

**E. DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL STATISTIQUE DE  
PREVISION DES CRUES**

## TABLE DES MATIERES

---

<b>E. DEVELOPPEMENT D’UN OUTIL STATISTIQUE DE PREVISION DES CRUES</b>	<b>1</b>
<b>1. OBJECTIFS</b>	<b>1</b>
<b>2. DESCRIPTION DE L’EXISTANT</b>	<b>2</b>
2.1. Points de prévision	2
2.2. Equipements informatiques du Service de Prévion des Crues à Angers	2
2.3. Outils de prévision existants	5
2.3.1. Prévions sur le bassin de l’Oudon	5
2.3.2. Prévions sur le bassin de la Mayenne	5
2.3.3. Prévions sur le bassin de la Sarthe	5
2.3.4. Prévions sur le bassin du Loir	6
2.3.5. Prévions à Angers :	6
2.4. Objectifs et contraintes pour la mise en place d’un nouvel outil de prévision des crues à Angers et à Montjean-sur-Loire basé sur les outils existants	6
2.5. Analyse des prévisions à Angers et Montjean-sur-Loire réalisées avec les outils existants	7
2.5.1. Prévions à Montjean-sur-Loire	7
2.5.2. Prévions à Angers	9
<b>3. AMELIORATION DES OUTILS DE PREVISION EXISTANTS</b>	<b>11</b>
3.1. Prévions à 24h à Montjean-sur-Loire	11
3.1.1. Méthode	11
3.1.2. Echantillon de calage avec une seule crue : décembre 1999	12
3.1.2.1. <i>Type de calages effectués</i>	12
3.1.2.2. <i>Tests</i>	13
3.1.3. Echantillon de calage avec 3 crues : Décembre 1999, Mars 2001 et Janvier 2004	15
3.1.4. Tests sur 11 crues	18
3.2. Prévions à 24h à Angers	27
3.2.1. Méthode	27
3.2.2. Tests	28
3.2.3. Outil complet de prévision	30
3.3. Prise en compte explicite des apports intermédiaires a partir de l’Aubance et du Layon	35
3.3.1. Prévions à Montjean-sur-Loire	36
3.3.2. Prévions à Angers	39
3.4. Conclusion	41

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Qualité des prévisions à Montjean-sur-Loire effectuées avec les outils existants .....	9
Tableau 2 : Qualité des prévisions à Angers effectuées avec les outils existants .....	10
Tableau 3 : Décalages temporels pris en compte pour la prévision .....	11
Tableau 4 : Liste des cas étudiés pour les tests sur la crue de décembre 1999 .....	13
Tableau 5 : Tranches de gradients (en m3/s/h) prises en compte pour l'application des équations (cas 1 et cas 2) .....	16
Tableau 6 : Comparaison des différents types d'équations sur les crues de test .....	19
Tableau 7 : Paramètres du modèle de régression retenu .....	20
Tableau 8 : Qualité des prévisions à Montjean-sur-Loire .....	27
Tableau 9 : Qualité des prévisions à Angers (enchaînement prévisions Montjean-sur-Loire et Angers) .....	35
Tableau 10 : Coefficients des équations de prévision à Montjean-sur-Loire prenant en compte les débits du Layon et de l'Aubance .....	36
Tableau 11 : Qualité des prévisions à Montjean-sur-Loire avec prise en compte des débits du Layon et de l'Aubance .....	39
Tableau 12 : Qualité des prévisions à Angers avec prise en compte des débits du Layon et de l'Aubance .....	40

## ANNEXE E : PREVISION EFFECTUEE A MONTJEAN ET ANGERS AVEC LES OUTILS EXISTANTS

## **1. OBJECTIFS**

---

Il est nécessaire en période de crue de faire une bonne prévision des hauteurs d'eau qui vont être atteintes d'autant plus que les enjeux dans les Basses Vallées Angevines sont importants.

Pour améliorer la prévision, un outil de prévision des hauteurs d'eau à Angers et à Montjean-sur-Loire a été développé à partir de l'analyse des outils existants.

Cet outil doit être intégré à la chaîne de prévision temps réel et être directement utilisable par le Service de Prévion des Crues d'Angers.

## 2. DESCRIPTION DE L'EXISTANT

---

La description de l'existant correspond à la période au cours de laquelle l'outil de prévision a été développé (année 2004).

### 2.1. POINTS DE PREVISION

Dans la zone d'étude, le Service de Prévion des Crues d'Angers est chargé des prévisions aux stations suivantes :

Pour la saison 2004 – 2005 :

- Oudon : Segré/Maingué
- Mayenne : Château-Gontier (écluse du Pendu) et Chambellay
- Sarthe : Sablé sur Sarthe
- Maine : Angers (Pont de Basse Chaîne)
- Loir : La Flèche

A partir de septembre 2005 :

- Loire : Saumur, Ponts de Cé et Montjean-sur-Loire

Ces points de prévision sont des stations CRISTAL.

Les stations CRISTAL ont généralement remplacé les stations DIREN lorsqu'il y en avait une, sauf à Château-Gontier où la station DIREN et la station CRISTAL sont installées à des emplacements différents.

### 2.2. EQUIPEMENTS INFORMATIQUES DU SERVICE DE PRÉVISION DES CRUES ANGERS

Le Service de Prévion des Crues d'Angers est équipé avec les installations décrites ci-dessous.

▪ **Une unité centrale de collecte CRISTAL** assurant les fonctions suivantes :

- Collecte des données : la collecte est effectuée par connexion directe aux stations du réseau CRISTAL. En mode secours, les données peuvent être collectées auprès d'un autre concentrateur du réseau CRISTAL (Le Mans par exemple, ou Orléans). Les caractéristiques de la collecte sont les suivantes :
  - Pas de temps de collecte : 4h (modifiable jusqu'à ½ heure).
  - Données au pas de temps 10 minutes.
  - 50 stations sont collectées, la collecte dure 15 minutes (pour 4h de données au pas de temps 10 minutes). A terme, il est prévu de collecter à Angers 75 stations, soit une durée de collecte de 20 minutes.
  - Les données collectées sont les hauteurs aux stations limnimétriques.
  - Il n'existe aucune station pluviométrique CRISTAL sur le secteur étudié dans la base de données du Service de Prévion des Crues d'Angers.

▪ **Un serveur de données et de traitement CRISTAL**

- Serveur pour les données : les données sont intégrées dans une base de données Oracle 8i.
- Traitement des données (en particulier, transformation hauteur-débit) : Jusqu'à présent, la mise à jour des courbes H/Q est effectuée par Orléans. Les courbes hauteur-débit utilisées sont les courbes des DIREN Centre et Pays de Loire.

▪ **Deux postes client CRISTAL**

C'est sur ces postes que s'effectuent toutes les opérations de contrôle, édition et validation des données. Les fonctions assurées à partir des postes client CRISTAL sont les suivantes :

- **Surveillance** : édition de courbes et de tableaux des données des 3 derniers jours (valeurs corrigées, valeurs élaborées).
- **Contrôle et validation des données** : des corrections des données peuvent être faites manuellement, la base de données conserve les valeurs corrigées et les valeurs élaborées.
- **Exploitation** : consultation possible de l'ensemble des données CRISTAL pour les 6 derniers mois, sous forme de courbes, tableaux (par défaut consultation des valeurs moyennes journalières). Les données sont au pas de temps 10 minutes. Exportation possible des données.
- **Exportation automatique des données** pour l'application SOPHIE.
- **Edition des états** : impression de tableau des dernières données reçues aux stations collectées par le Service de Prédiction des Crues.
- **Paramétrage des stations**
  - Modulation du pas de temps de collecte des stations.
  - Seuils d'alerte.
- **Gestion des utilisateurs**
  - Définition des droits pour l'utilisation du poste de gestion des astreintes.
  - Définition des utilisateurs directs et indirects.
- **Administration des données**
  - Journal des archivages (archivage réalisé sur CD).
  - Journaux de suivi.
  - Données
- **Applications de prévision** :
  - application GERICO pour les prévisions sur l'Oudon.
  - Outil de la DIREN Centre pour la prévision à Angers.
  - Application SOPHIE.

▪ **Un poste client CRISTAL dédié à la gestion des astreintes et à la consultation à distance des données :**

- Gestion des astreintes.

- Serveur Minitel pour consultation des données à distance :
  - Consultation par les communes (quelques communes), la Préfecture, le SIDPC (Service Interministériel de Défense et de la Protection Civile).
  - Consultation interne Service de Prévion des Crues.

Les caractéristiques de ce poste sont identiques à un poste client CRISTAL ordinaire.

Le Service de Prévion des Crues souhaite qu'aucun nouveau logiciel ne soit installé sur ce poste.

L'administration centrale du réseau CRISTAL s'effectue à Orléans.

