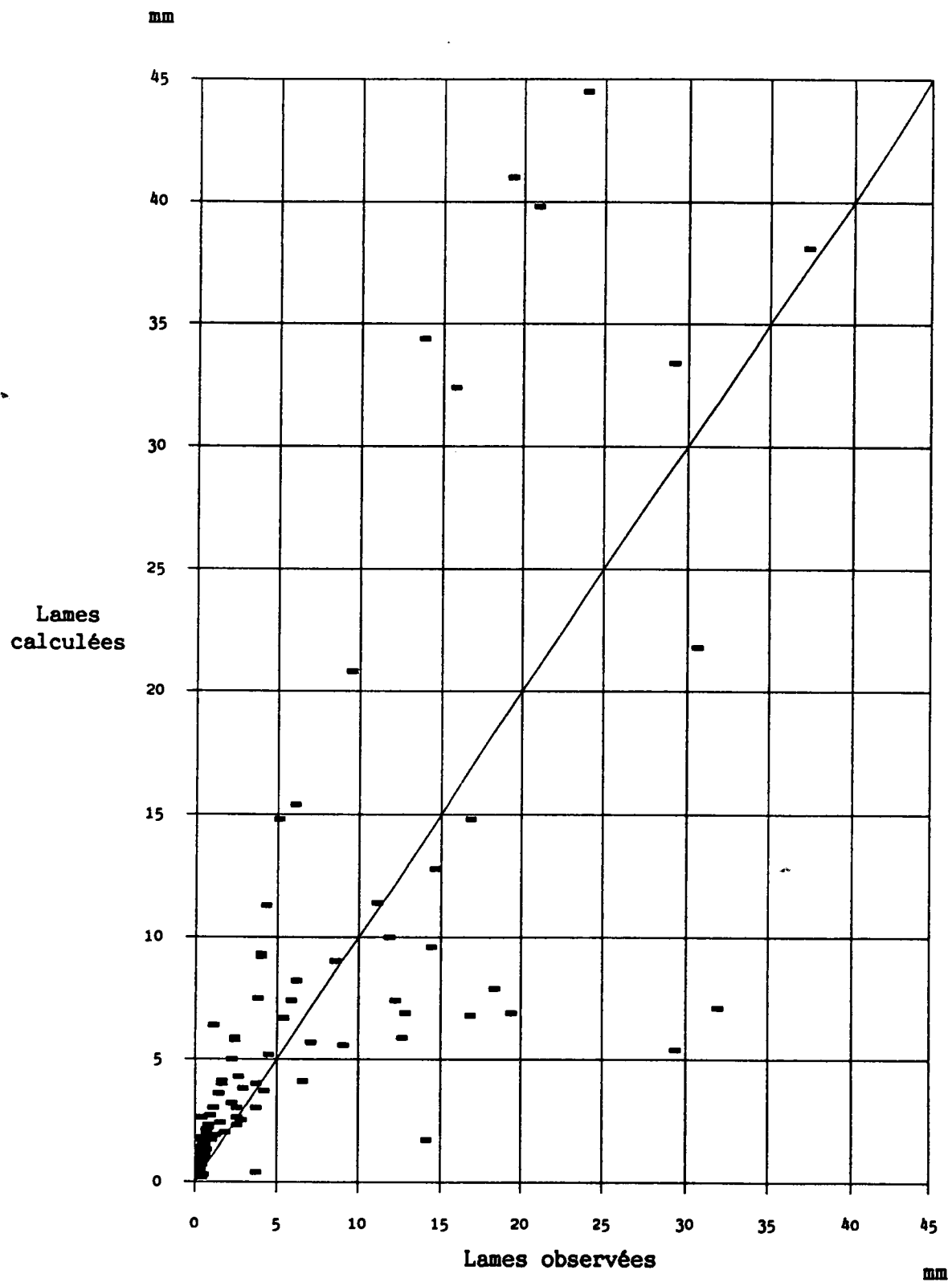
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1973 1976 - Modèle
MODGLO Critère de Nash



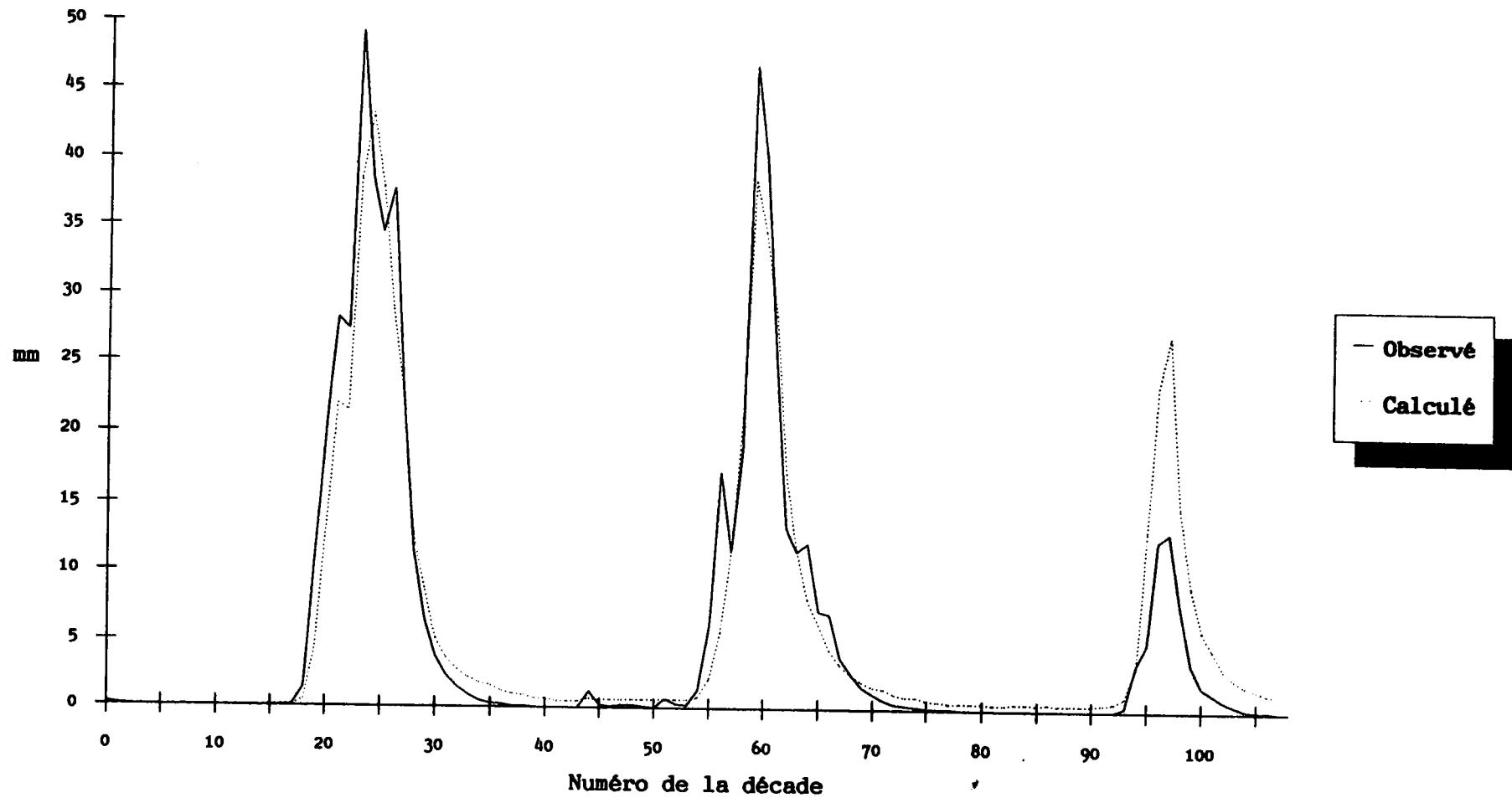
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1973 1976 - Modèle GR3 Critère de Nash



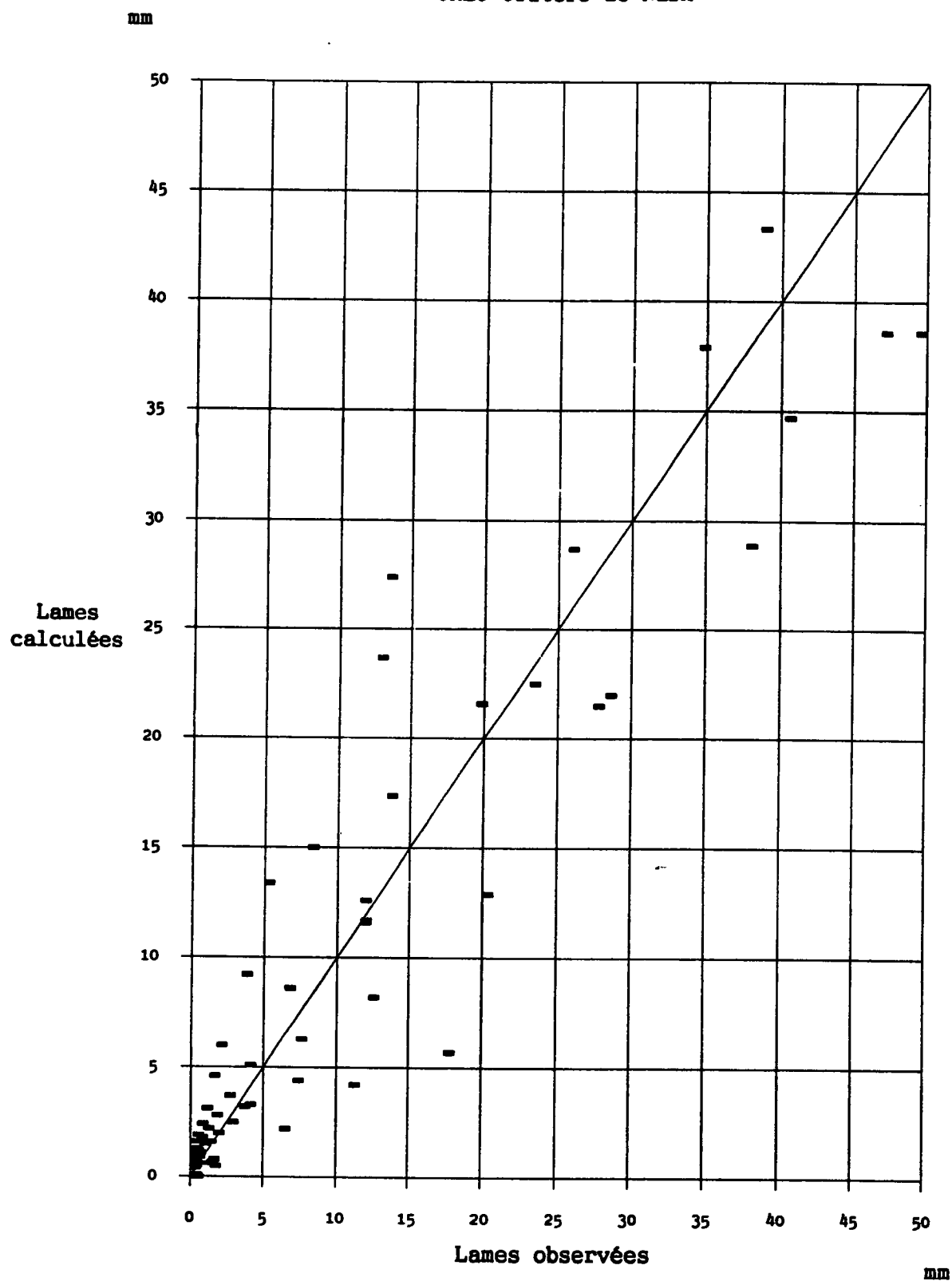
Lames décadaires - La Bagoé à Kouto 1973 1976 - Modèle GR3
Critère de Nash



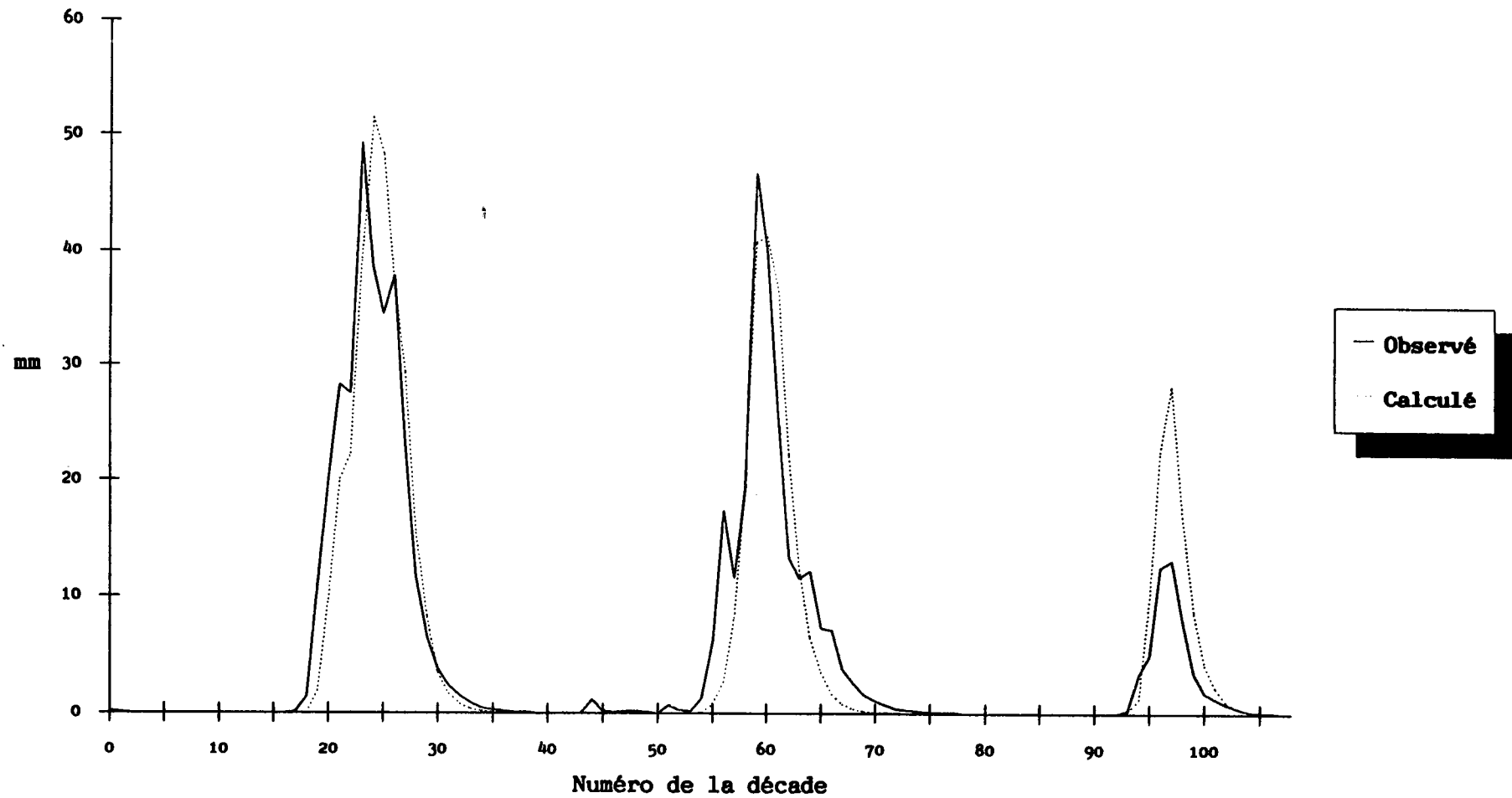
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle CREC Critère de Nash



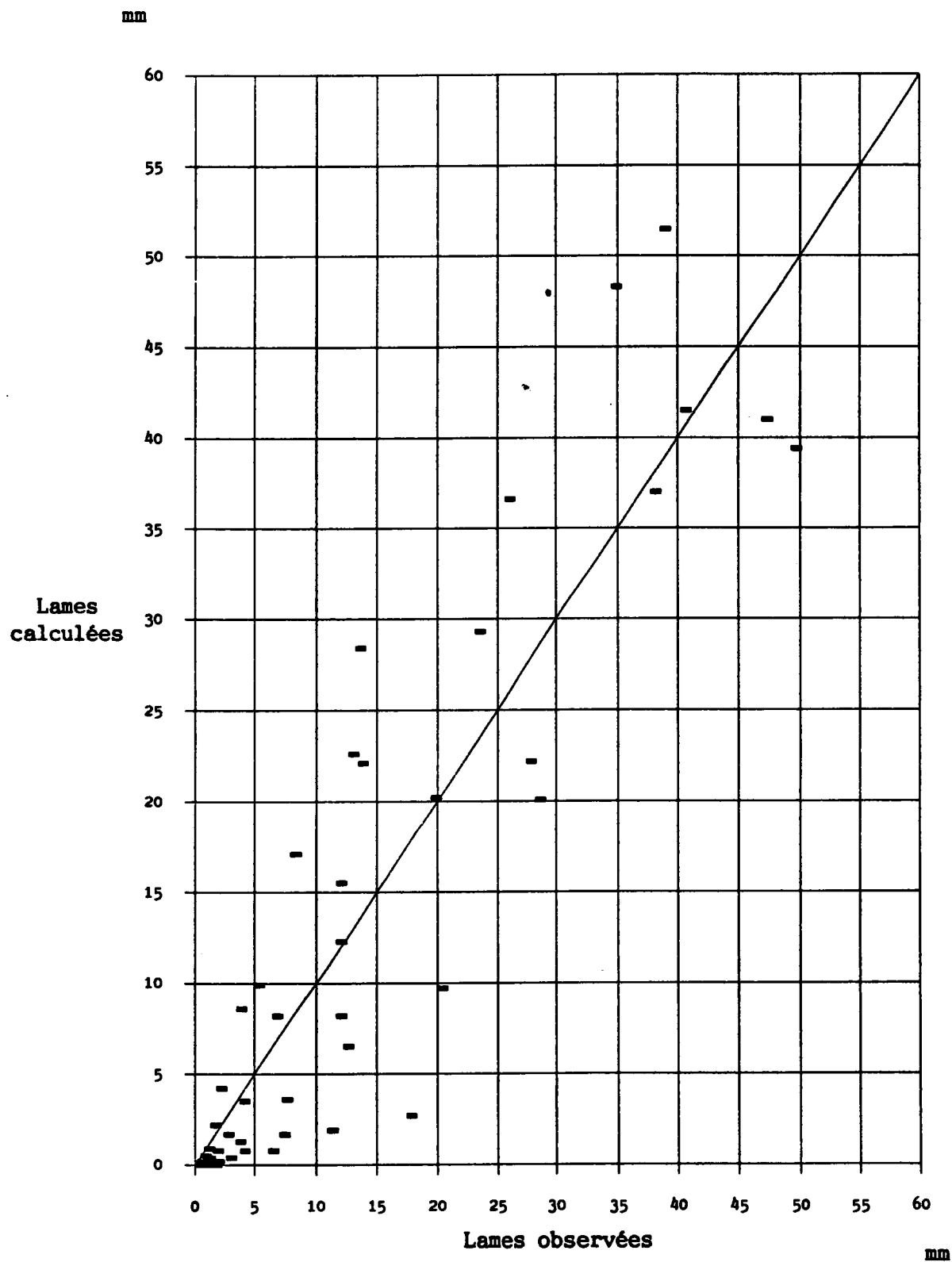
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle
CREC Critère de Nash