Les postes CRISTAL sont connectés au réseau local, indépendant du réseau DDE et non connecté à Internet pour des raisons de sécurité informatique.

- **Un poste indépendant, disposant d'un accès Internet**, qui accueille les applications suivantes :

- **Collecte des données à l'aide de l'application Circade.** Cette application collecte les données des stations CRISTAL et des stations DIREN qui ne sont pas encore CRISTAL. Elle est utilisée en secours en cas de problème avec CRISTAL.
- **Application MARRI3** (développé par la société ISL) pour le calcul des prévisions sur l'Oudon.
- **Recueil de données et prévisions Météo France :**

Possibilités de connexions à 2 sites Internet Météo France :

- Service Météo France pour les Services de Prévion des Crues : en particulier, images satellite et radar, bulletins d'alerte.
- Service régional (Direction régionale Ouest) : bulletins réguliers, bulletins d'alerte, pluies observées, pluies prévues. Les informations sont fournies par bassin pour 3 zones : Oudon, Mayenne, Sarthe et Loir. Les pluies observées et prévues sont fournies pour ces 3 zones pour j-3, j-2, j-1, j et j+1 (j+2 pour les bulletins de fin de journée).
- **Accès au serveur ftp** géré par la DIREN Centre pour le recueil de données horaires à un certain nombre de postes Météo France. Les données sont mises à jour 4 fois par jour.

- **Un Minitel** permettant de recueillir les données d'un certain nombre de postes pluviométriques, dont les postes suivants :

Candé – Martigné Ferchaud – Laval – Ernée – Pré en Pail – Le Mans – Alençon – St Martin du Vieux Belleme – St Hilaire le Chatel.

Les données recueillies sont au pas de temps 3 heures.

- **EQUIPEMENTS PREVUS A COURT TERME :**
- Mise en service d'un site Internet pour l'accès des Communes aux informations du Service de Prévion des Crues.
- Connexion Internet ADSL sur le poste indépendant relié à Internet.

## 2.3. OUTILS DE PREVISION EXISTANTS

### 2.3.1. Prévisions sur le bassin de l'Oudon

Le Service de Prévion des Crues dispose des outils suivants :

- **Outil GERICO**

Cet outil permet de prévoir la hauteur d'eau sur l'Oudon à l'écluse de Maingué à t+6h, t+12h et t+18h en utilisant des données de pluie observée.

- **Outil MARRI 3** (développé par la société ISL)

Cet outil permet de prévoir les hauteurs d'eau sur l'Oudon à l'écluse de Maingué à t+24h, en utilisant des données de pluie observée et prévue.

- Il existe également un **abaque de prévion des hauteurs d'eau de l'Oudon**.

Les stations DIREN utilisées pour les prévions de l'Oudon doivent devenir des stations CRISTAL à court terme.

### 2.3.2. Prévisions sur le bassin de la Mayenne

Un **outil de prévion des crues sur le bassin de la Mayenne** est en cours de développement par la société SOGREAH sous la Maîtrise d'Ouvrage du Service de Prévion des Crues<sup>1</sup>. Les prévions sur la Mayenne seront réalisées à l'aide du logiciel SOPHIE. Les modèles qui devraient être utilisés sont des modèles :

- débit-débit,
- pluie-débit (GR3 et PQB).

Il est prévu d'utiliser une procédure multi-modèles. Le délai de prévion maximal envisagé est de t+27h à Château-Gontier, et de t+31h à Chambellay.

Les prévions à Chambellay devraient être réalisées à partir d'une relation entre le débit à Château-Gontier et le débit à Chambellay. Pour l'évaluation du débit à Chambellay, 3 courbes hauteur-débit existent, dépendant du niveau à Angers, la procédure multi-modèles sélectionnant au fur et à mesure de la crue, la meilleure courbe (étude en cours).

Remarque : Une relation hauteur-débit existe à l'écluse du Pendu. Elle a été établie par corrélation à partir de la station hydrométrique de Château-Gontier. Des jaugeages auraient également été effectués à cette écluse.

### 2.3.3. Prévisions sur le bassin de la Sarthe

- Sur la Sarthe amont et l'Huisne

---

<sup>1</sup> Voir « Outil de prévion des crues sur le bassin de la Mayenne » (DDE 49 / SOGREAH / Etude en cours)



Le Service de Prévion des Crues dispose de modèles de prévion des crues sur le bassin de l’Huisne et de la Sarthe amont<sup>2</sup> (point aval : Le Mans). Ils sont installés au Service de Prévion des Crues d’Angers depuis septembre 2004.

- Sur la Sarthe aval

Le Service de Prévion des Crues envisage de faire développer un modèle de prévion des crues du bassin de la Sarthe aval. Ce modèle devrait permettre de faire des prévions à Beffes à t+24h, si possible t+36h.

### **2.3.4. Prévions sur le bassin du Loir**

Le Service de Prévion des Crues envisage de faire développer un modèle de prévion des crues du bassin du Loir.

Ce modèle devrait permettre de faire des prévions à Durtal à t+36h.

### **2.3.5. Prévions à Angers :**

Deux applications sont installées au Service de Prévion des Crues d’Angers :

- L’application de prévion à partir des gradients de montée des débits et hauteurs (outil dit « Favriau modifié »). Cette application est celle qui est utilisée par la DIREN Centre pour élaborer les prévions à Montjean-sur-Loire et Angers.
- La formule dite « CNR » pour le calcul de la hauteur d’eau prévue à Angers à t+24h à partir de la hauteur observée à Angers à t, des débits observés à Montjean-sur-Loire à t et des débits observés et prévus à Montjean-sur-Loire à t+24h (fournis par l’outil précédent). Il existe de même une formule pour le calcul de la hauteur d’eau prévue à Angers à t+48h.

## **2.4. OBJECTIFS ET CONTRAINTES POUR LA MISE EN PLACE D’UN NOUVEL OUTIL DE PREVISION DES CRUES A ANGERS ET A MONTJEAN-SUR-LOIRE BASE SUR LES OUTILS EXISTANTS**

L’outil de prévion doit répondre aux exigences suivantes :

- Récupération automatique des données nécessaires à l’élaboration des prévions.
- Saisie manuelle possible des données.
- Prise en compte des prévions amont, dont le délai pourra évoluer au fur et à mesure que les outils correspondants seront mis en place (études en cours).
- Calcul des prévions de la hauteur d’eau à Angers (Pont de la Basse Chaîne) et à Montjean-sur-Loire à t+24h à partir des observations sur les affluents de la Maine et la Loire, et jusqu’à t+48h à partir des prévions amont.
- Compatibilité avec les exigences du fonctionnement opérationnel du Service de Prévion des Crues (simplicité d’utilisation, traitement des problèmes de lacunes, modes dégradés).

---

<sup>2</sup> Voir « Etude et mise au point de modèles de prévion des crues sur le bassin de l’Huisne et de la Sarthe amont – Rapport final – Données et modélisations » (DDE 72 / SAFEGE-CEMAGREF : Novembre 2003)

▪ **RECUPERATION DES DONNEES**

L'application de prévision actuelle (outil dit « Favriau modifié ») est développée sous Microsoft Excel, sous la forme d'un ensemble de macros VB (Visual Basic). La récupération des données se fait par un lien avec une autre application qui extrait les données nécessaires de la base de données Oracle et les met en forme directement sous Microsoft Excel.

Ce principe de fonctionnement peut être conservé.

▪ **RECUPERATION DES PREVISIONS AMONT**

De manière générale, compte-tenu des incertitudes sur les formats des fichiers générés par les différents outils de prévision en cours de réalisation (Mayenne, Oudon) ou futurs (Sarthe, Loir), et de la configuration en cours d'évolution du réseau local du Service de Prévion des Crues, la saisie des prévisions amont sera effectuée manuellement dans l'outil de prévision. Le nombre de valeurs à saisir sera minimisé, et les échéances des prévisions amont à saisir devront être également adaptées aux échéances fournies par les modèles amont.

## **2.5. ANALYSE DES PREVISIONS A ANGERS ET MONTJEAN-SUR-LOIRE REALISEES AVEC LES OUTILS EXISTANTS**

Une comparaison des valeurs observées et prévues avec les outils existants (outil « Favriau modifié ») a été effectuée pour les crues suivantes :

- janvier 1995,
- décembre 1999,
- janvier 2001,
- mars 2001,
- mai 2001,
- janvier 2004.

Les graphiques fournis en annexe E représentent les prévisions effectuées pour l'échéance 24h.

### **2.5.1. Prévions à Montjean-sur-Loire**

Les prévisions sont calculées par la méthode suivante :

- une prévision du gradient horaire de variation du débit à Montjean-sur-Loire est effectuée à partir du gradient de variation horaire des débits d'entrée,
- cette prévision du gradient est additionnée au débit à Montjean-sur-Loire à l'instant  $t$  pour calculer le débit prévu à  $t+1h$ .

Le calcul se fait au pas de temps horaire, à partir du débit observé à Montjean-sur-Loire à l'instant  $t$ , puis de proche en proche jusqu'à  $t+24$  heures.

Le gradient horaire des débits d'entrée est calculé à partir de la somme pondérée des débits d'entrée dans les différentes rivières. Ces débits d'entrée sont pris en compte avec des décalages temporels et des coefficients multiplicatifs, pour tenir compte des

temps de propagation et des apports intermédiaires sur chaque branche. Les valeurs prises en compte dans l'outil sont les suivantes :

Nom Station	Coefficient multiplicatif	Décalage temporel
<b>Beffes</b>	1.221	48h
<b>Durtal</b>	1.11	36h
<b>Château Gontier</b>	1.1655	28h
<b>Segré</b>	1.11	24h
<b>Saumur</b>	1.05	24h

Le calcul du gradient horaire du débit prévu à Montjean-sur-Loire est effectué à l'aide d'une fonction à 5 paramètres, qui prend en compte une atténuation du gradient des débits d'entrée, pour tenir compte de l'effet de stockage dans les BVA. Cette fonction est définie par paliers, avec des paramètres variables en fonction de la valeur de la somme des débits entrants (par tranches de débits de 1000 m<sup>3</sup>/s de 0 à 6000 m<sup>3</sup>/s, constants au-delà).

L'outil a été calé sur les crues de décembre 1982, janvier 1995 et décembre 1999. Le Tableau 1 présente les écarts de prévision obtenus pour les crues testées.

On constate que, pour les crues testées, les prévisions sont bonnes pour les crues les plus fortes (janvier 1995, décembre 1999), qui constituent également les crues de calage de cet outil de prévision. Pour les crues moins importantes, on constate des erreurs, en particulier un décalage temporel dans la montée (retard fréquent) et des défauts de forme (crues de 2001 notamment). Ces défauts sont probablement dus à des variations rapides des gradients des débits d'entrée, qui sont observés plus fréquemment sur les petites crues. Pour les fortes crues en effet, les hydrogrammes d'entrée présentent souvent une période de pointe de longue durée (succession de pointes amont conduisant à un débit soutenu pendant plusieurs jours, en particulier sur la Sarthe, le Loir et la Loire à Saumur).

Remarque : les prévisionnistes peuvent être amenés à modifier certains paramètres de l'outil, en fonction de la qualité des prévisions obtenues en cours de crue. Il s'agit en particulier des paramètres de décalage temporel des entrées et des paramètres de la fonction de calcul du gradient horaire à Montjean-sur-Loire.

**Tableau 1 : Qualité des prévisions à Montjean-sur-Loire effectuées avec les outils existants**

Crue	Qmax observé (m3/s)	Erreur absolue sur le maximum (m3/s)	Erreur absolue au moment du maximum observé (m3/s)	Fourchette d'erreur pour les hauteurs supérieures à 4m à Angers (m3/s)	ecart-type de l'erreur (m3/s)	décalage sur le maximum (h)	décalage dans la montée (h)
janvier 1995	5390	-64	91	-259 à 182 m3/s	102	12h (retard)	retard 6h
décembre 1999	5019	43	-73	-206 à 101 m3/s	101	24h (retard)	retard 4h
janvier 2001	3197	-106	-120	-328 à 37 m3/s	105	12h (avance)	retard 14h
mars 2001	4124	183	183	-167 à 294 m3/s	137	0	avance 12h
mai 2001	3978	37 253	93	-238 à 354m3/s	192	36 h (retard) 72h (retard)	retard 6h
Janvier 2004	4841	197	-76	-214 à 335 m3/s	155	12h (avance)	retard 6h

Remarque : le calcul a été effectué toutes les 12h, c'est pourquoi le décalage temporel sur le maximum est un multiple de 12h. Les valeurs sont par conséquent fournies à titre de comparaison des performances des outils. La fréquence de calcul adoptée pour les tests correspond à la fréquence de calcul en période de crue, les prévisions étant calculées soit toutes les 24 heures, soit toutes les 12 heures.

### 2.5.2. Prévisions à Angers

Il existe plusieurs formules pour le calcul de prévisions à Angers.

Une équation établie par A. Favriau, calcule la hauteur à Angers à  $t+1h$  à partir de la hauteur observée à Angers à  $t$  et de la variation de hauteur prévue à Montjean entre  $t$  et  $t+1$ . Cette équation est réitérée au pas de temps horaire jusqu'à l'échéance 24 heures ou 48 heures. Elle a été établie par régression multiple.

D'autres équations sont utilisées par le Service de Prédiction des Crues d'Angers, en particulier les formules dites CNR. Ces formules calculent directement la prévision de la hauteur à Angers à  $t+24h$  à partir de la hauteur observée à Angers à  $t$ , du débit observé à Montjean à  $t$  et de la prévision à Montjean à  $t+24h$ . Il existe également une formule pour les prévisions à 48h.

Le Tableau 2 présente les résultats obtenus à Angers pour les prévisions à 24h avec la formule CNR, à partir des prévisions effectuées à Montjean en 2.5.1.

Tableau 2 : Qualité des prévisions à Angers effectuées avec les outils existants

Crue	Hmax observée	Erreur absolue sur le maximum	Erreur absolue au moment du maximum observé	Fourchette d'erreur pour les hauteurs supérieures à 4m à Angers	ecart-type de l'erreur	décalage sur le maximum (h)	décalage dans la montée (h)
janvier 1995	6.65	11 cm	11 cm	-34cm/+22cm	14 cm	0	variable (6h (retard) à 0)
décembre 1999	6.12	5 cm	1 cm	-30cm/+16cm	12 cm	36h (avance)	retard 6h
janvier 2001	4.90	10 cm	10 cm	-49cm/+18cm	17 cm	0	retard 14h
mars 2001	5.5	16 cm	10 cm	-13cm/+34cm	12 cm	60h (retard)	variable (avance 6h à 0)
mai 2001	4.97	10 cm 16 cm	2 cm	-30cm/+34 cm	18 cm	24h 84 h	retard 12h
Janvier 2004	5.61	32 cm		-36cm/+33 cm	16 cm	0	retard 12h

Remarque : le calcul a été effectué toutes les 12h, c'est pourquoi le décalage de prévision du maximum est un multiple de 12h. Les valeurs sont par conséquent fournies à titre de comparaison des performances des outils.

### 3. AMELIORATION DES OUTILS DE PREVISION EXISTANTS

#### 3.1. PREVISIONS A 24H A MONTJEAN-SUR-LOIRE

La méthodologie utilisée est basée sur celle des outils existants :

- une prévision du gradient horaire de variation du débit à Montjean-sur-Loire est effectuée à partir des gradients de variation horaire des débits d'entrée,
- cette prévision du gradient est additionnée au débit à Montjean-sur-Loire à l'instant  $t$  pour calculer le débit prévu à  $t + 1h$ .

Le calcul s'effectue au pas de temps horaire, à partir du débit observé à Montjean-sur-Loire à l'instant de début du calcul, puis de proche en proche en réitérant le calcul à partir des débits prévus à Montjean-sur-Loire jusqu'au délai 24 heures.

Pour améliorer la qualité des prévisions, certains paramètres ont été recalés.

Les décalages temporels entre les stations amont et Montjean-sur-Loire sont ceux des outils existants. Ils sont fournis dans le Tableau 3

**Tableau 3 : Décalages temporels pris en compte pour la prévision**

Nom Station	Décalage temporel
Beffes	48h
Durtal	36h
Château Gontier	28h
Segré	24h
Saumur	24h

Ces décalages temporels, assimilables à des temps de propagation, sont appliqués pour la prise en compte des débits amont dans les équations de prévision.

Par contre, les coefficients multiplicatifs appliqués aux débits amont dans les outils existants ont été supprimés. En effet, ces coefficients multiplicatifs des entrées pris en compte pour représenter les apports intermédiaires résultent du rapport des surfaces des bassins versants amont et des sous-bassins intermédiaires. Ces valeurs ne sont pas toujours pertinentes, la pluviométrie des bassins intermédiaires pouvant être très différente de la pluviométrie sur les grands bassins amont. Un test a été réalisé pour la prise en compte explicite des apports de ces bassins versants intermédiaires (cf 3.3).

##### 3.1.1. Méthode

Le calcul effectué s'appuie sur les techniques de la régression multiple :

A partir d'un échantillon représentatif de variables d'entrée  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , on cherche une fonction vérifiant  $S = f(E_1, E_2, \dots, E_n)$ ,  $S$  étant la variable de sortie (l'inconnue).

Pour cela, on effectue une régression multiple qui va nous donner un jeu de paramètres  $X_1, X_2, \dots, X_n$  tel que  $S_o = X_1 \times E_1 + X_2 \times E_2 + \dots + X_n \times E_n$  soit une valeur approchée de S.