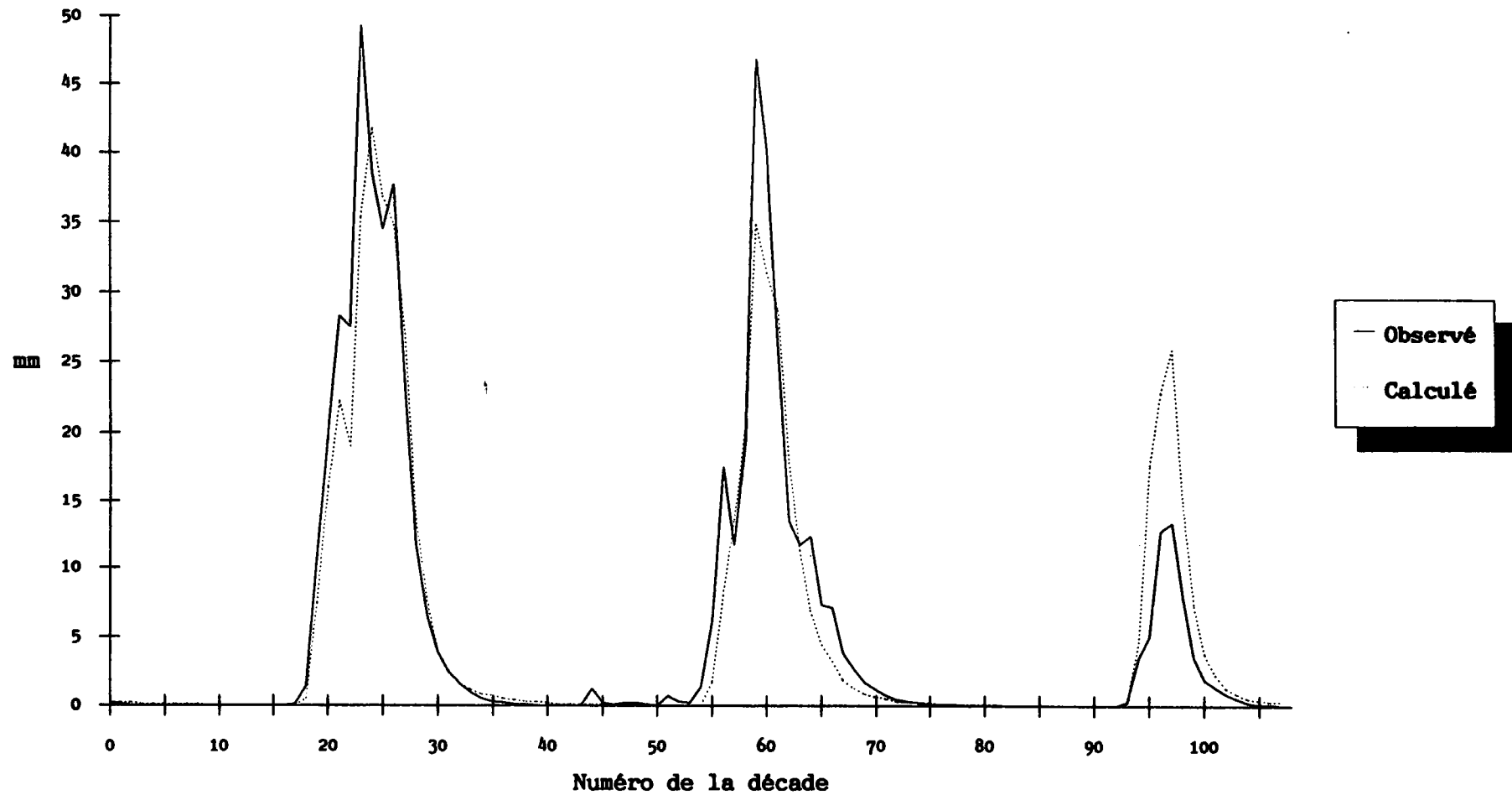
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle CREC Critère CrecBi



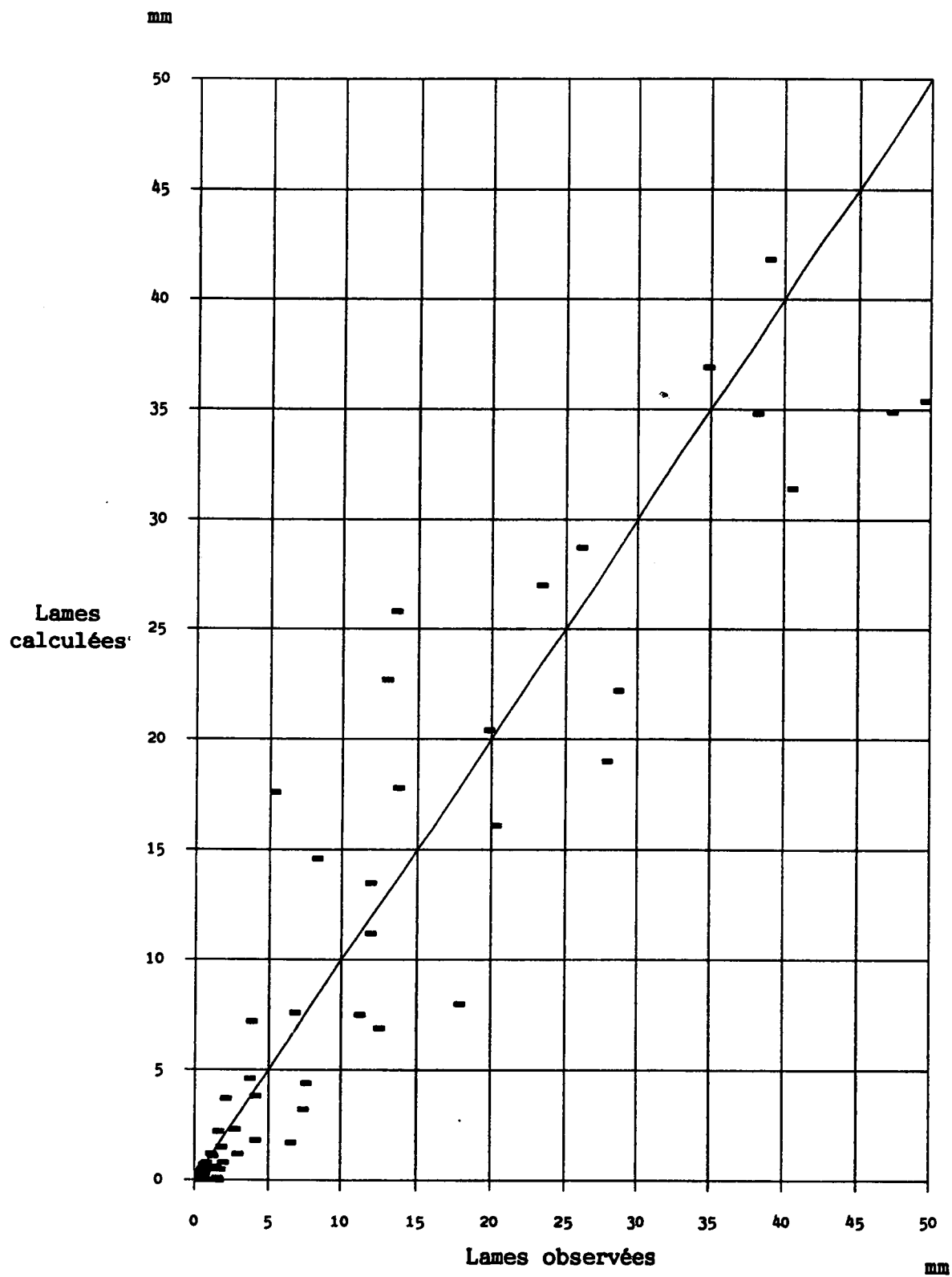
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle
CREC Critère CrecBi



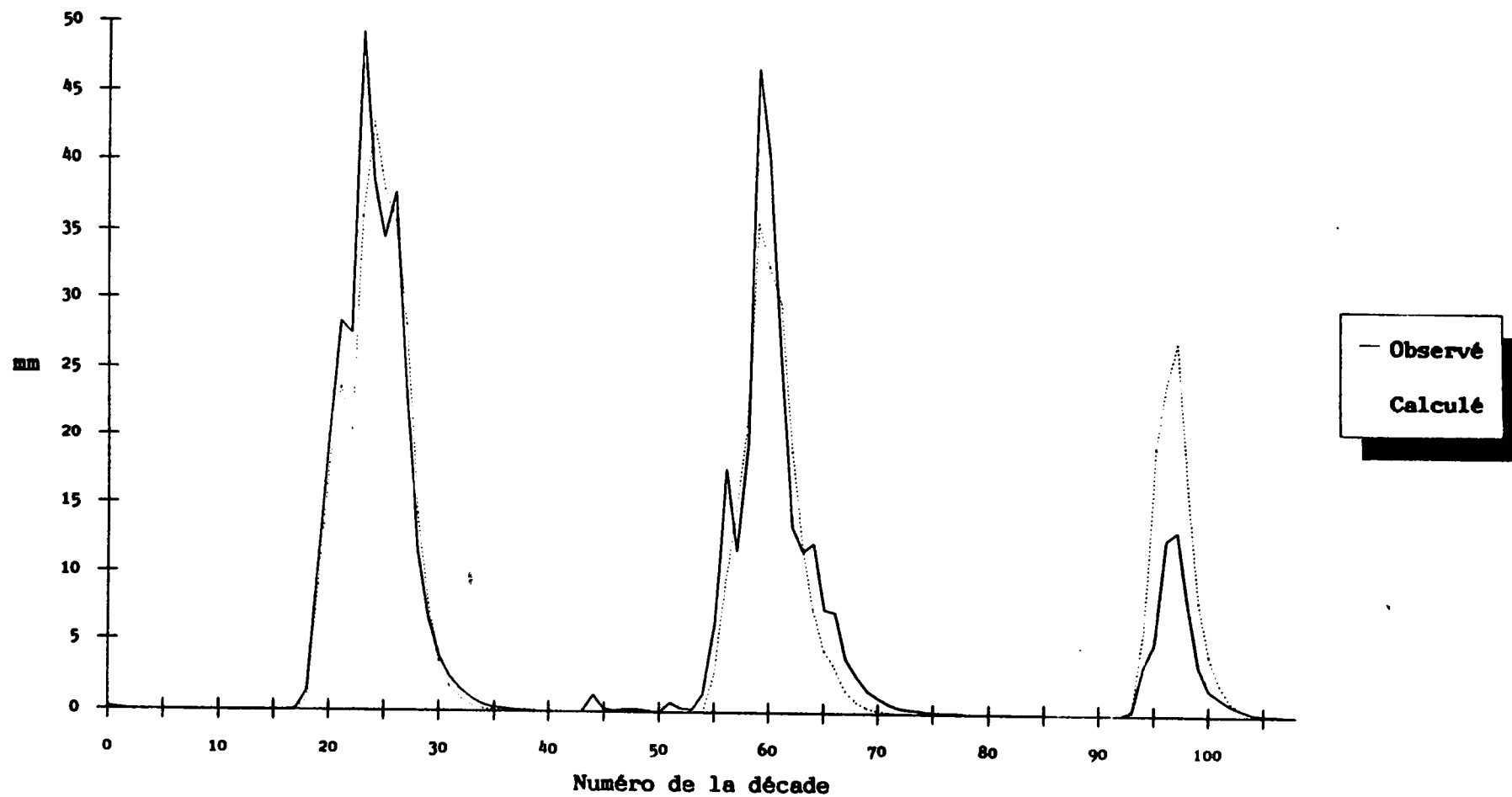
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle MODGLO Critère de Nash



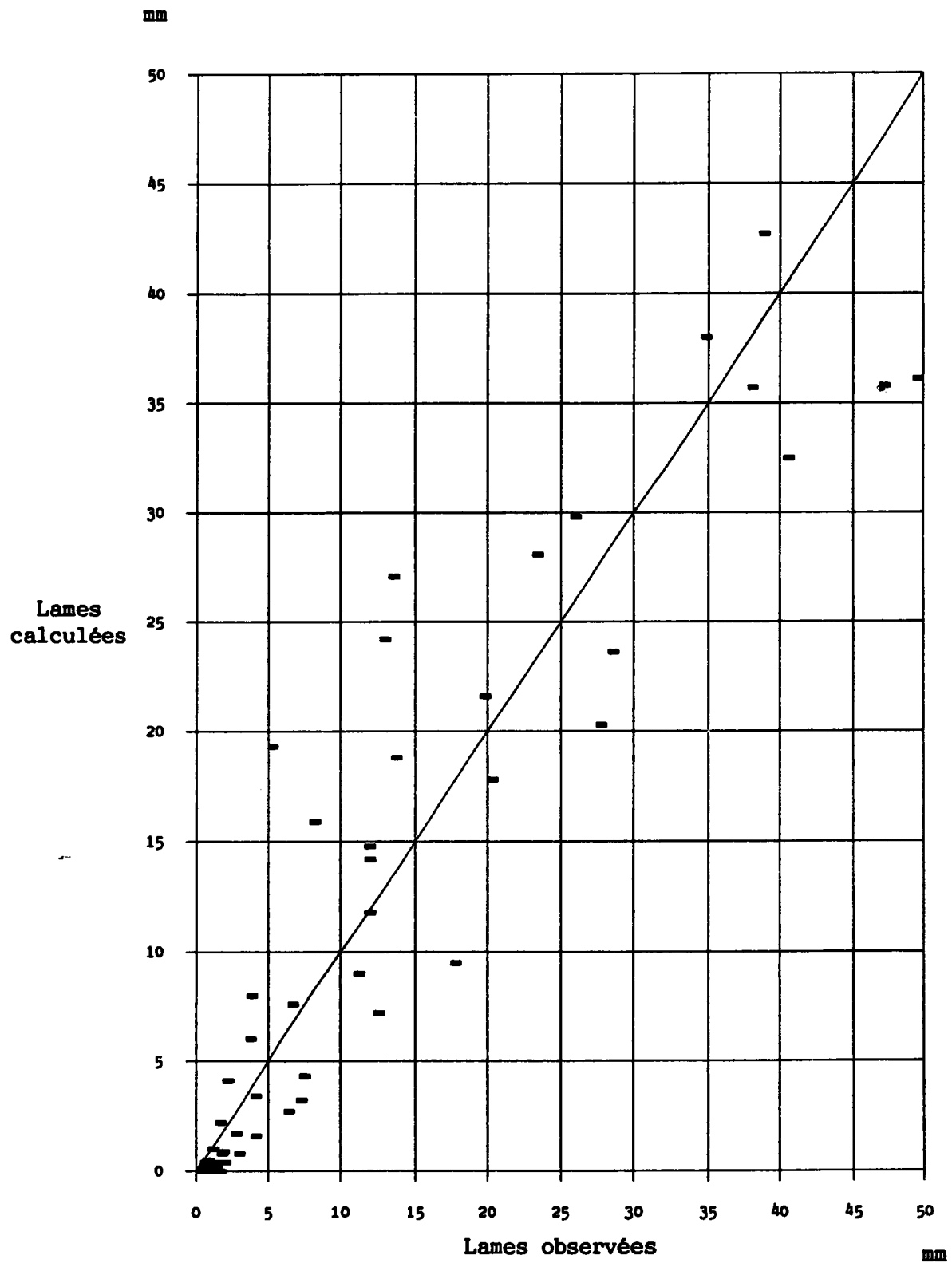
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle
MODGLO Critère de Nash



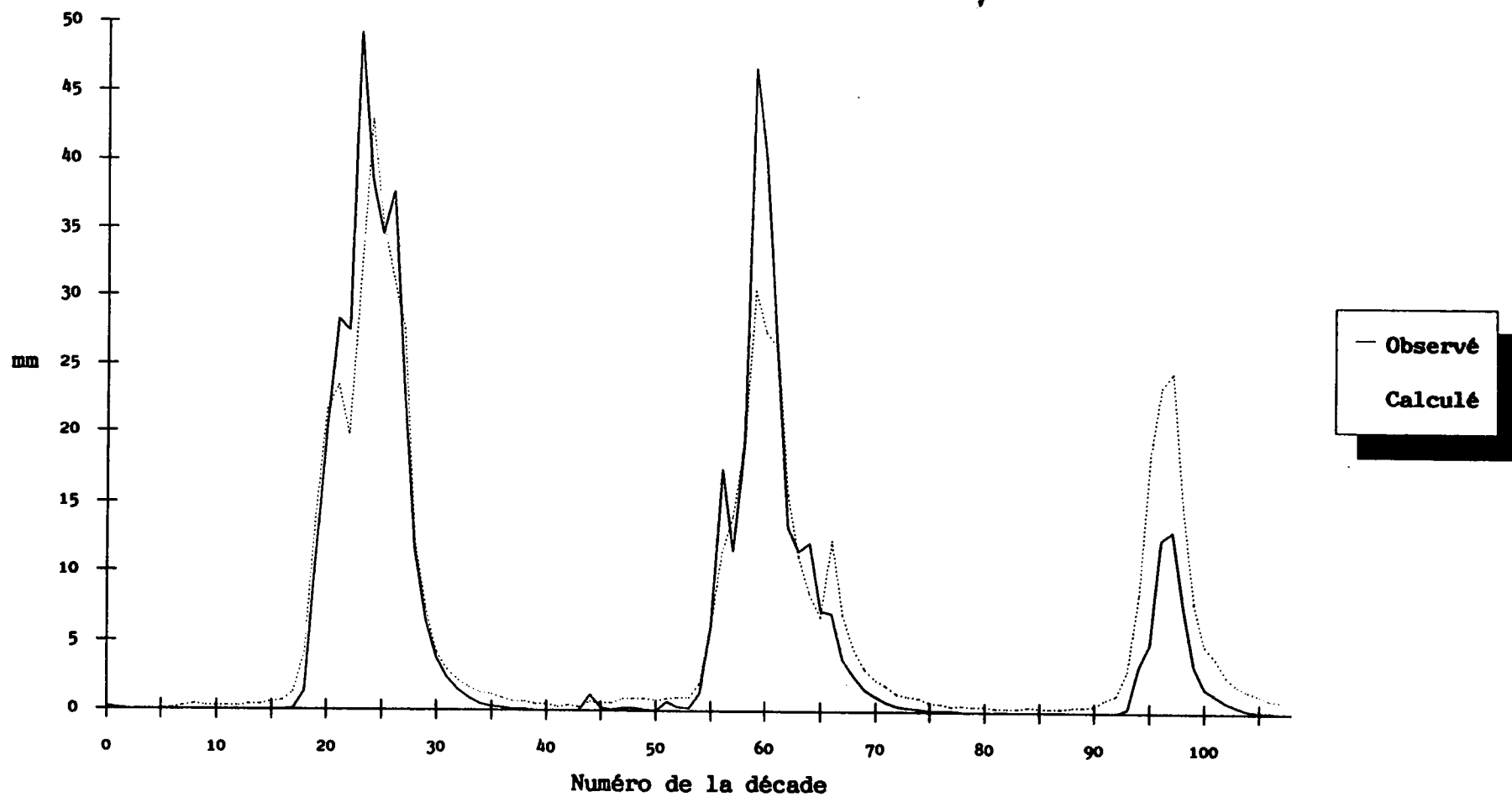
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle MODGLO Critère CrecB1



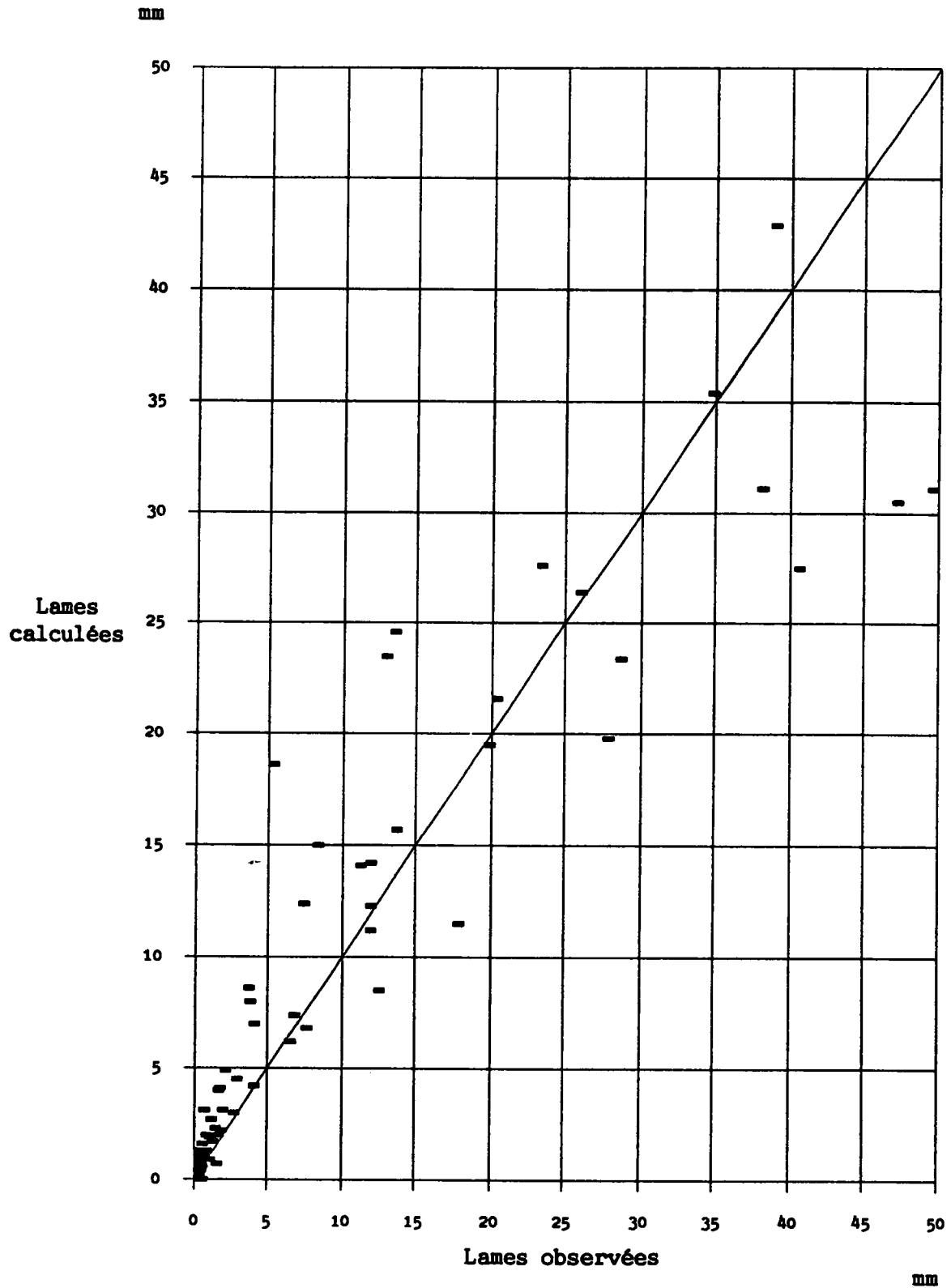
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle
MODGLO Critère CrecBi



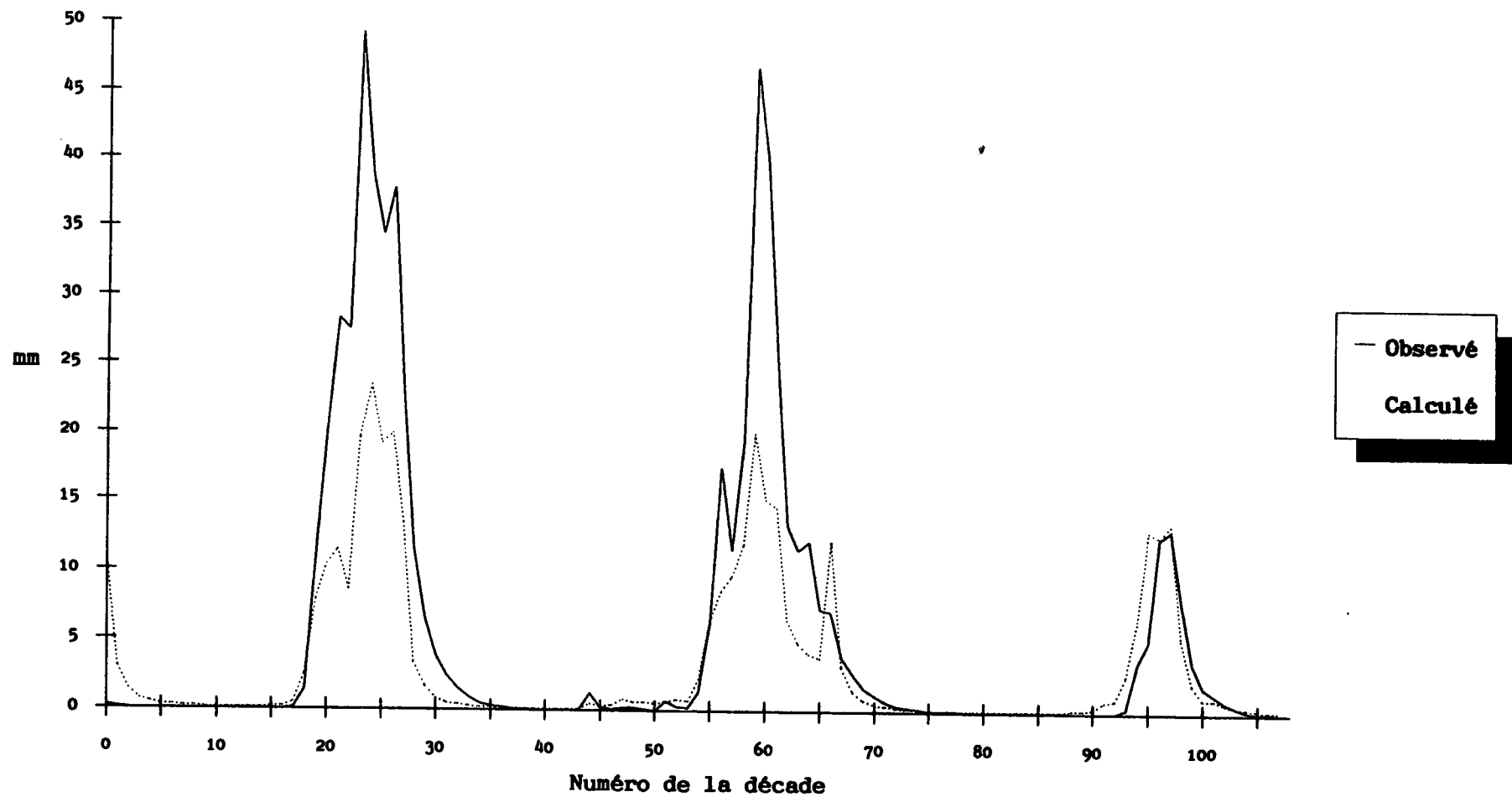
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle GR3 Critère de Nash



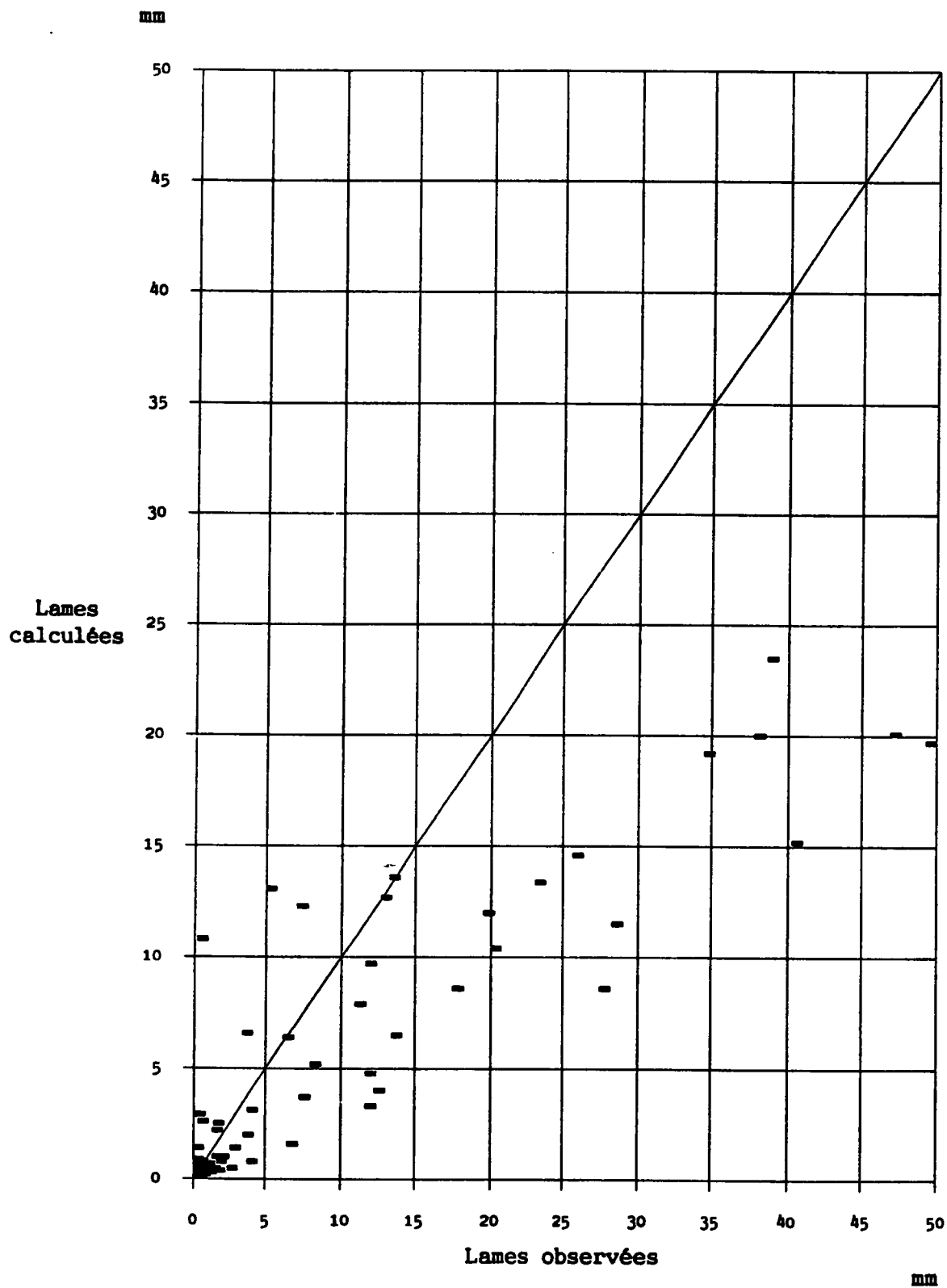
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle
GR3 Critère de Nash



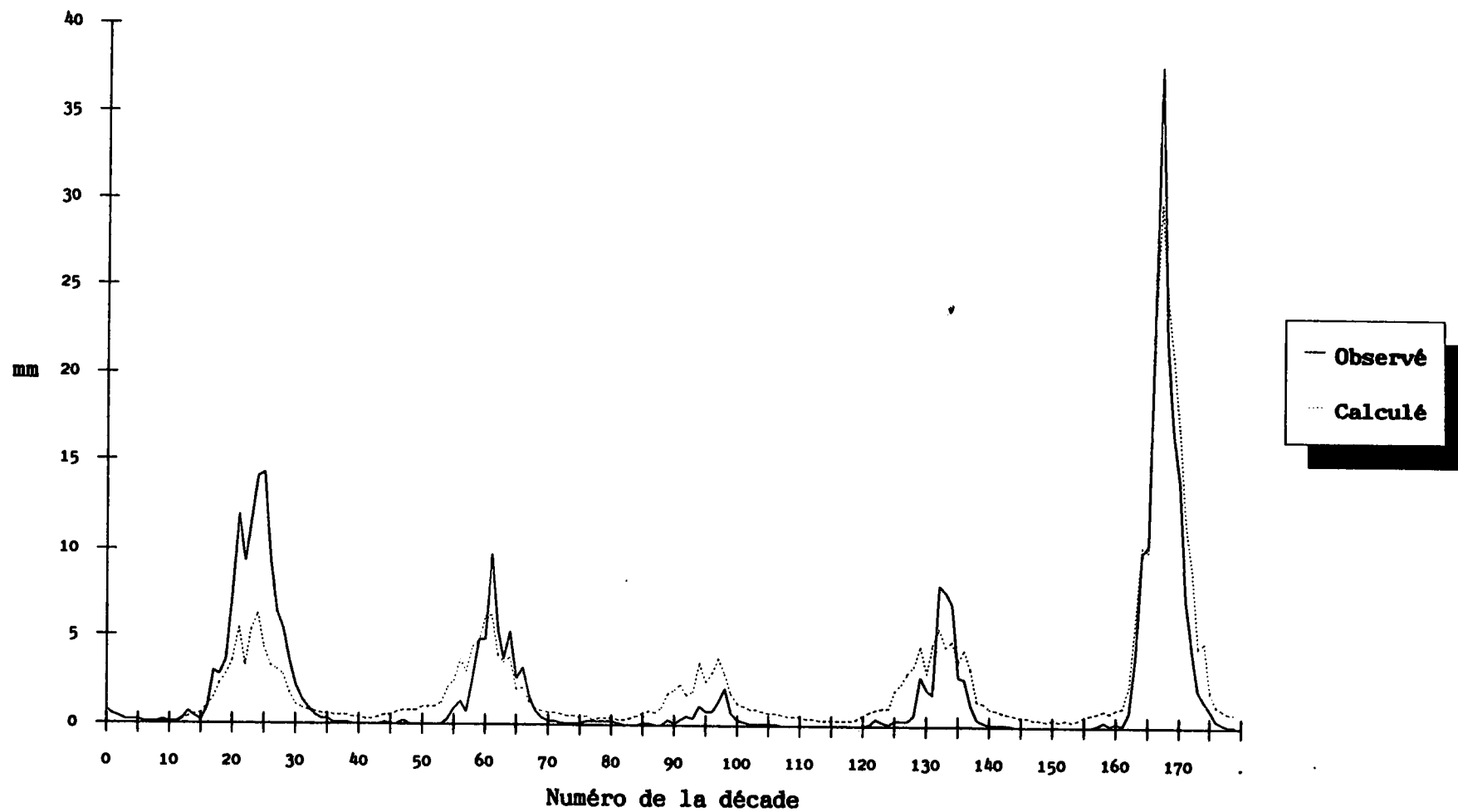
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle GR3 Critère SExpER



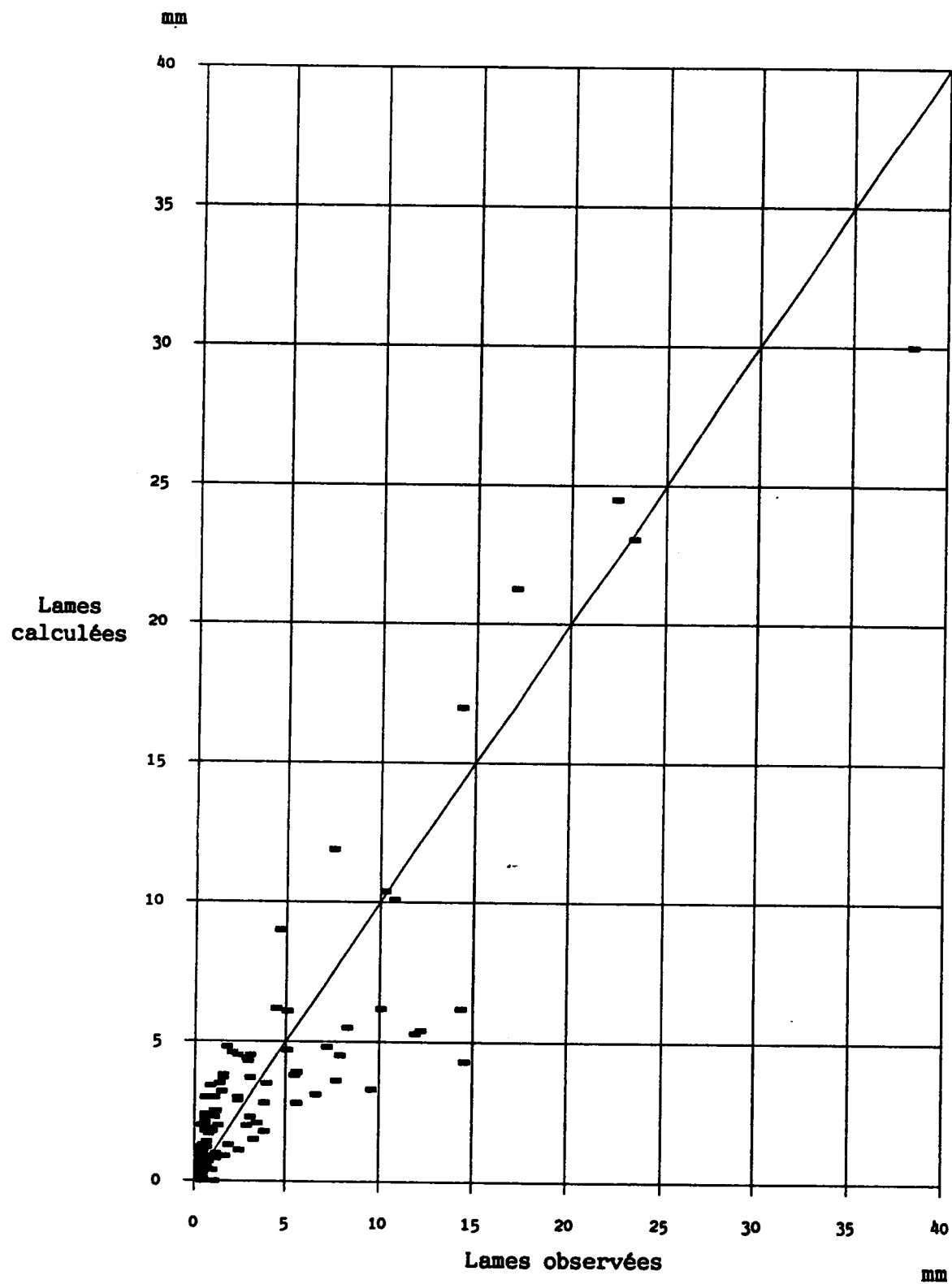
Lames décadaires - La Bagoé à Guingérini 1981 1983 - Modèle
GR3 Critère SExpER