L'analyse et le calage consistent à rechercher les variables d'entrée qui permettent d'approcher au mieux S, sur la base d'un échantillon de calage le plus représentatif possible pour couvrir l'ensemble des situations hydrologiques et ainsi obtenir un jeu de paramètres adapté à la prévision.

Ce jeu de paramètre est ensuite testé sur un échantillon de test, afin de juger de son efficacité.

Afin d'identifier les variables à retenir dans les équations, le travail a tout d'abord été effectué sur une seule crue, puis étendu à trois crues de calage.

### 3.1.2. Echantillon de calage avec une seule crue : décembre 1999

#### 3.1.2.1. Type de calages effectués

Le premier échantillon étudié est constitué par la crue de décembre 1999.

Trois cas de régressions ont été testés, correspondant à trois ensembles de variables d'entrées différents :

- **Cas 1 : 5 variables d'entrée**  
Chaque gradient est pris en compte séparément, la régression se fait sur 5 entrées correspondant aux gradients horaires de variation du débit, avec les décalages du Tableau 3 :
  - le gradient de la Sarthe à Beffes, 48h avant,
  - le gradient du Loir à Durtal, 36h avant,
  - le gradient de la Mayenne à Château Gontier, 28h avant,
  - le gradient de l'Oudon à Segré, 24h avant,
  - le gradient de la Loire à Saumur, 24h avant.
- **Cas 2 : 2 variables d'entrée**
  - la somme des gradients des affluents de la Maine (Sarthe, Loir, Mayenne et Oudon), avec les décalages du Tableau 3,
  - le gradient de la Loire à Saumur, 24h avant.
- **Cas 3 : 1 variable d'entrée :**
  - la somme de tous les gradients (avec les décalages du Tableau 3).

Pour chaque cas, 3 régressions ont été effectuées conduisant à:

- 1 seul jeu de paramètres calé sur l'ensemble des valeurs de l'échantillon,
- 6 jeux de paramètres correspondant à 6 tranches de débit à Montjean-sur-Loire (0 à 1000 m<sup>3</sup>/s, 1000 m<sup>3</sup>/s à 2000 m<sup>3</sup>/s, 2000 m<sup>3</sup>/s à 3000 m<sup>3</sup>/s, 3000 m<sup>3</sup>/s à 4000 m<sup>3</sup>/s, 4000 m<sup>3</sup>/s à 5000 m<sup>3</sup>/s, + de 5000 m<sup>3</sup>/s).
- 4 jeux de paramètres correspondant à 4 tranches de gradient horaire de variation du débit à Montjean-sur-Loire (inf. à -10, -10 à 0, 0 à 15, sup. à 15, les valeurs sont en m<sup>3</sup>/s/h).

Au total 9 équations de prévisions ont été calées. Elles sont résumées dans le Tableau 4 .

**Tableau 4 : Liste des cas étudiés pour les tests sur la crue de décembre 1999**

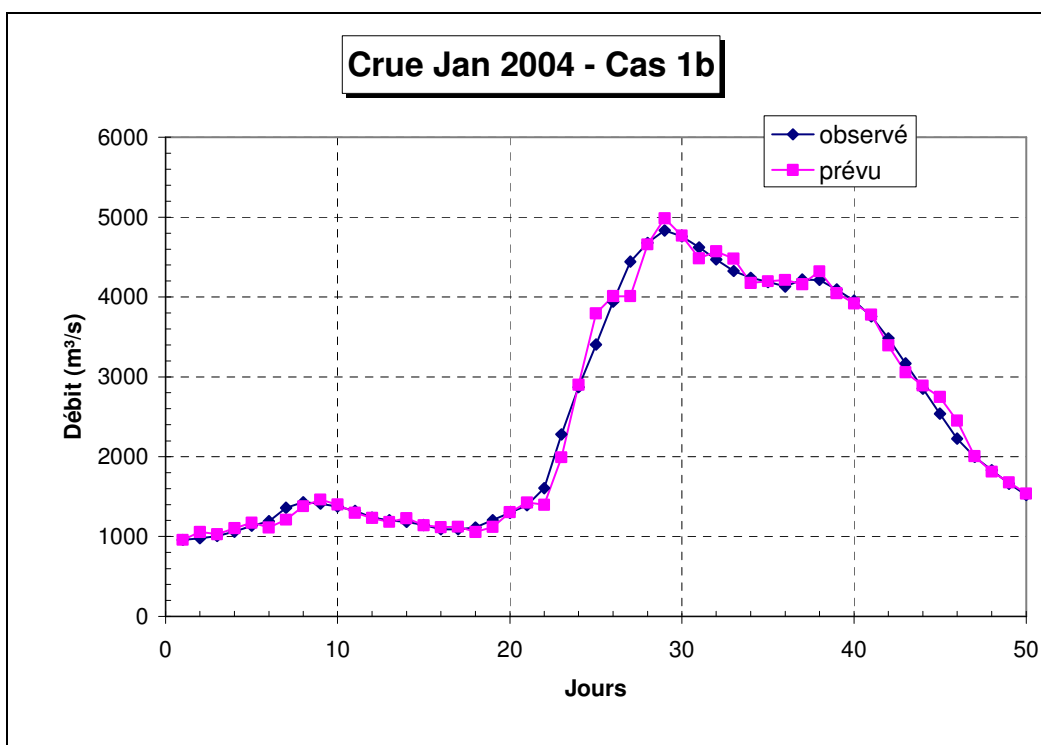
Type de découpage	Cas 1	Cas 2	Cas 3
aucun	Cas 1a	Cas 2a	Cas 3a
Par tranche de débit à Montjean	Cas 1b	Cas 2b	Cas 3b
Par tranche de gradient à Montjean	Cas 1c	Cas 2c	Cas 3c

### 3.1.2.2. Tests

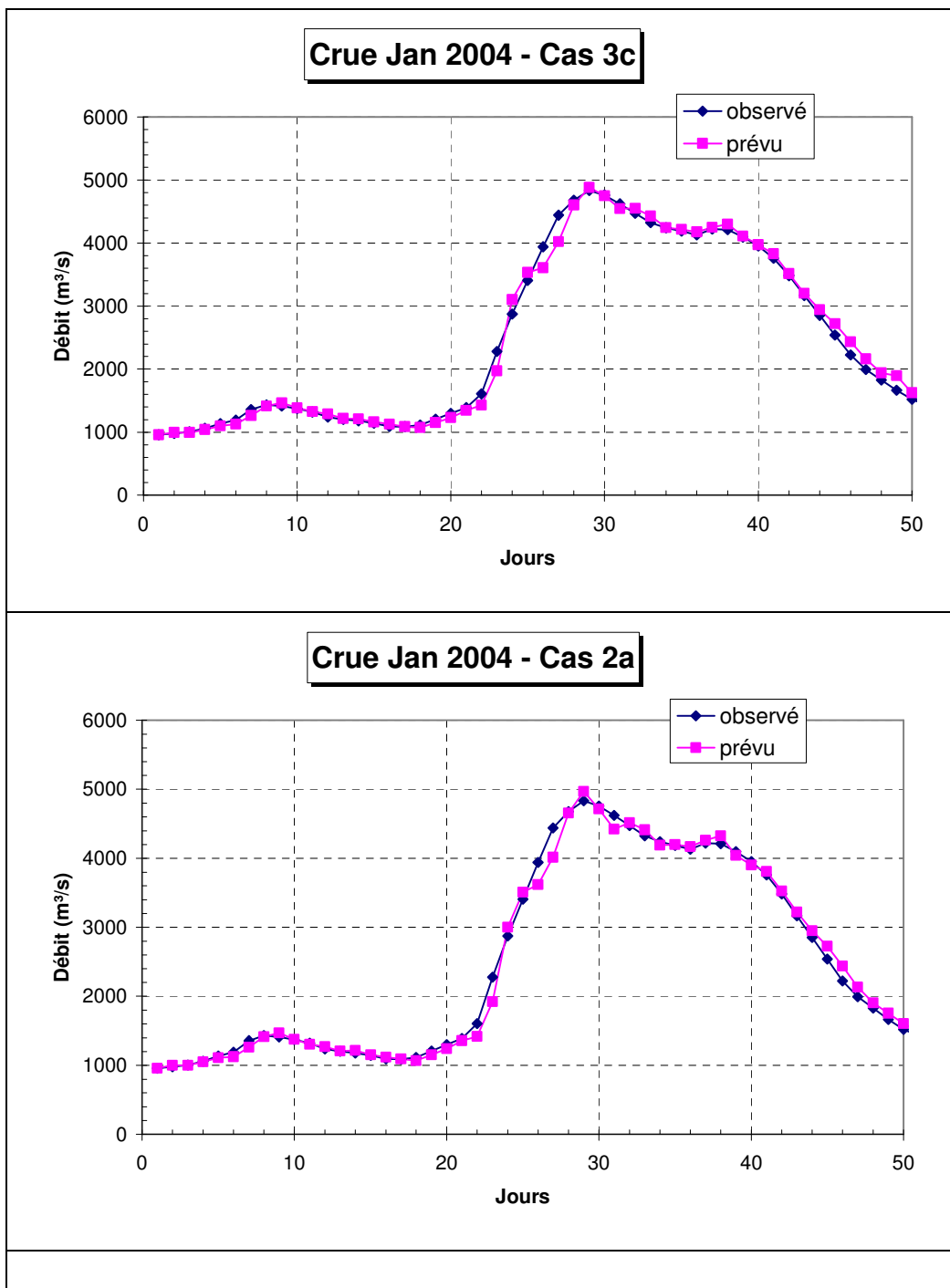
Chacun des 9 cas a été testé sur 2 crues :

- crue de décembre 1999 (crue de calage),
- crue de janvier 2004.

Les résultats obtenus sur la crue de janvier 2004 sont présentés dans les figures suivantes pour trois cas (1b, 2a et 3c). Les graphes fournissent les prévisions calculées à l'échéance 24h pour les différentes hypothèses testées, comparées aux valeurs observées.







Les résultats obtenus sont relativement bons quelle que soit la méthode utilisée.

On constate cependant que les problèmes se situent principalement lorsque le gradient horaire à Montjean évolue rapidement (changements de pente relativement importants de l'hydrogramme). Pour essayer d'affiner les résultats, on a travaillé sur un échantillon de calage comportant 3 crues : décembre 1999, janvier 2004 et mars 2001.

Le cas d'une régression à 5 entrées n'apporte pas d'amélioration significative, ce cas a par conséquent été abandonné pour la suite de l'étude.

Par contre, on a testé l'ajout de nouvelles variables. En particulier, une prévision incluant la variation du gradient horaire de débit à Montjean-sur-loire **24h avant l'instant de calcul** a été testée. Ce paramètre permet en effet d'améliorer la prévision lorsque les variations de gradient sont importantes.

Le choix a également été fait de privilégier le découpage par tranche de gradient horaire à Montjean-sur-loire préférentiellement à un découpage par tranche de débit : cette méthode est plus en accord avec les régressions effectuées justement sur le gradient. Cette méthode fournit de plus de meilleurs résultats que le découpage par tranche de débit.

### **3.1.3. Echantillon de calage avec 3 crues : Décembre 1999, Mars 2001 et Janvier 2004**

L'augmentation de la taille de l'échantillon doit permettre d'être représentatif de différents types de crues, tout en obtenant des relations de bonne qualité.

Deux types de modèles ont été testés :

- 1 seule entrée (cas 1) :
  - la somme de tous les gradients d'entrée, avec les décalages du Tableau 3
- 2 entrées (cas 2) :
  - la somme de tous les gradients d'entrée, avec les décalages du Tableau 3
  - le gradient à Montjean-sur-Loire 24h avant.

Pour tenter d'améliorer l'outil de prévision, notamment au voisinage des pics de crue, un second découpage a été effectué dans chaque tranche de gradient en fonction respectivement du gradient à Saumur (pour le cas 1) et du gradient à Montjean-sur-Loire 24h avant (pour le cas 2).

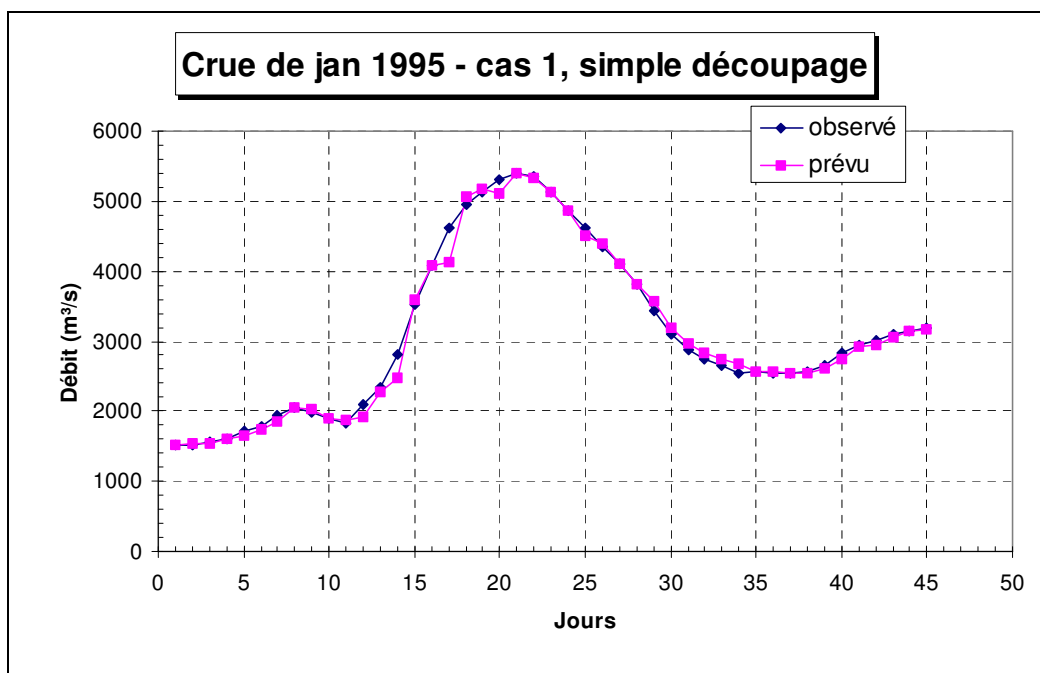
Ce découpage se justifie par le fait qu'on constate parfois une inversion de pente dans la courbe du débit prévu par rapport au débit observé, notamment juste après les pics de crue. Ceci se produit quand le gradient d'entrée n'a pas le même signe que le gradient de sortie. Les découpages décrits dans le Tableau 5 ont été testés, afin de tenter de corriger ces anomalies.

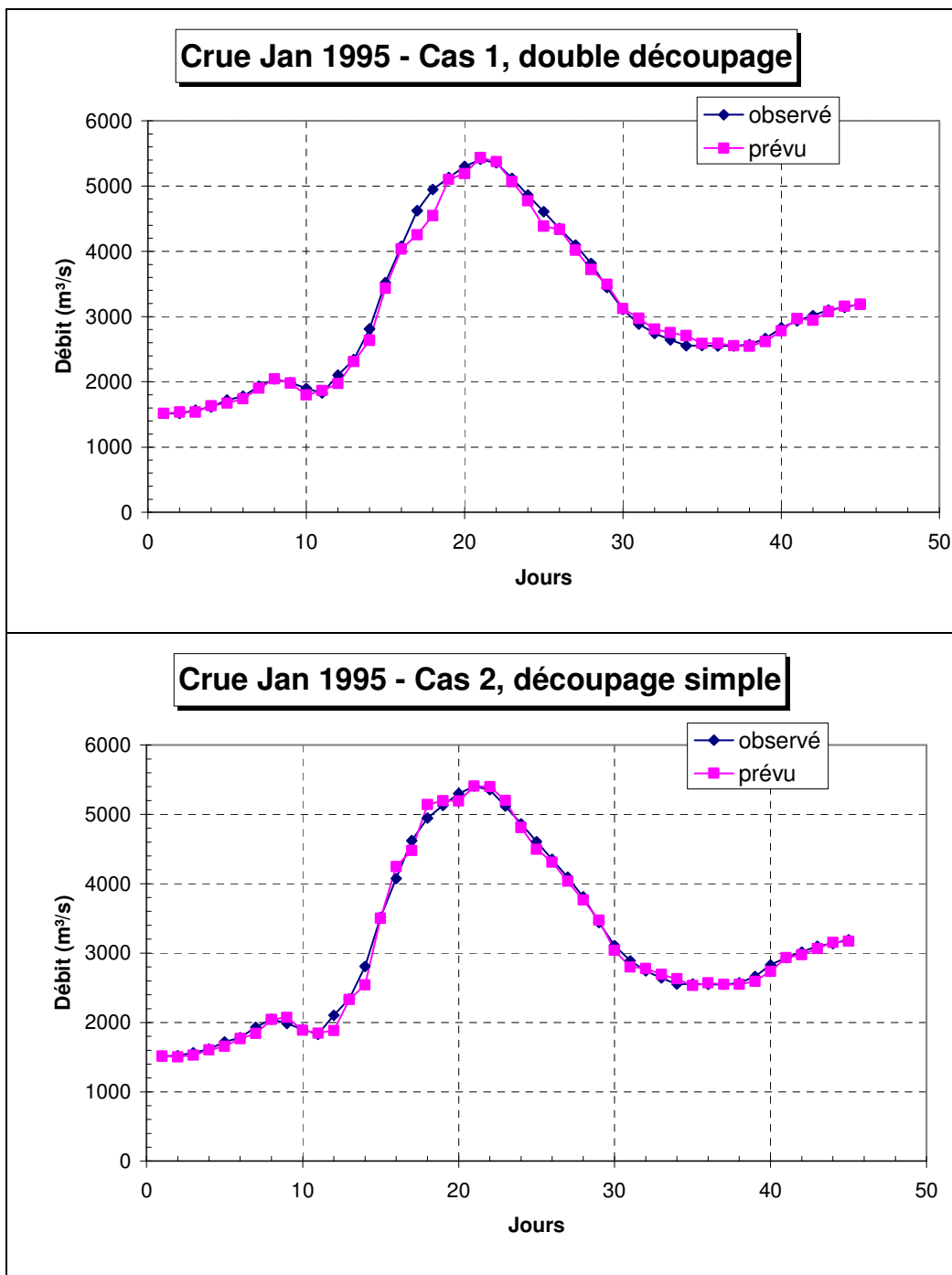
Tableau 5 : Tranches de gradients (en m<sup>3</sup>/s/h) prises en compte pour l'application des équations (cas 1 et cas 2)