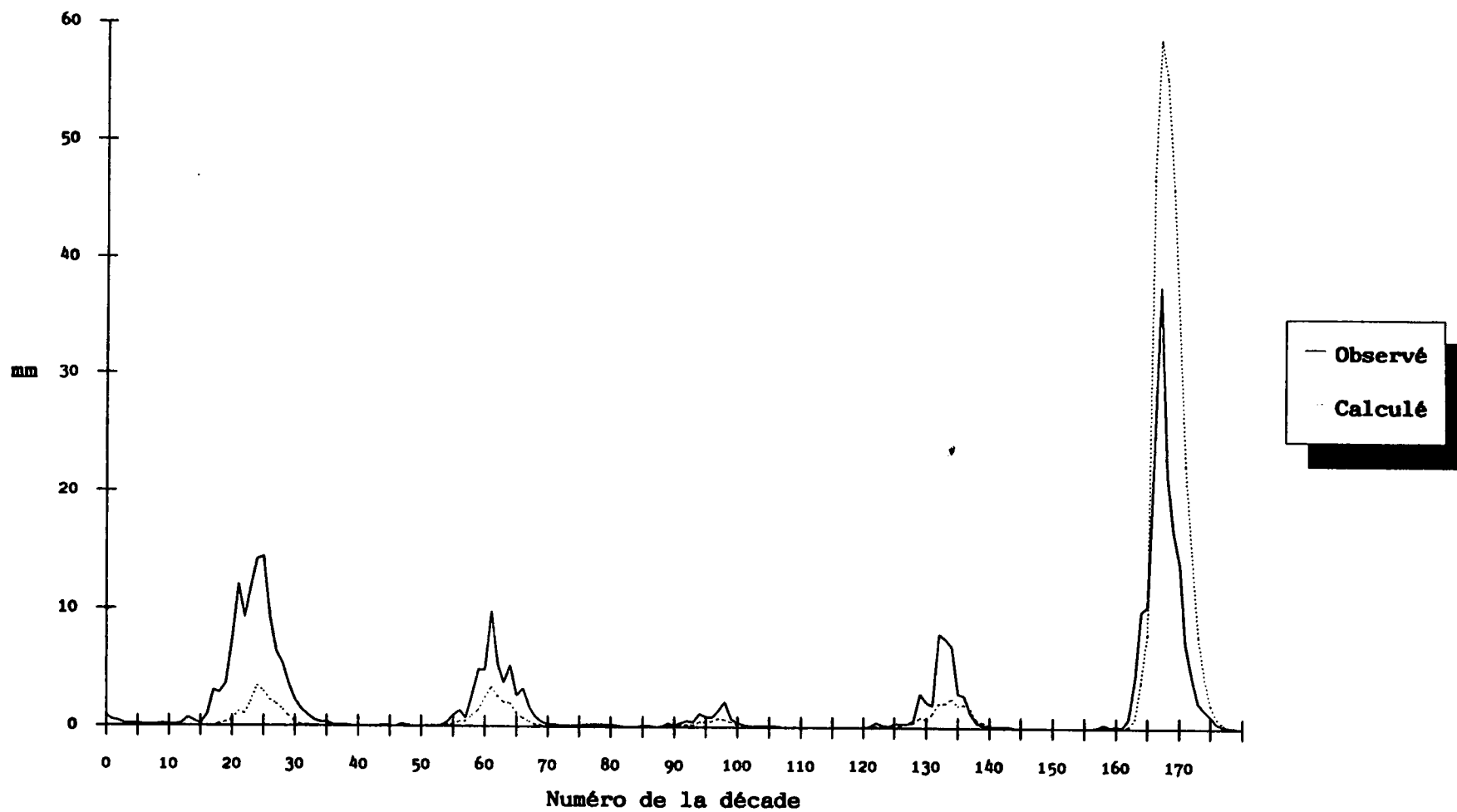
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle CREC Critère de Nash



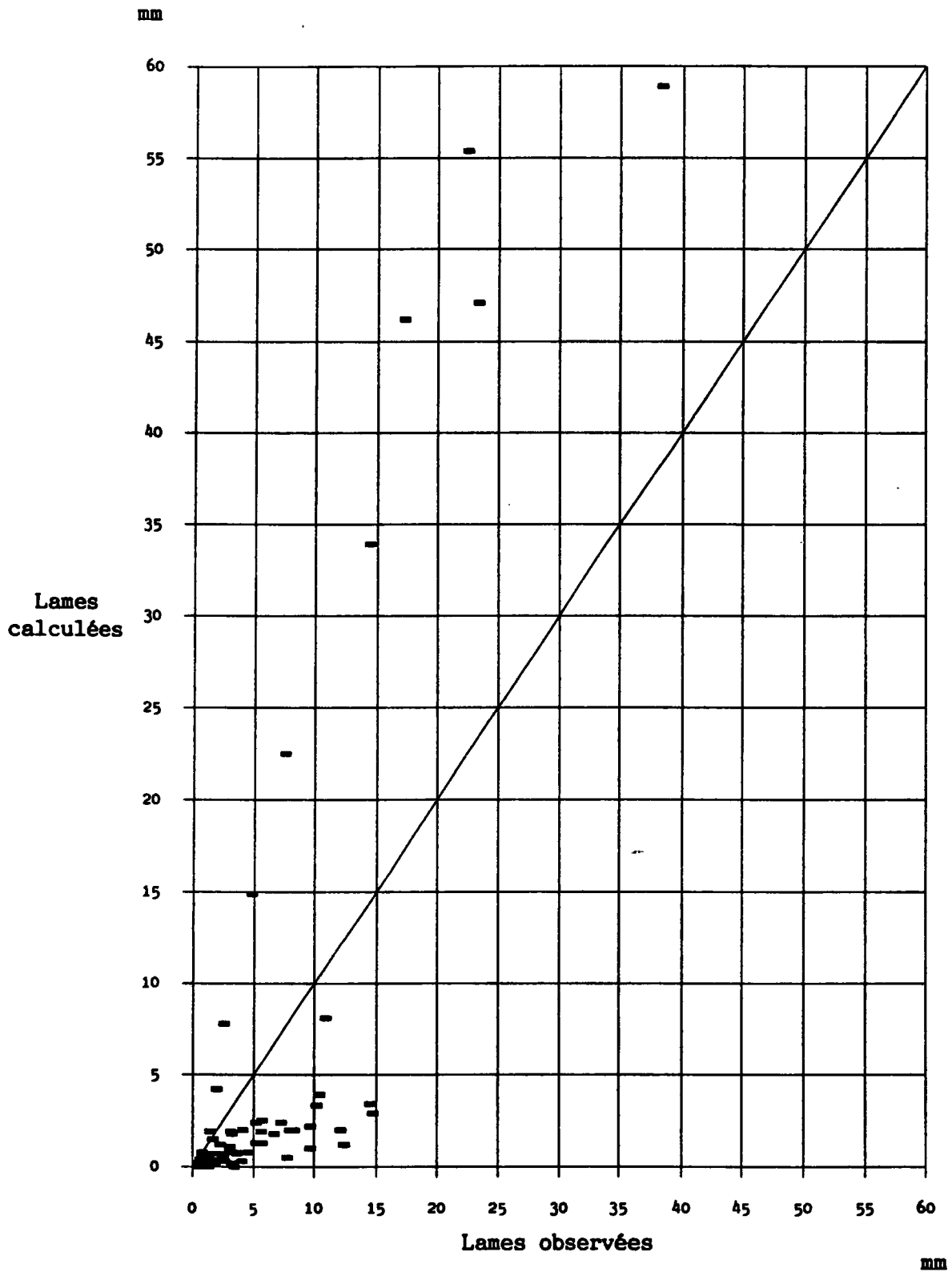
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle CREC
Critère de Nash



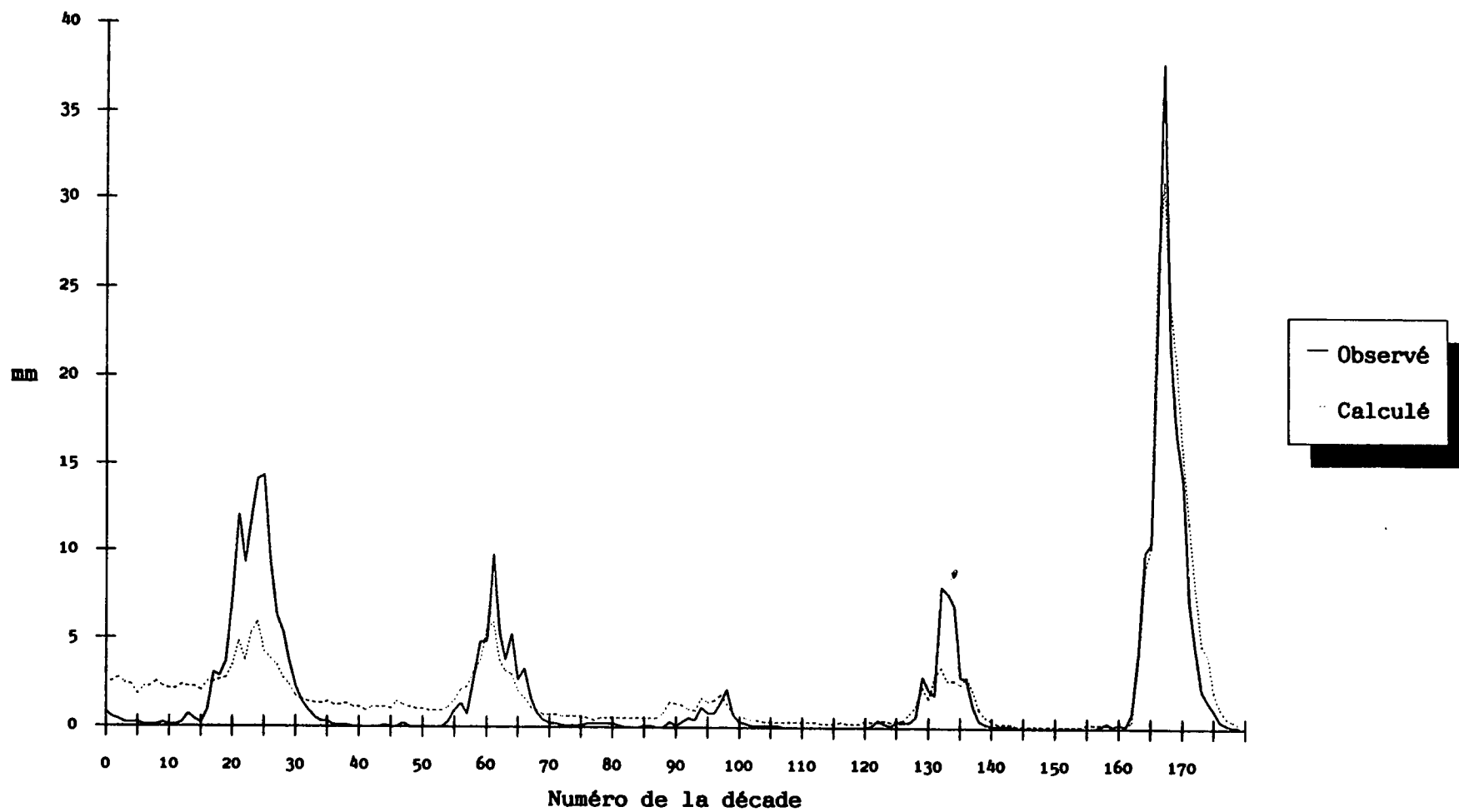
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle CREC Critère CrecBi



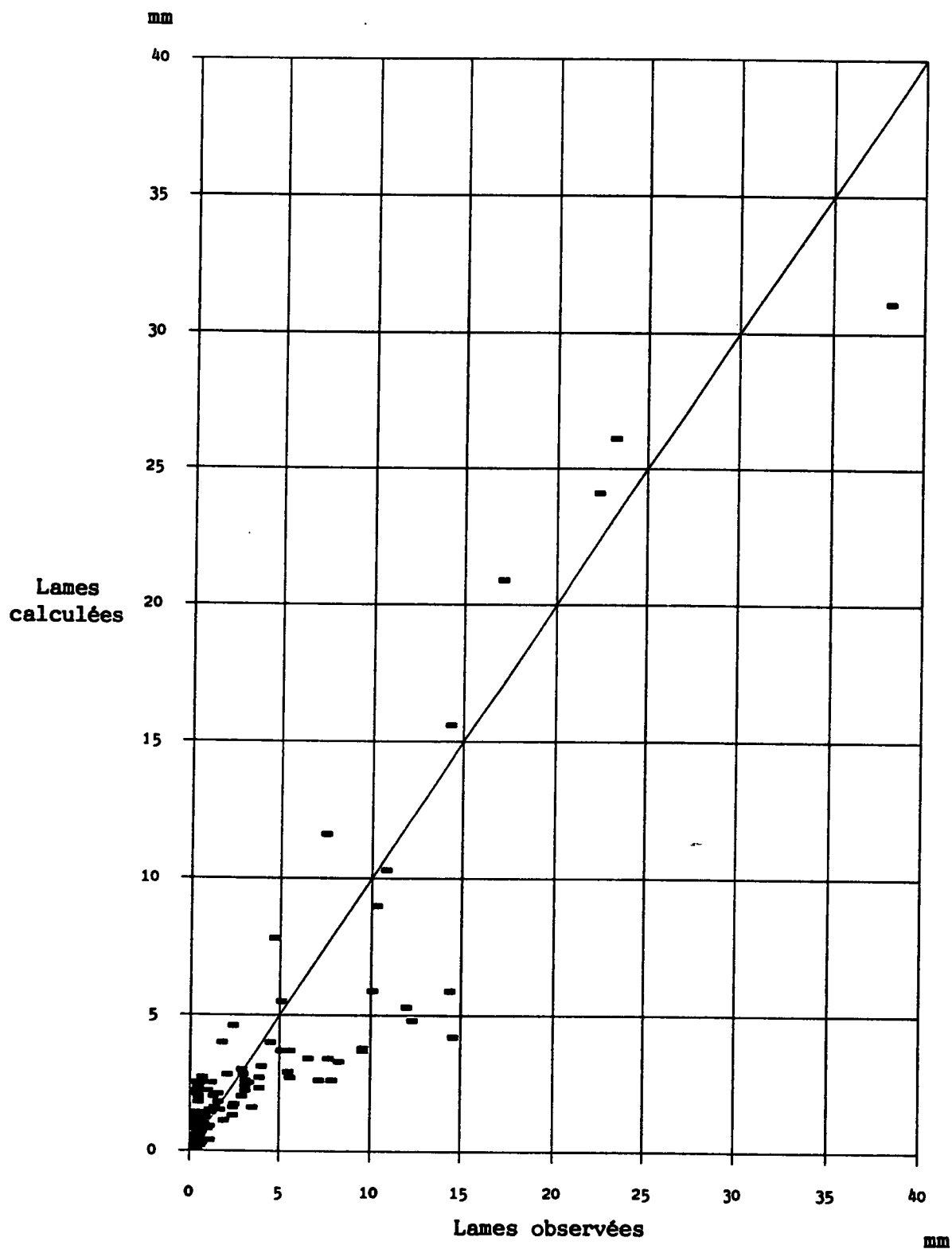
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle CREC
Critère CrecBi



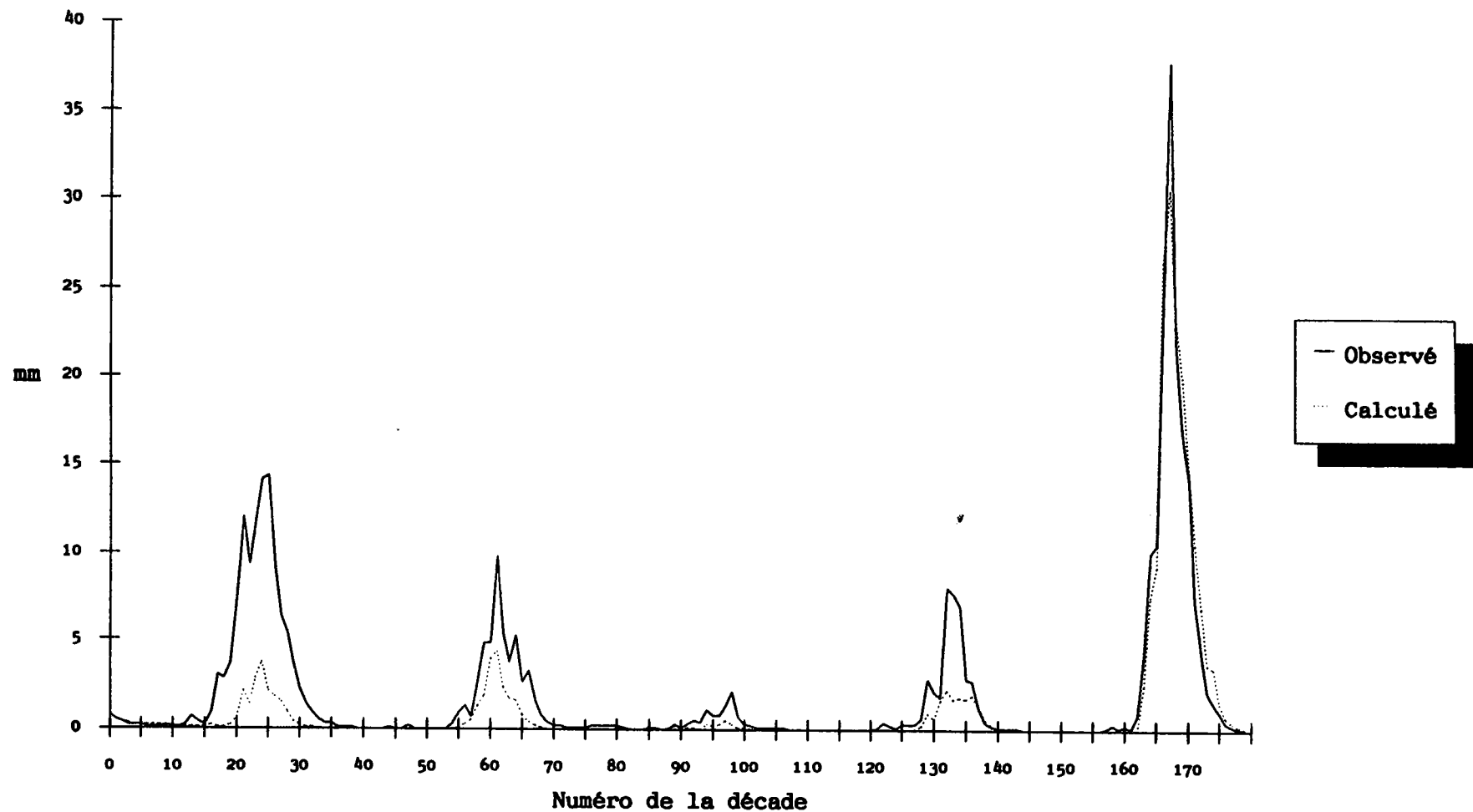
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle MODGLO Critère de Nash



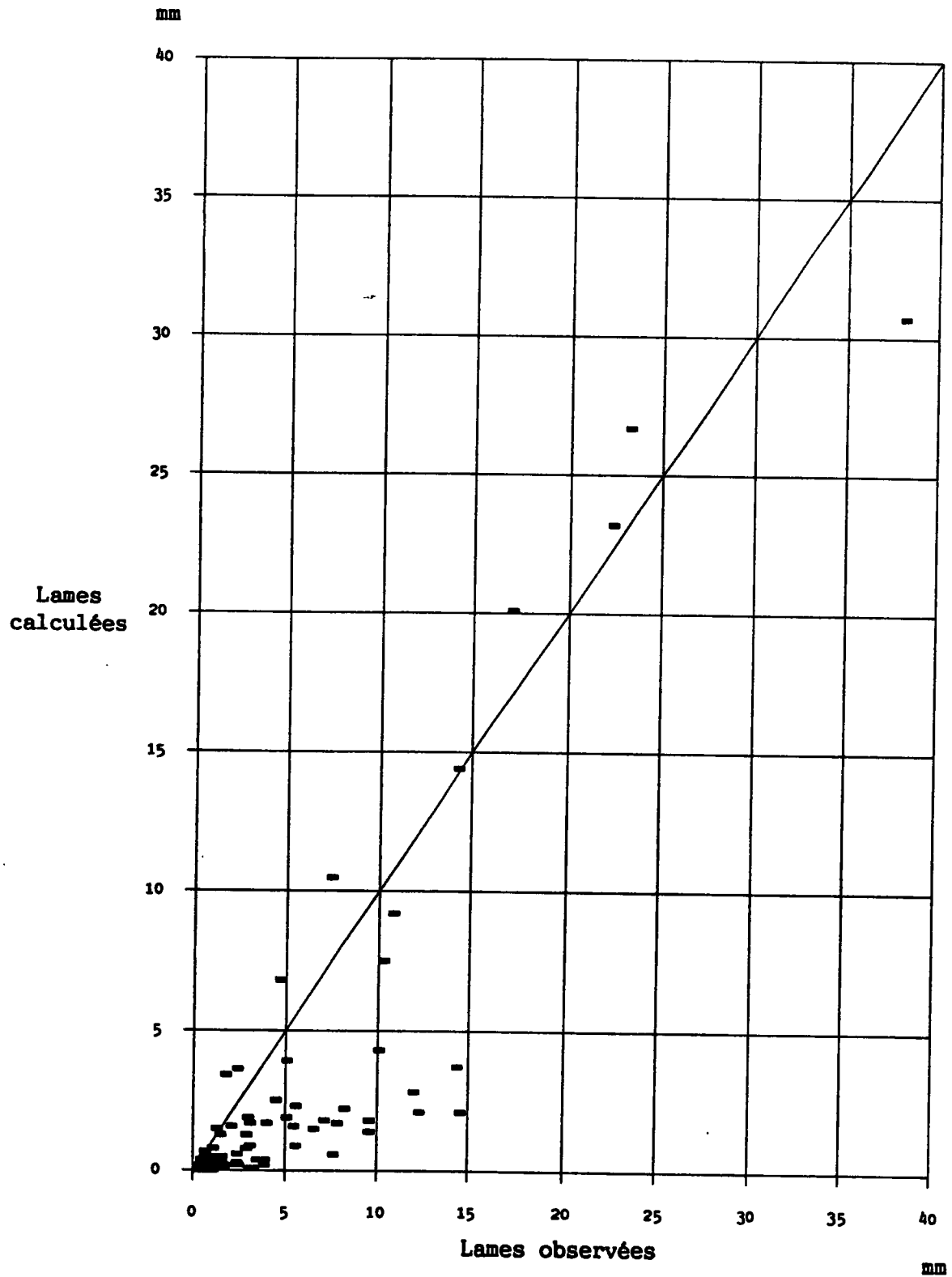
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle
MODGLO Critère de Nash



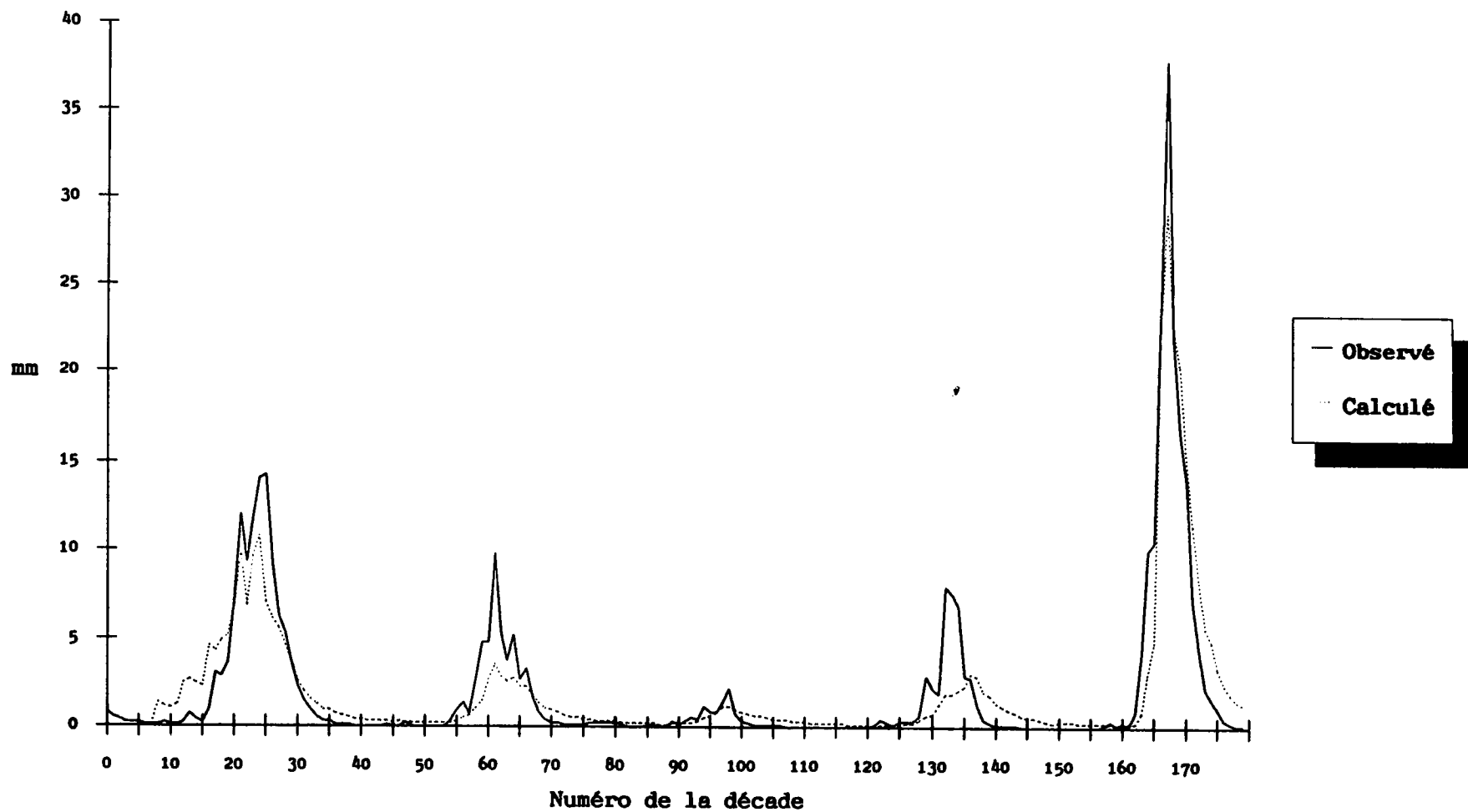
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle MODGLO Critère SExPER



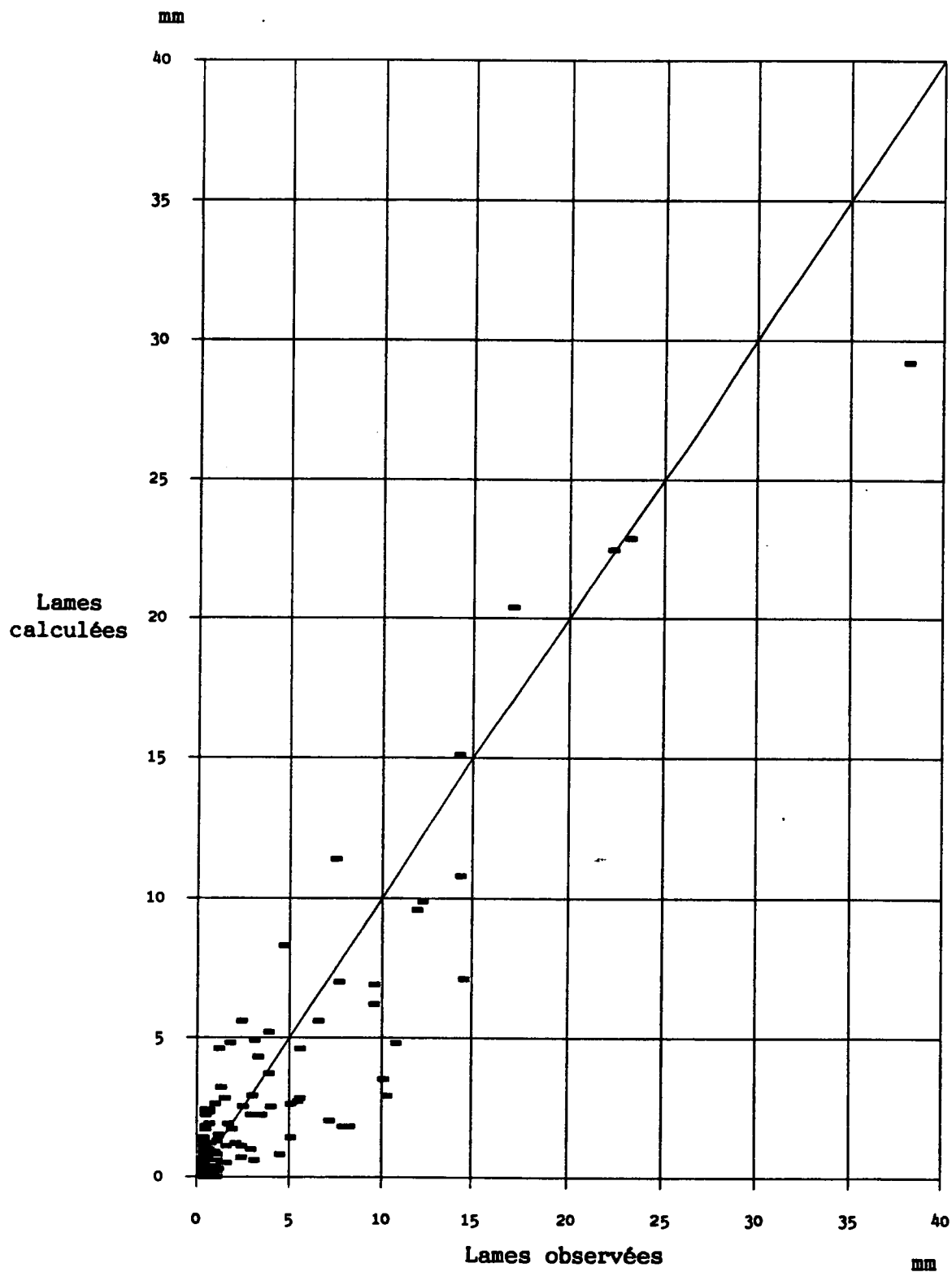
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle
MODGLO Critère SExpER



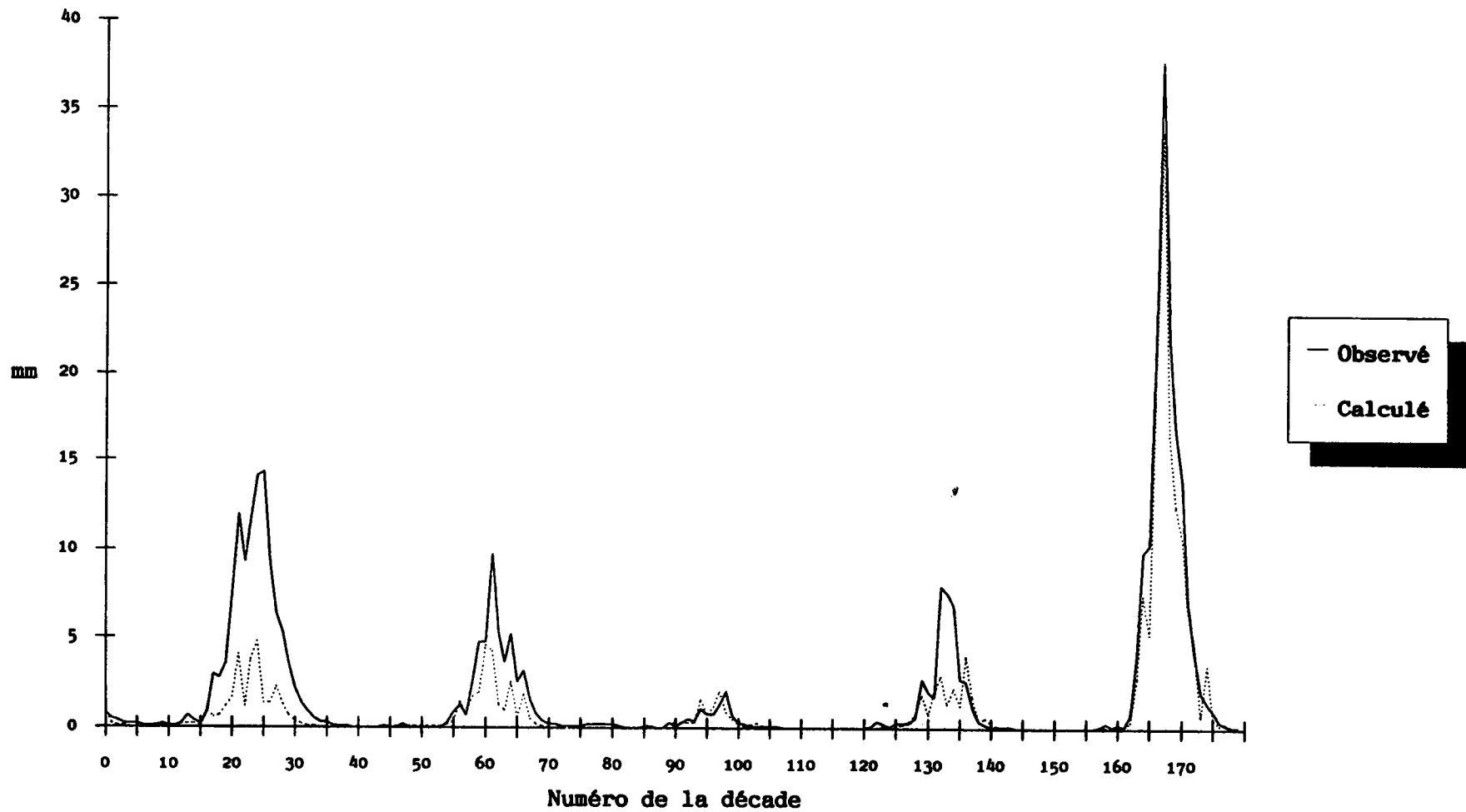
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle GR3 Critère de Nash