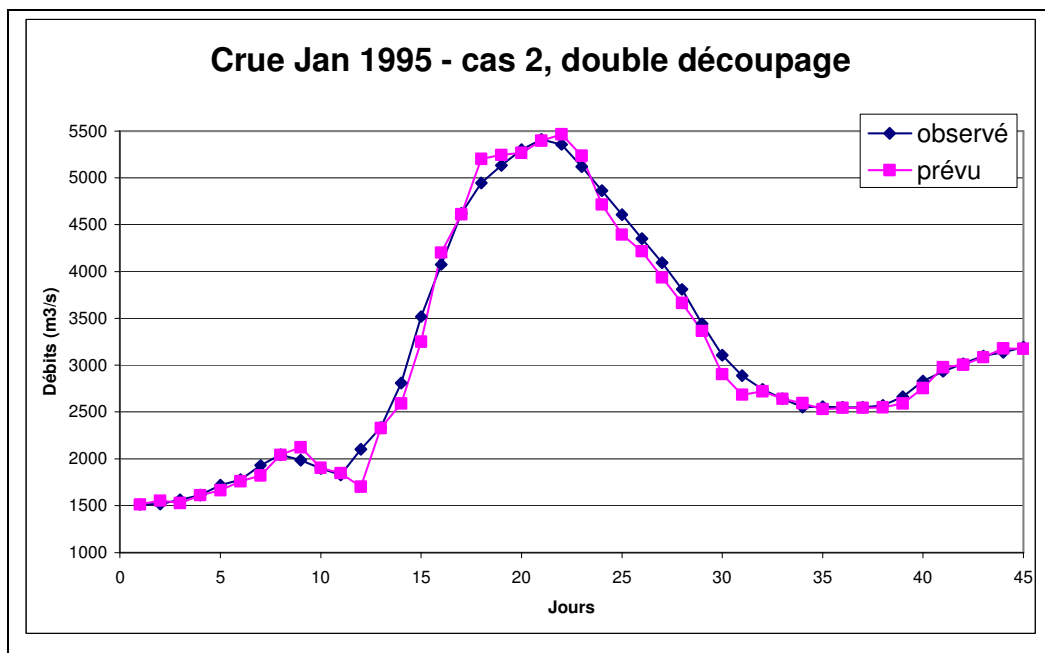
Simple découpage en fonction du Gradient à Montjean	2nd découpage en fonction du Gradient à Saumur (cas 1) ou à Montjean –24h (cas 2)
< -10	<-20
	-20< < -10
	>-10
-10 à 0	<-10
	-10< < 0
	>0
0 à 10	<0
	0< < 10
	>10
10 à 20	<0)
	0< < 10
	10< < 20
	>20
>20	<20
	>20

Dans les deux cas, les résultats obtenus par un double découpage ont été comparés à ceux obtenus avec un simple découpage, pour la crue de janvier 1995.

Les graphes suivants fournissent les prévisions calculées à l'échéance 24h pour les différentes hypothèses testées.







Pour le cas 1, on ne constate pas de différence significative entre les deux découpages par tranche de gradient.

On constate dans le cas 2 que le deuxième découpage détériore la prévision, y compris au niveau du maximum.

Par contre, dans le cas d'un découpage simple, le cas 2 est meilleur que le cas 1.

On en déduit que **la prise en compte du gradient de débit à Montjean 24h avant dans les variables d'entrée de la régression permet d'améliorer l'outil de prévision.**

### 3.1.4. Tests sur 11 crues

Le cas n°2 du paragraphe précédent, à savoir une régression à double entrée correspondant à la somme totale des gradients et au gradient à Montjean-sur-Loire à t-24h a été testé sur 11 crues récentes, de janvier 1995 à janvier 2004. Il s'agit de l'ensemble des crues pour lesquelles la hauteur à Angers a dépassé 4 mètres, depuis 1995 (cf Etude hydrologique). Les données disponibles sur les crues antérieures ne sont pas suffisamment complètes, et les évolutions du lit de la Loire pourraient perturber l'analyse. Les fortes crues de janvier 1994 et décembre 1982 ont néanmoins été testées avec le modèle final (une grande partie des données pour ces crues est constituée de données journalières).

Pour chaque crue, trois cas sont comparés :

- Cas A : pas de découpage par tranches de gradient à Montjean-sur-Loire, 1 seul jeu de paramètres.
- Cas B : découpage par tranches de gradient à Montjean-sur-Loire, 5 jeux de paramètres (<-10, -10 à 0, 0 à 10, 10 à 20 et >20, valeurs en m<sup>3</sup>/s/h).
- Cas C : double découpage, par tranches de gradient à Montjean-sur-Loire (idem cas B) puis dans chaque tranche, un second découpage par tranches de gradient à Montjean-sur-Loire à t-24h.

Le Tableau 6 récapitule les résultats obtenus, sous la forme d'une « note » attribuée à chaque crue selon la qualité des prévisions obtenues avec chaque équation (note de 1 à 3, la note peut être identique lorsque les résultats sont de qualité égale – la meilleure note est 1). La note a été attribuée en fonction des écarts entre valeurs observées et valeurs prévues à 24h.

**Tableau 6 : Comparaison des différents types d'équations sur les crues de test**

Crue	Classement des crues en fonction de la qualité des prévisions à 24h		
	Cas A	Cas B	Cas C
janv-95	1	1	3
janv-98	2	1	3
mai-98	2	1	3
<b>janv-99</b>	3	2	1
févr-99	1	1	3
nov-00	2	2	1
janv-01	2	2	1
<b>mars-01</b>	2	2	1
mai-01	1	2	2
janv-03	3	1	2
<b>janv-04</b>	3	2	1
<b>Bilan</b>	<b>22</b>	<b>17</b>	<b>21</b>

Remarques : Les crues constituant l'échantillon de calage sont en gras.

On constate que:

- Pour la plupart des crues, on obtient de meilleurs résultats dans le cas B que dans le cas A : on en conclut que le découpage par tranches de gradient à Montjean-sur-Loire permet d'améliorer la prévision.
- Dans le cas C, on obtient dans l'ensemble de moins bons résultats que dans le cas B, sauf pour :
  - les crues constituant l'échantillon de calage,
  - les petites crues composées de pics successifs, comme celles de novembre 2000 et janvier 2001.

Malgré tout, les écarts obtenus avec le cas C pour certaines crues (celles de Janvier 1998 et de Février 1999 notamment) rendent son application aléatoire.

L'équation retenue est donc celle du cas B :

$$\Delta Q(t)_{\text{Montjean}} = a * \sum \Delta Q(t-t_0)_{\text{Affluents}} + b * \Delta Q(t-24)_{\text{Montjean}}$$

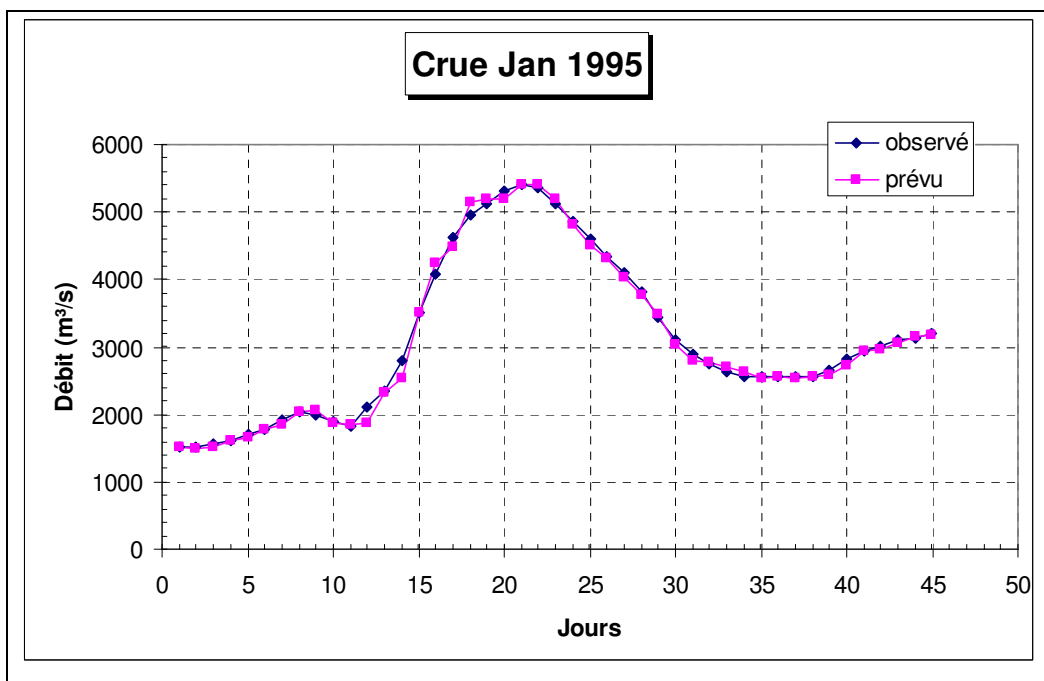
avec :

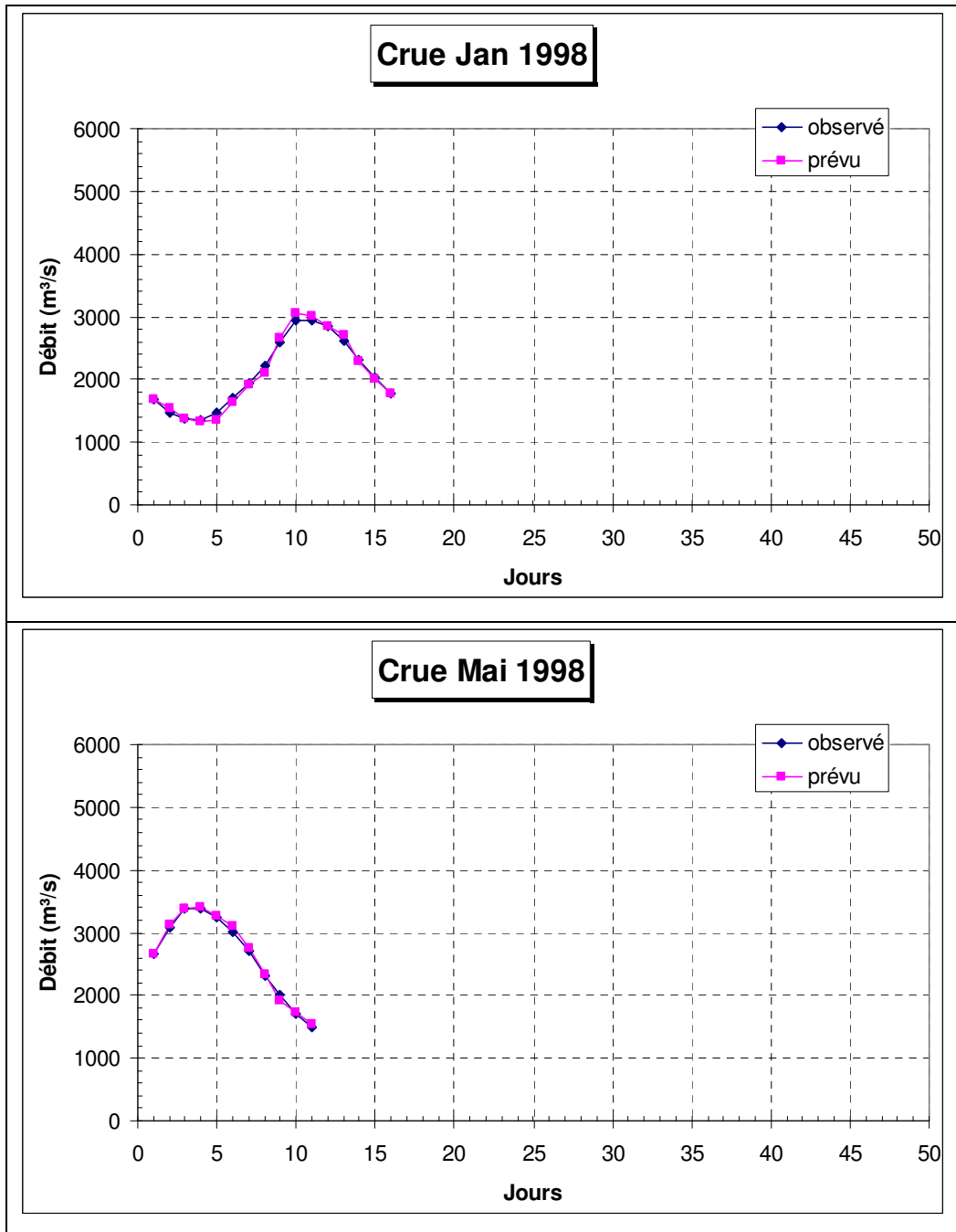
$\Delta Q(t)$  gradient horaire du débit en m<sup>3</sup>/s/h entre l'instant t et l'instant t-1, t en h,  
 t<sub>0</sub> = décalage temporel propre à chaque affluent (cf Tableau 3)  
 et a et b variant en fonction du gradient de débit à Montjean (voir Tableau 7).

Tableau 7 : Paramètres du modèle de régression retenu

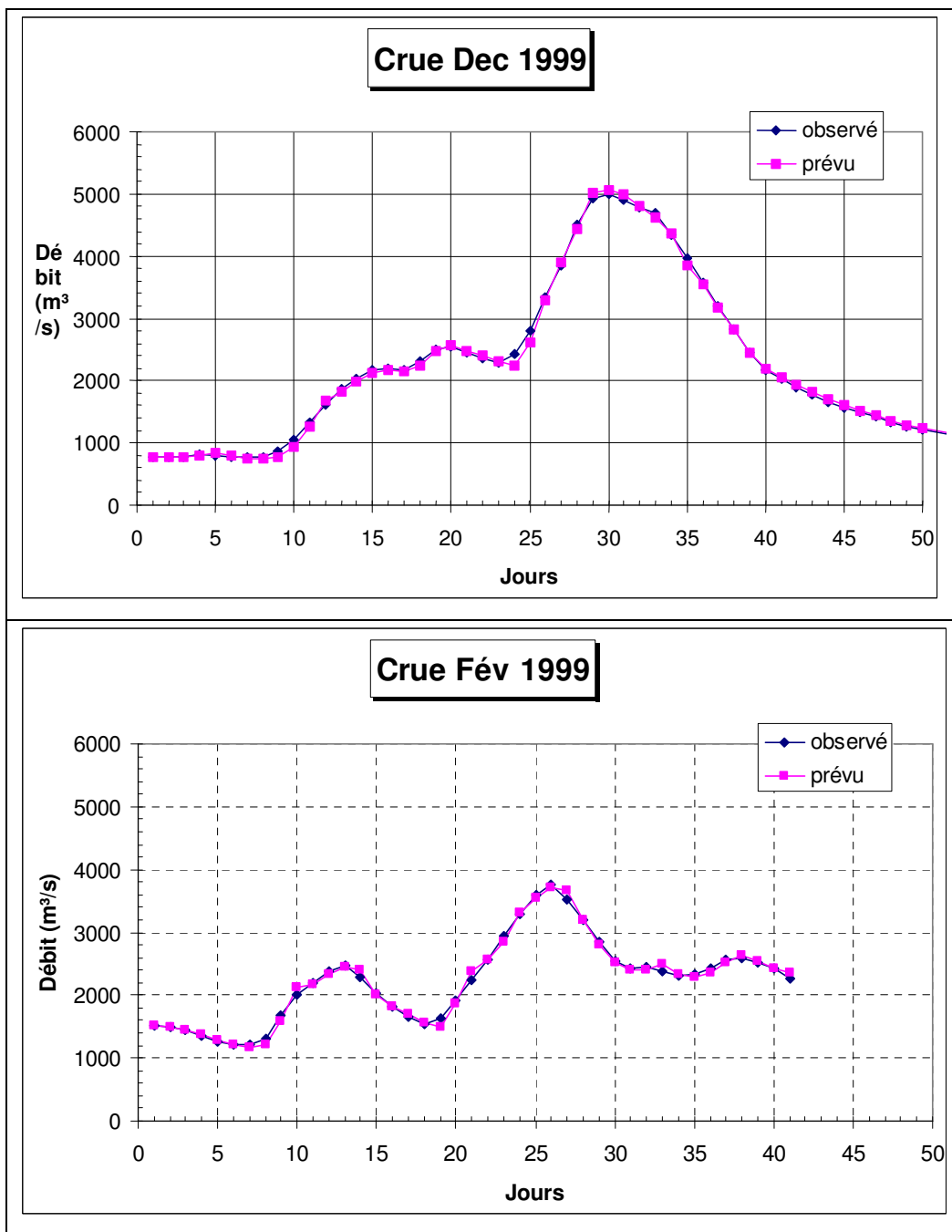
Classe de gradient de débit horaire à Montjean (en m <sup>3</sup> /s/h)	a	b
$\Delta Q$ Montjean < -10	0.314	0.804
-10 < $\Delta Q$ Montjean < 0	0.320	0.388
0 < $\Delta Q$ Montjean < 10	0.217	0.396
10 < $\Delta Q$ Montjean < 20	0.656	0.225
20 < $\Delta Q$ Montjean	0.262	0.735