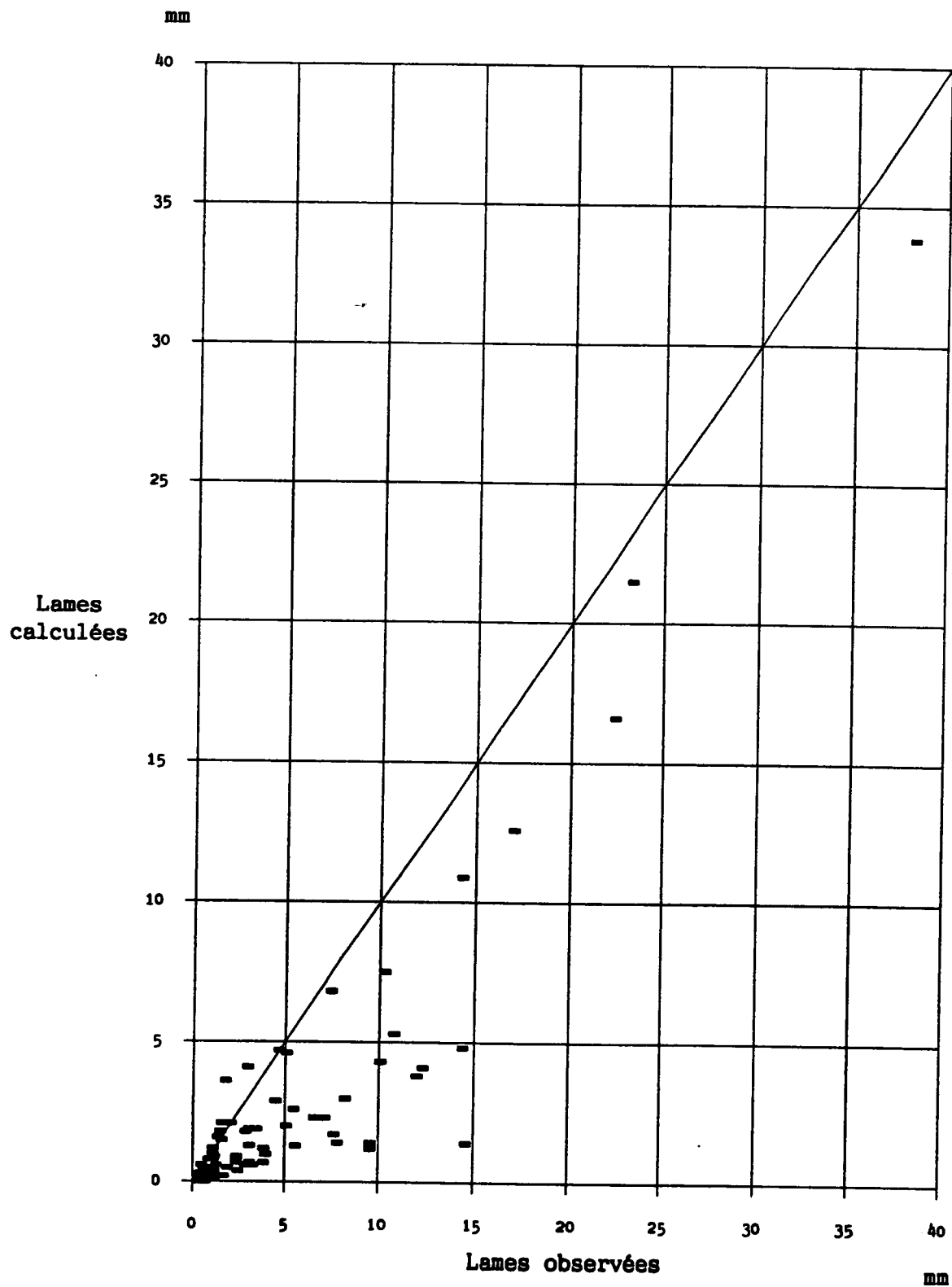
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle GR3
Critère de Nash



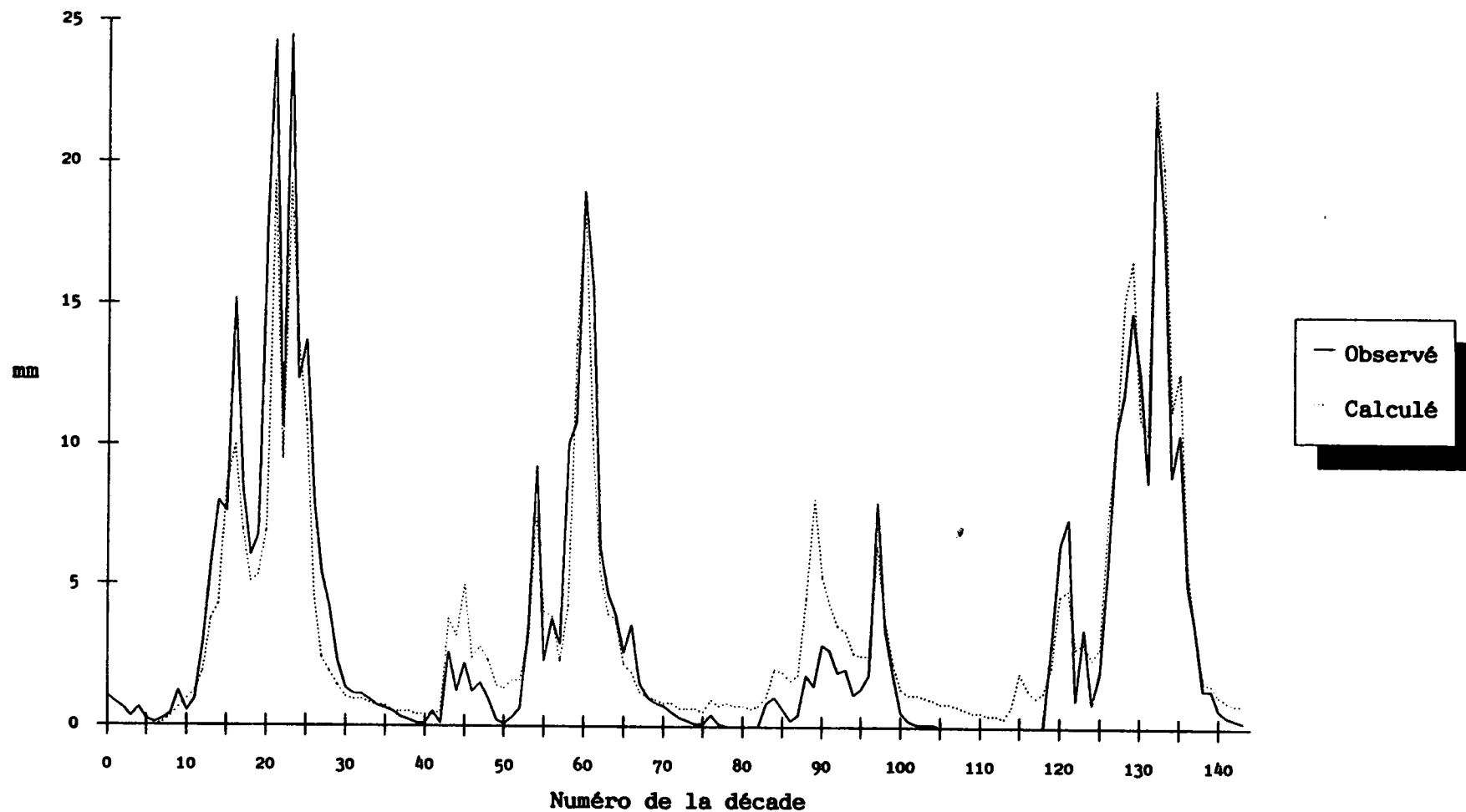
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle GR3 Critère Crec



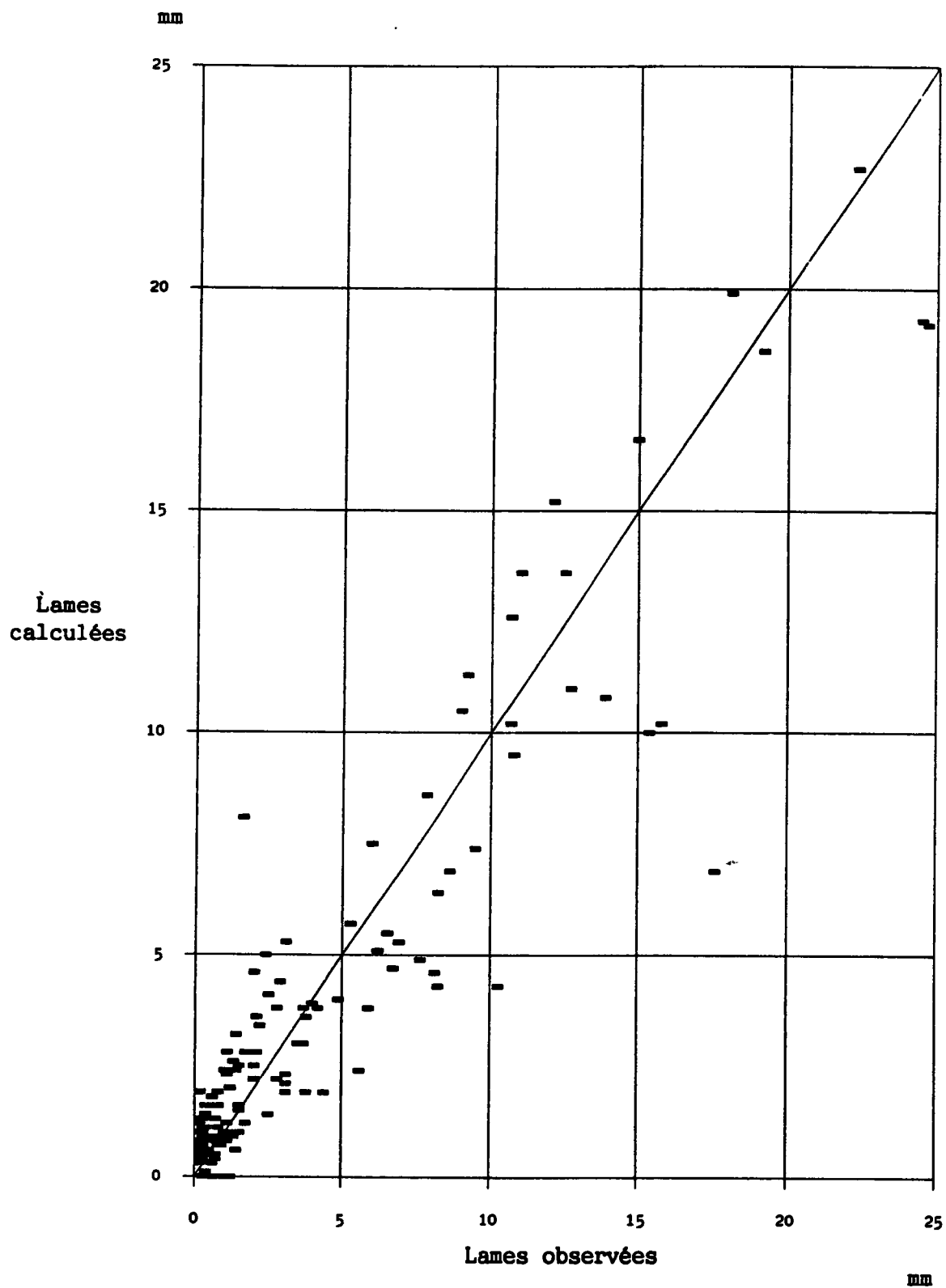
Lames décadaires - Le Bou à Boron 1981 à 1985 - Modèle GR3
Critère Crec



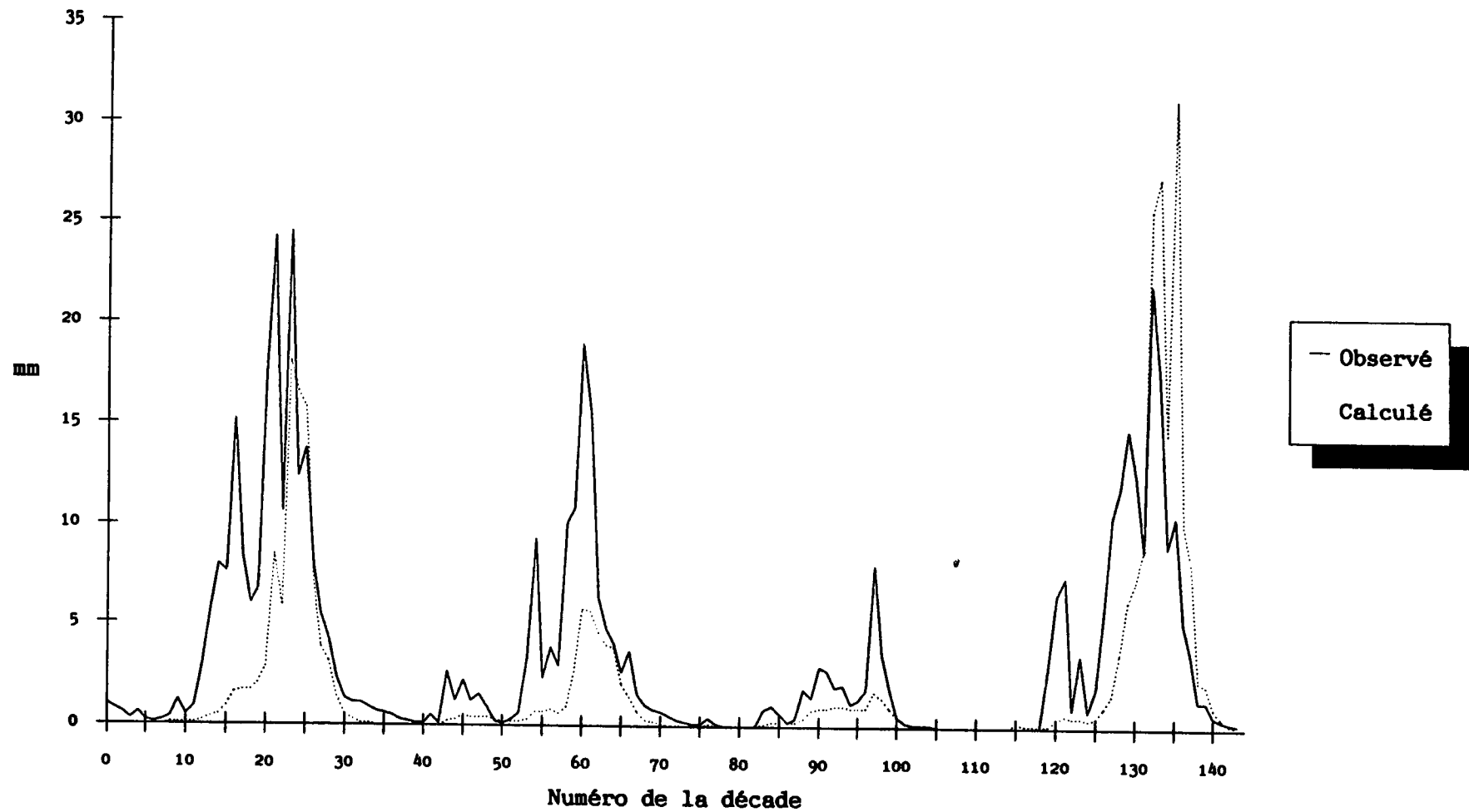
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984 - Modèle CREC Crit. de Nash



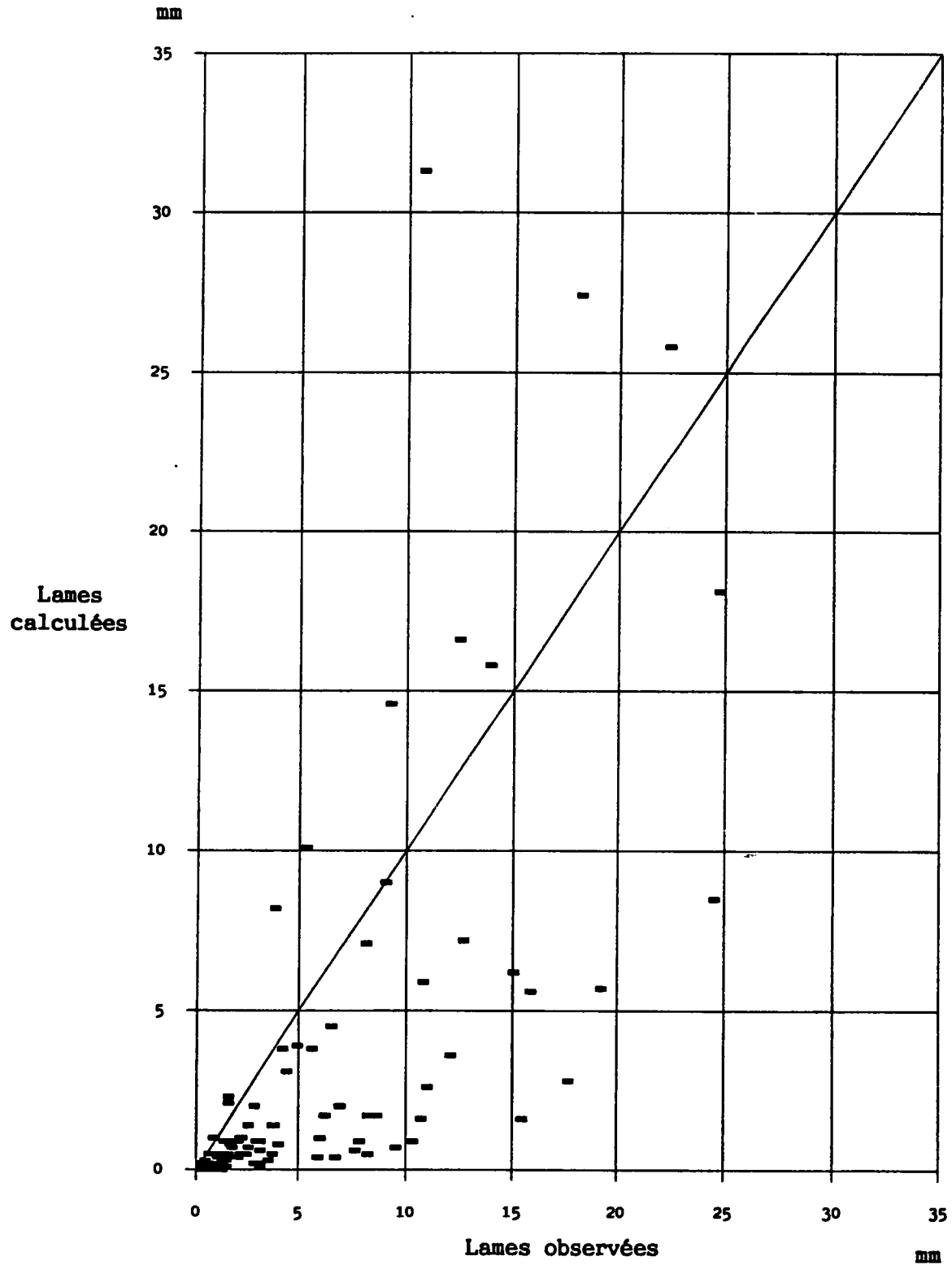
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984
- Modèle CREC Crit. de Nash



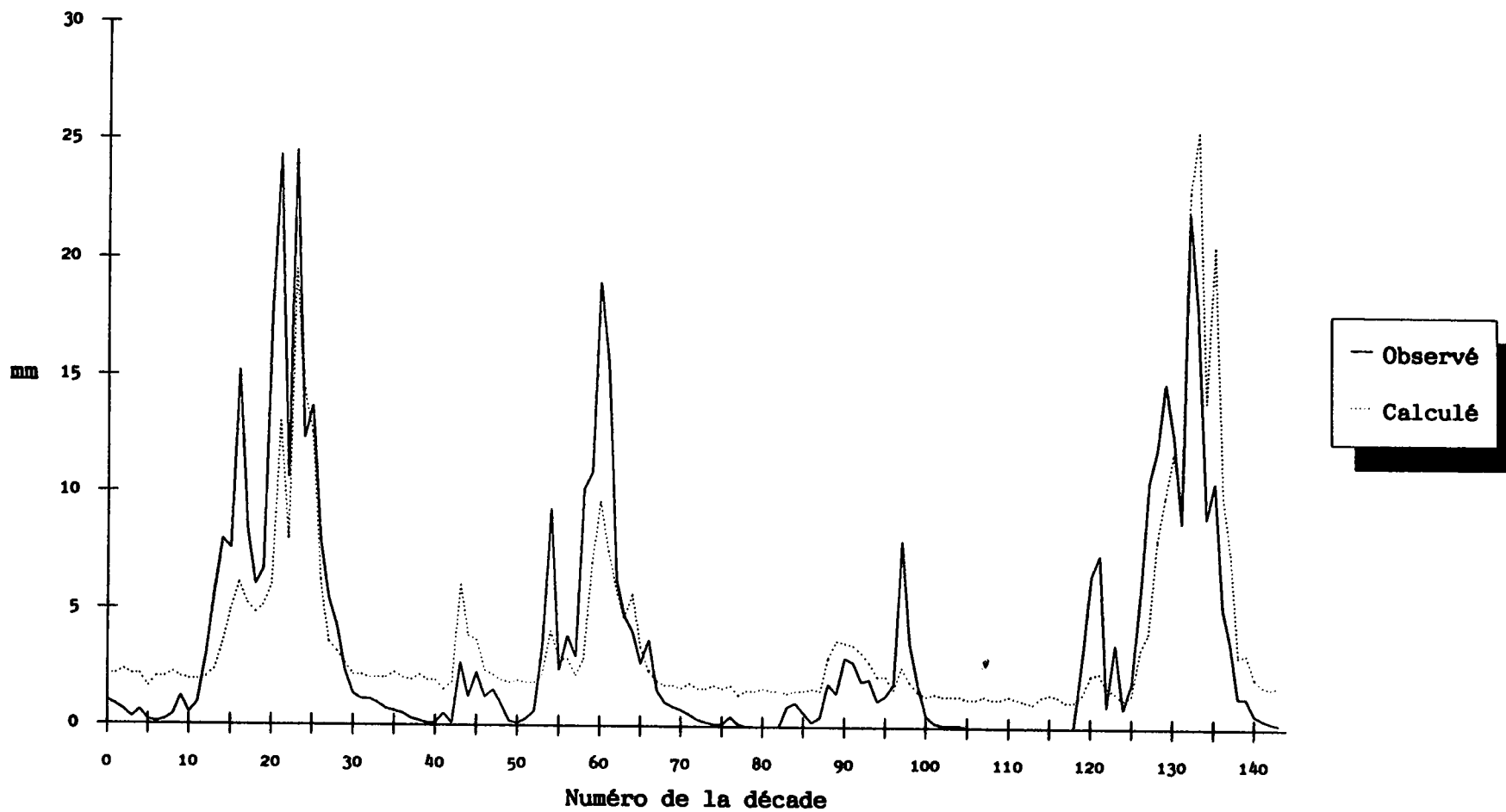
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984 - Modèle CREC Critère Crec



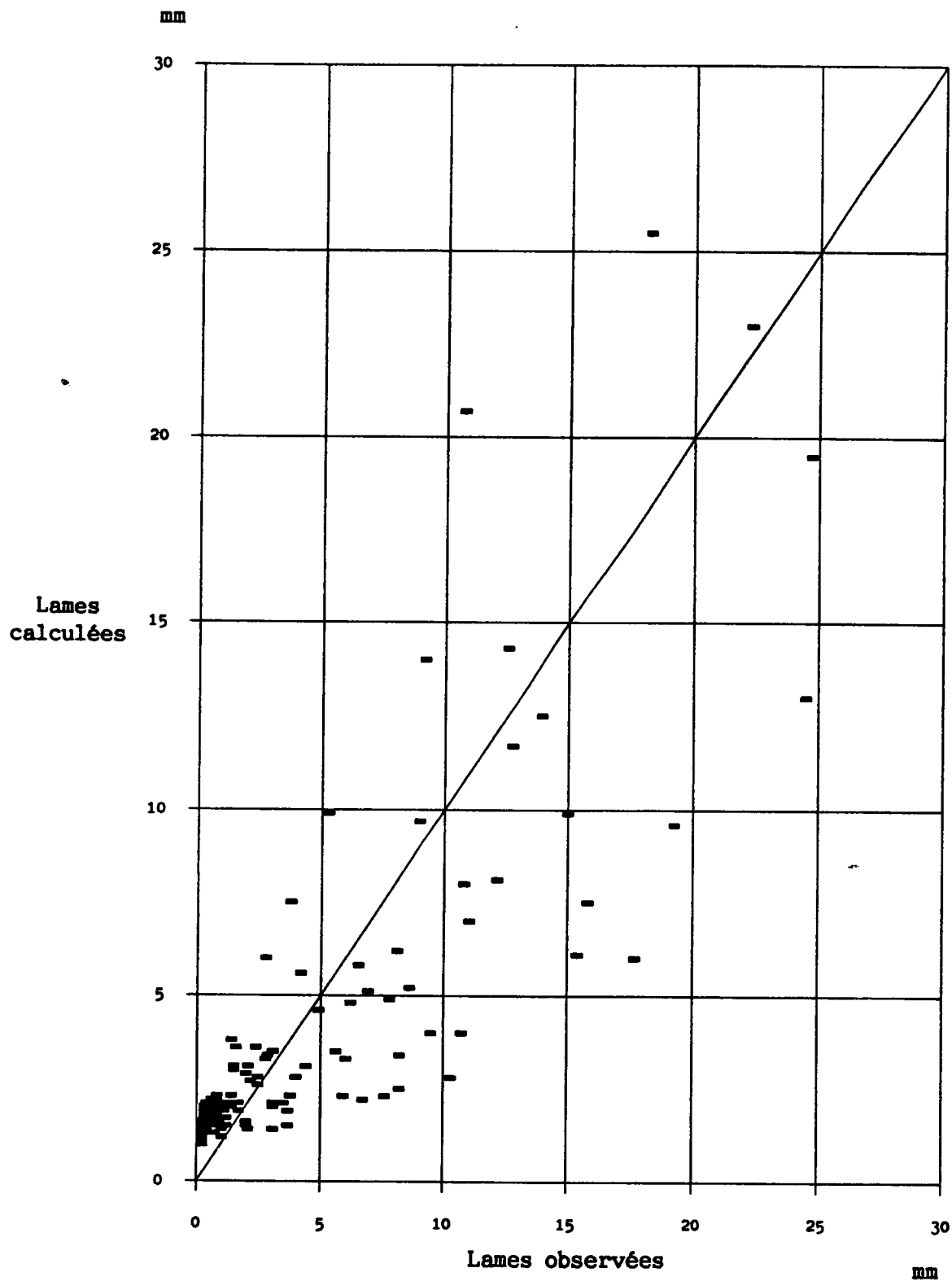
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984
- Modèle CREC Critère Crec



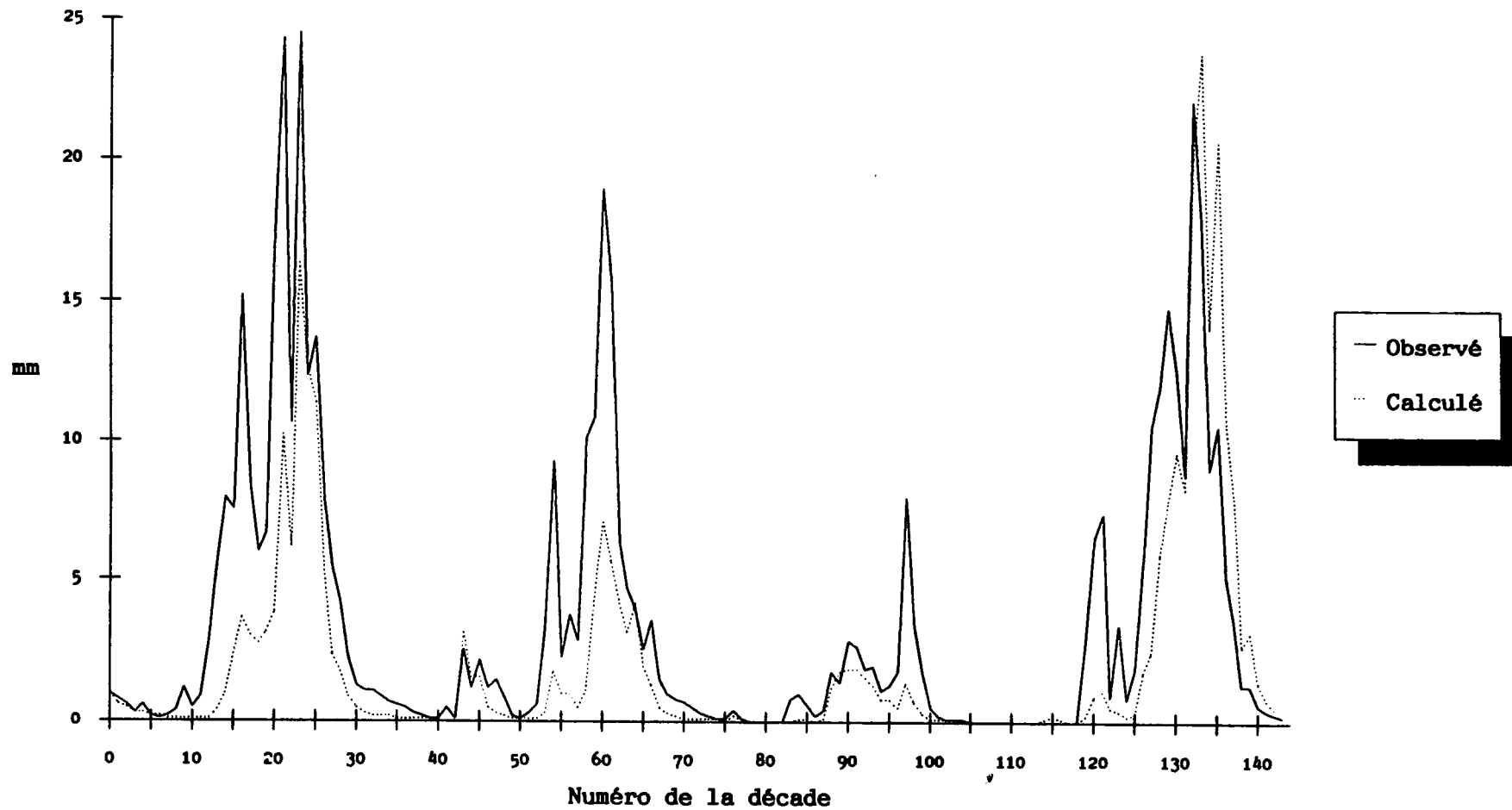
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984 - Modèle MODGLO
Critère de Nash



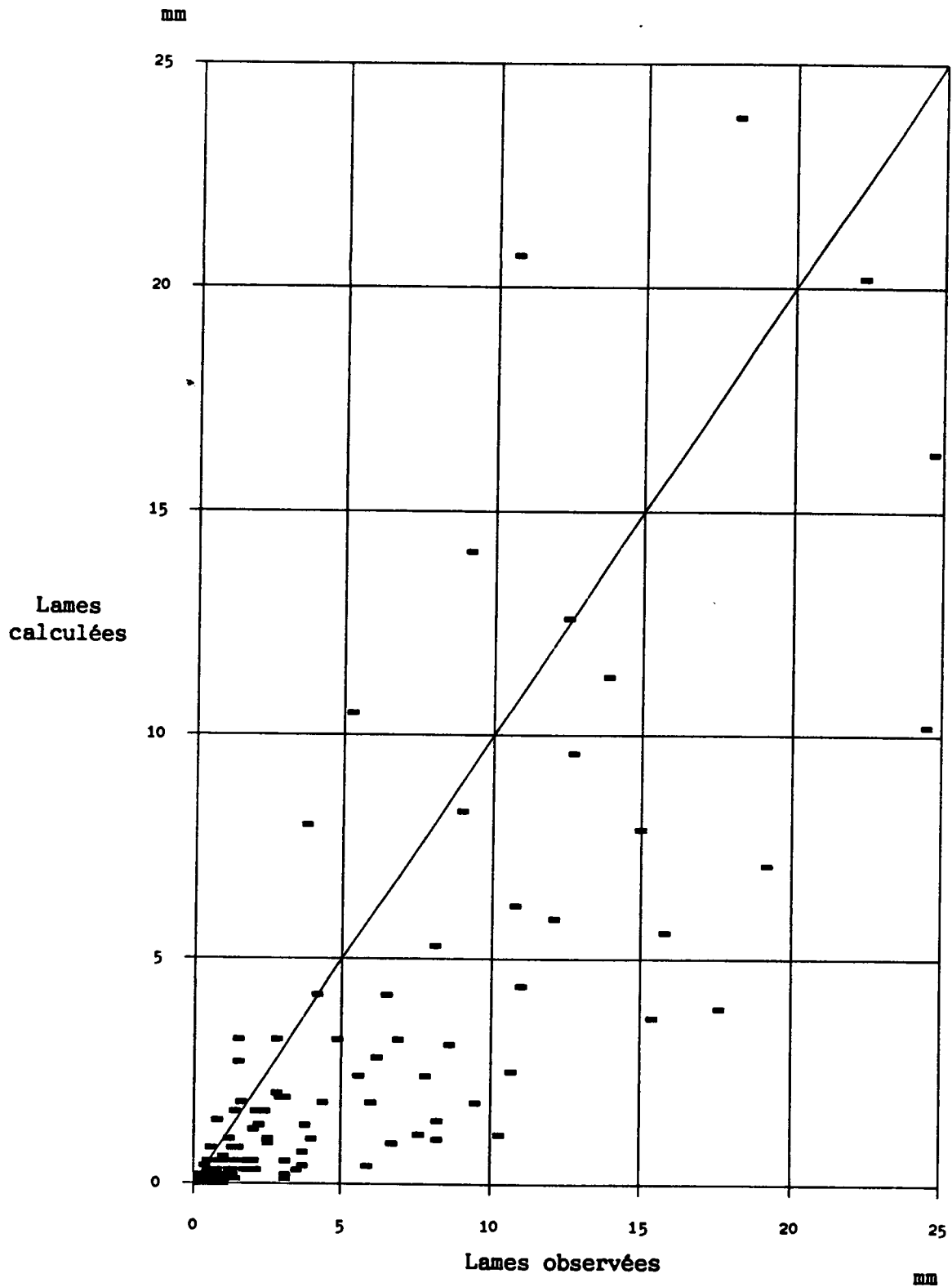
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984
 - Modèle MODGLO Crit. de Nash



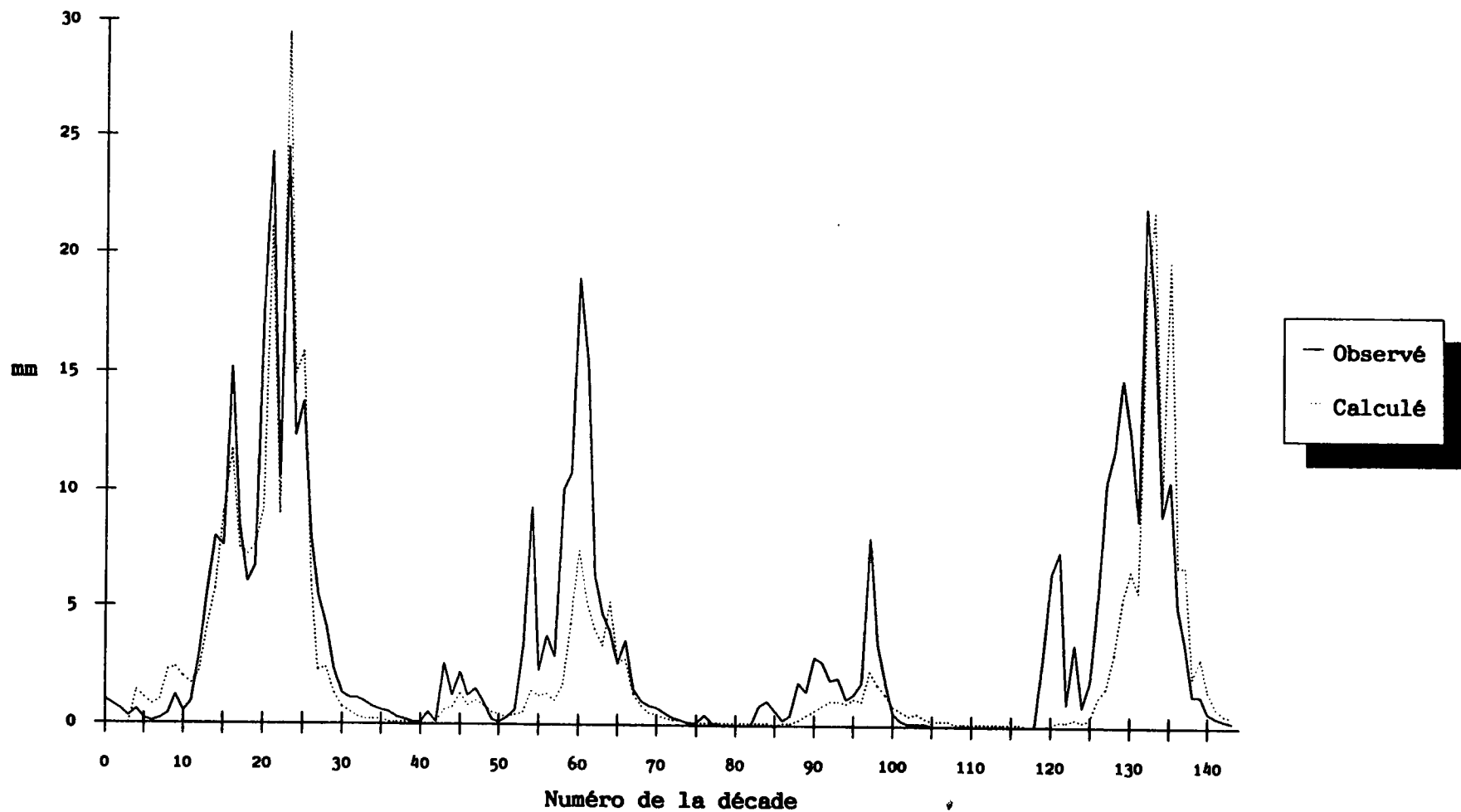
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984 - Modèle MODGLO
Critère de Fortin



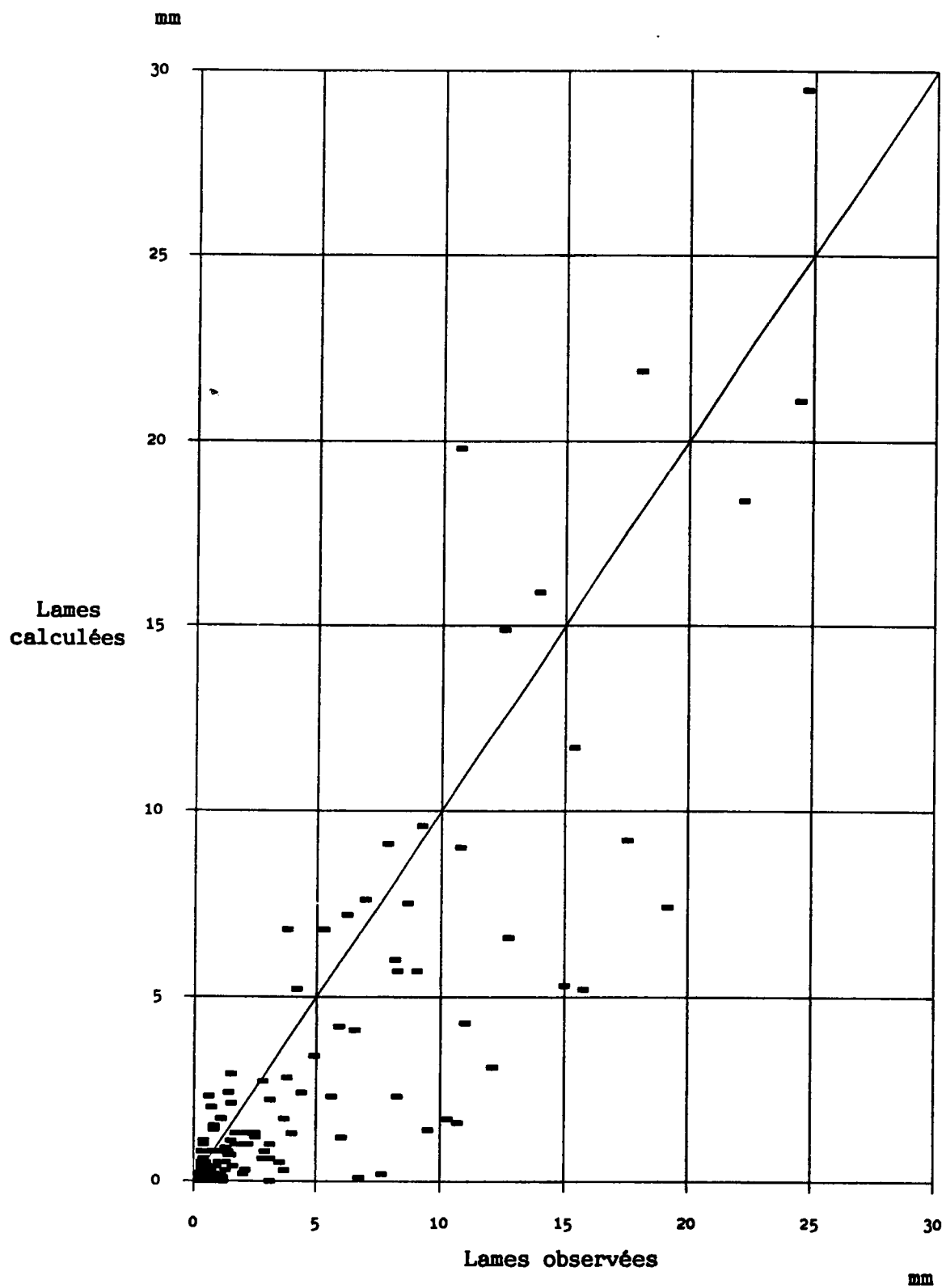
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984
- Modèle MODGLO Crit. de Fortin



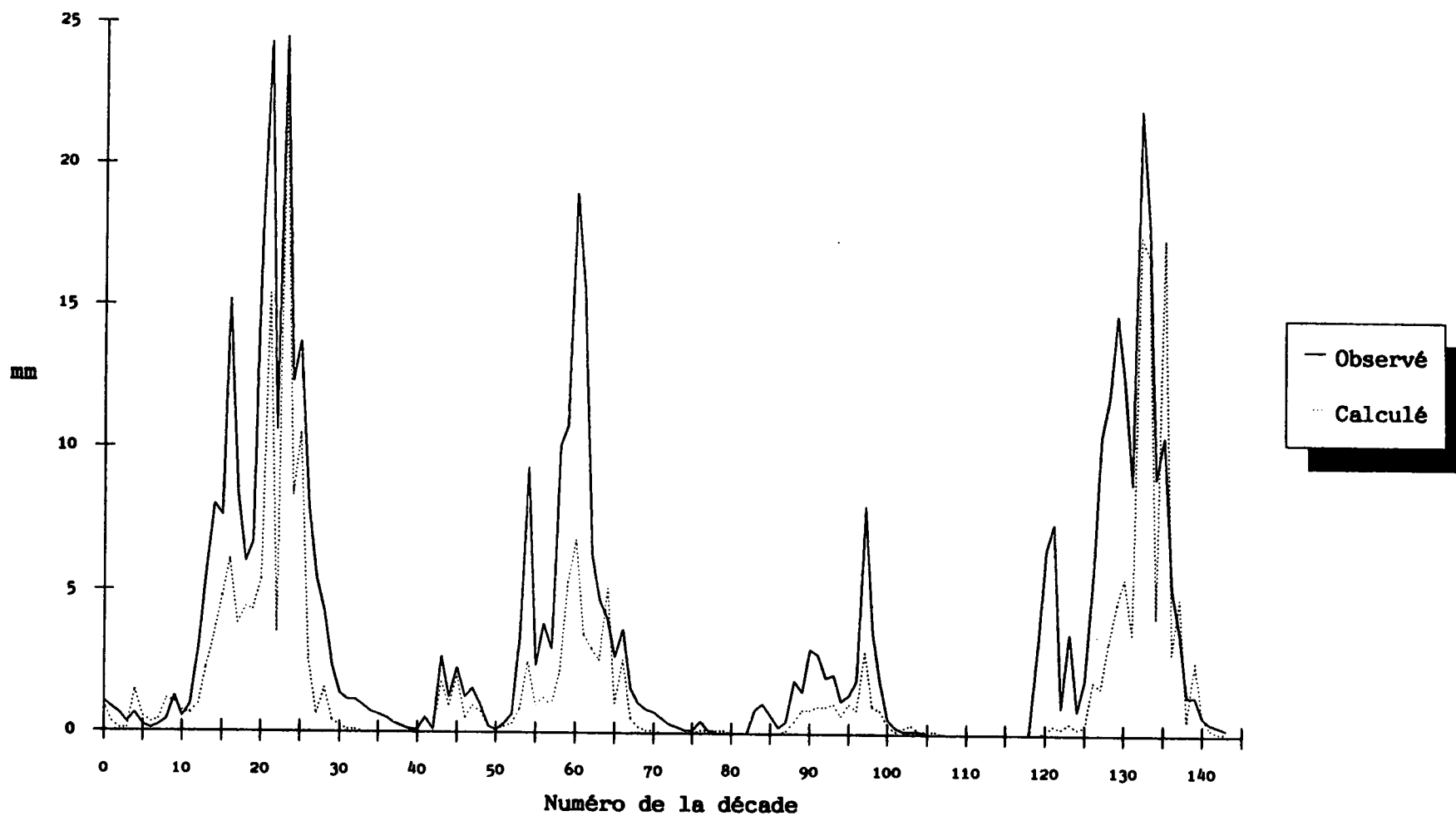
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984 - Modèle GR3 Crit. de Nash



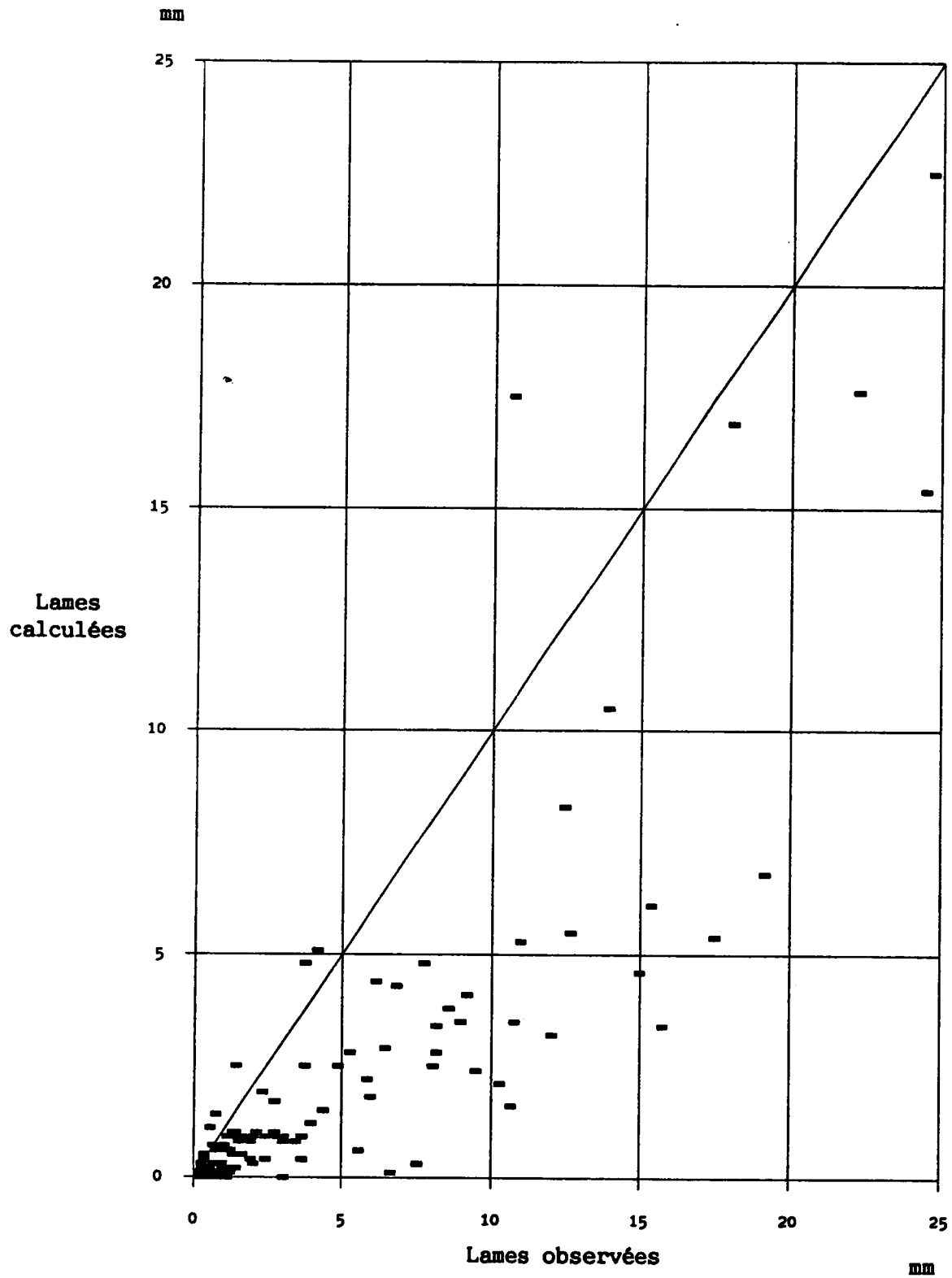
Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984
- Modèle GR3 Crit. de Nash



Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984 - Modèle GR3 Crit. SExpER



Lames décadaires - Le Lafigue (rte de Badikaha) 1981 à 1984
- Modèle GR3 Crit. SExpER



ANNEXE 2

La Bagoé à Kouto - 1981 1985 - Modèle MODGLO

Critères de Calage					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.943	0.943	0.941	0.943	0.941
Diff aut cor2	0.03590	0.03755	0.02642	0.05758	0.02912
Bilan1	20	18.8	0.1	6.1	70.1
Bilan2	216.6	215.8	214.9	221.1	226.1
IRVC	24.7	24.7	24.6	23.7	25.7

Critères de Calage					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	1	5	2	4
Diff aut cor2	3	4	1	5	2
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	3	2	1	4	5
IRVC	4	3	2	1	5
Somme	17	13	10	14	21

La Bagoé à Kouto - 1981 1985 - Modèle GR3

Critères de Calage					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.889	0.887	0.882	0.955	0.936
Diff aut cor2	0.08255	0.07837	0.08159	0.02091	0.00147
Bilan1	388.4	341.7	292.2	8.8	183.7
Bilan2	418.8	378.9	347.8	235	312.7
IRVC	54.5	47.9	40.8	14.6	34.7

Critères de Calage (rangs)					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	4	5	1	2
Diff aut cor2	5	3	4	2	1
Bilan1	5	4	3	1	2
Bilan2	5	4	3	1	2
IRVC	5	4	3	1	2
Somme	23	19	18	6	9

La Bagoë à Kouto - 1973 1976 - Modèle CREC

Critères de Calage					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.400	0.391	0.570	0.842	0.470
Diff aut cor2	0.06303	0.12846	0.05755	0.08185	0.00941
Bilan1	417.8	394.2	2.5	106.1	436.6
Bilan2	470.2	479.6	581.3	371.3	451.2
IRVC	74.6	71.8	88.4	31.6	76.4

Critères de Calage (rangs)					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	4	5	2	1	3
Diff aut cor2	3	5	2	4	1
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	3	4	5	1	2
IRVC	3	2	5	1	4
Somme	17	19	15	9	15

La Bagoé à Kouto - 1973 1976 - Modèle MODGLO

Critères de Calage					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.753	0.784	0.718	0.810	0.767
Diff aut cor2	0.13448	0.06870	0.02766	0.12364	0.09789
Bilan1	144.7	143	0.4	43.1	166.1
Bilan2	353.7	333	464.8	317.9	348.3
IRVC	53.8	52.8	67.0	44.8	55.0

Critères de Calage (rangs)					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	4	2	5	1	3
Diff aut cor2	5	2	1	4	3
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	4	2	5	1	3
IRVC	3	2	5	1	4
Somme	20	11	17	9	18

La Bagoë à Kouto - 1973 1976 - Modèle GR3

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.814	0.805	0.805	0.760	0.806
Diff aut cor2	0.03987	0.05015	0.04990	0.08123	0.03896
Bilan1	792.7	729	723.7	138.7	692.2
Bilan2	826.3	779	774.5	412.5	735.8
IRVC	154.7	144.1	142.9	48.6	119.2

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	1	3	4	5	2
Diff aut cor2	2	4	3	5	1
Bilan1	5	4	3	1	2
Bilan2	5	4	3	1	2
IRVC	5	4	3	1	2
Somme	18	19	16	13	9

La Bagoé à Guingérini - 1981 1983 - Modèle CREC

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.910	0.864	0.934	0.949	0.858
Diff aut cor2	0.01809	0.00772	0.02200	0.00282	0.12286
Bilan1	88.3	198.6	0.2	27.2	407.8
Bilan2	231.7	254.8	217	200.8	407.8
IRVC	19.6	33.1	12.6	21.4	68.5

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	4	2	1	5
Diff aut cor2	3	2	4	1	5
Bilan1	3	4	1	2	5
Bilan2	3	4	2	1	5
IRVC	2	4	1	3	5
Somme	14	18	10	8	25

La Bagoé à Guingérini - 1981 1983 - Modèle GR3

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.863	0.865	0.863	0.936	0.910
Diff aut cor2	0.10489	0.10258	0.10670	0.03349	0.04513
Bilan1	260.8	253.7	249.2	60.3	225
Bilan2	308.4	304.3	303.2	216.5	320.8
IRVC	50.0	49.2	48.8	21.0	47.9

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	5	3	4	1	2
Diff aut cor2	4	3	5	1	2
Bilan1	5	4	3	1	2
Bilan2	4	3	2	1	5
IRVC	5	4	3	1	2
Somme	23	17	17	5	13

Le Bou à Boron - 1981 1985 - Modèle CREC

Critères de Calage					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.695	0.399	0.826	0.910	0.693
Diff aut cor2	0.01646	0.69953	0.02386	0.09917	0.01746
Bilan1	267.5	355.2	4.7	45.4	300.7
Bilan2	285.5	355.2	334.1	218	305.5
IRVC	70.7	95.7	82.5	31.0	81.4

Critères de Calage (rangs)					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	5	2	1	4
Diff aut cor2	1	5	3	4	2
Bilan1	3	5	1	2	4
Bilan2	2	5	4	1	3
IRVC	2	5	4	1	3
Somme	11	25	14	9	16

Le Bou à Boron - 1981 1985 - Modèle MODGLO

Critères de Calage					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.886	0.889	0.876	0.910	0.884
Diff aut cor2	0.05105	0.05275	0.01414	0.07054	0.05259
Bilan1	148.2	142.6	0.5	21.4	150.1
Bilan2	185.2	181	284.1	207.8	188.9
IRVC	39.5	38.6	73.6	26.5	40.3

Critères de Calage (rangs)					
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	2	5	1	4
Diff aut cor2	2	4	1	5	3
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	2	1	5	4	3
IRVC	3	2	5	1	4
Somme	14	12	17	13	19

Le Lafigue à Rte de Badikaha - 1981 1984 - Modèle MODGLO

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.761	0.783	0.706	0.823	0.657
Diff aut cor2	0.09268	0.07451	0.10973	0.03996	0.08937
Bilan1	251.5	205.3	0.3	14.9	343.8
Bilan2	306.5	281.9	398.9	297.3	376.2
Volcrue	43.7	33.8	54.5	22.1	62.4

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	2	4	1	5
Diff aut cor2	4	2	5	1	3
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	3	1	5	2	4
Volcrue	3	2	4	1	5
Somme	17	10	19	7	22

Le Lafigue à Rte de Badikaha - 1981 1984 - Modèle GR3

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.813	0.811	0.806	0.849	0.848
Diff aut cor2	0.09079	0.09200	0.12206	0.05599	0.04154
Bilan1	243.9	198.2	0.5	138	249.7
Bilan2	286.1	276.6	288.9	238.8	276.9
IRVC	41.8	31.0	30.3	26.3	46.1

	Critères de Calage (rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	4	5	1	2
Diff aut cor2	3	4	5	2	1
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	4	2	5	1	3
IRVC	4	3	2	1	5
Somme	18	16	18	7	16

Le Lafigue à Rte de Badikaha - 1981 1984 - Modèle CREC

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	0.696	0.696	0.765	0.933	0.685
Diff aut cor2	0.01606	0.01373	0.00854	0.03313	0.06254
Bilan1	206.1	210.8	1.1	12.6	298
Bilan2	323.7	323.4	397.7	178	344.2
IRVC	35.7	35.7	51.4	18.7	51.1

	Critères de Calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Corr	3	4	2	1	5
Diff aut cor2	3	2	1	4	5
Bilan1	3	4	1	2	5
Bilan2	3	2	5	1	4
IRVC	3	3	5	1	4
Somme	15	15	14	9	23