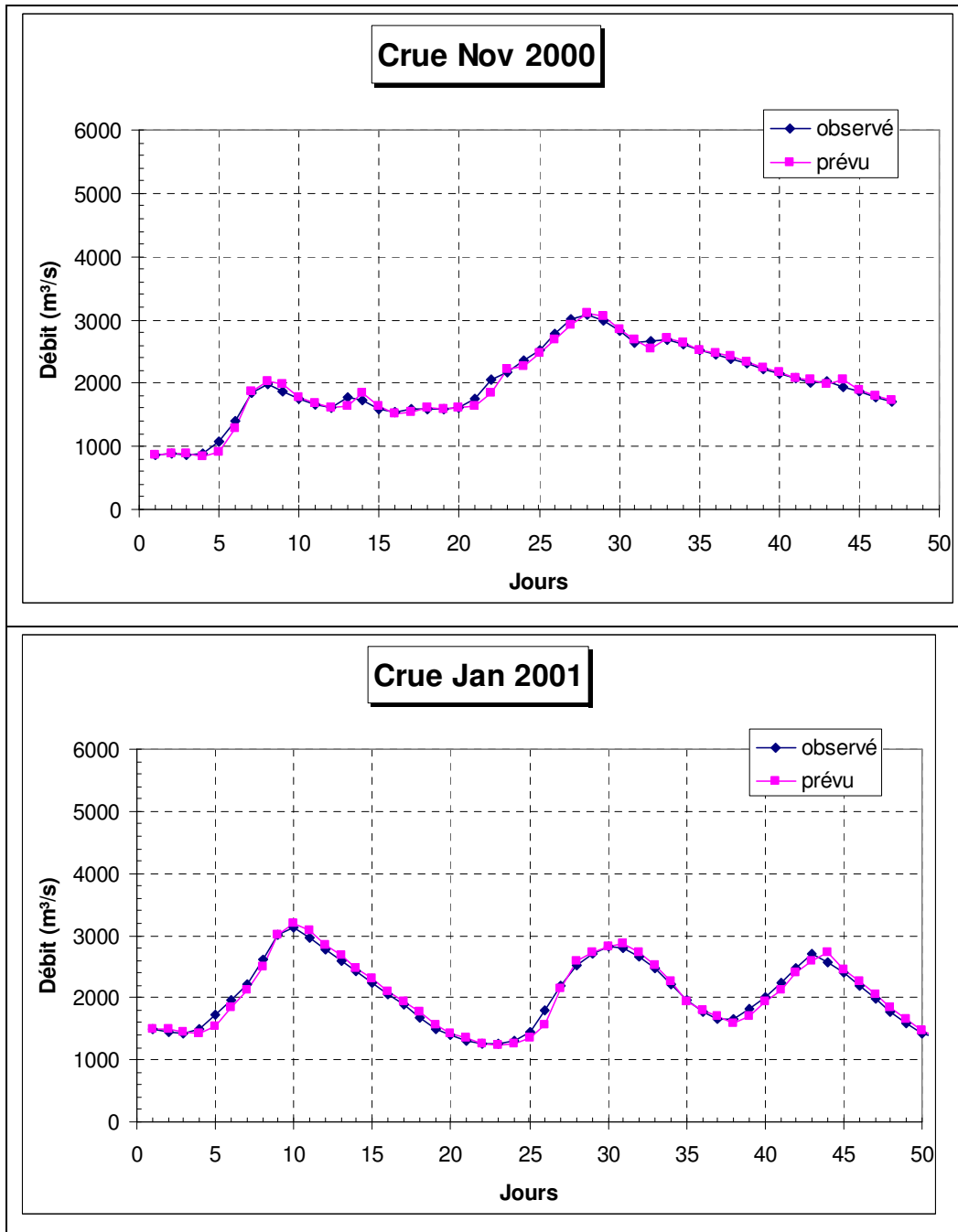
Les graphes suivants permettent de comparer les débits prévus à Montjean-sur-Loire à l'échéance 24h avec valeurs observées pour chaque crue testée.

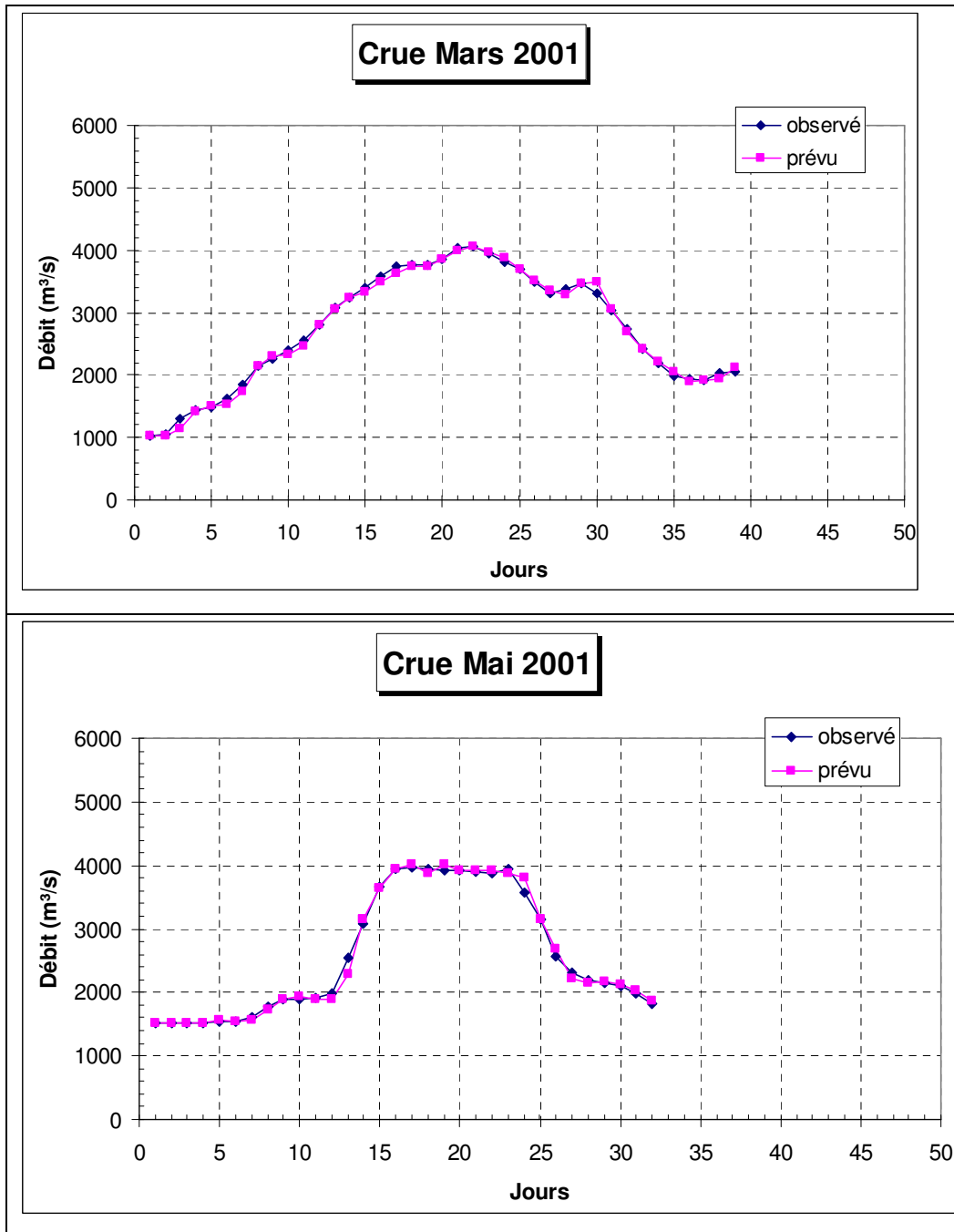


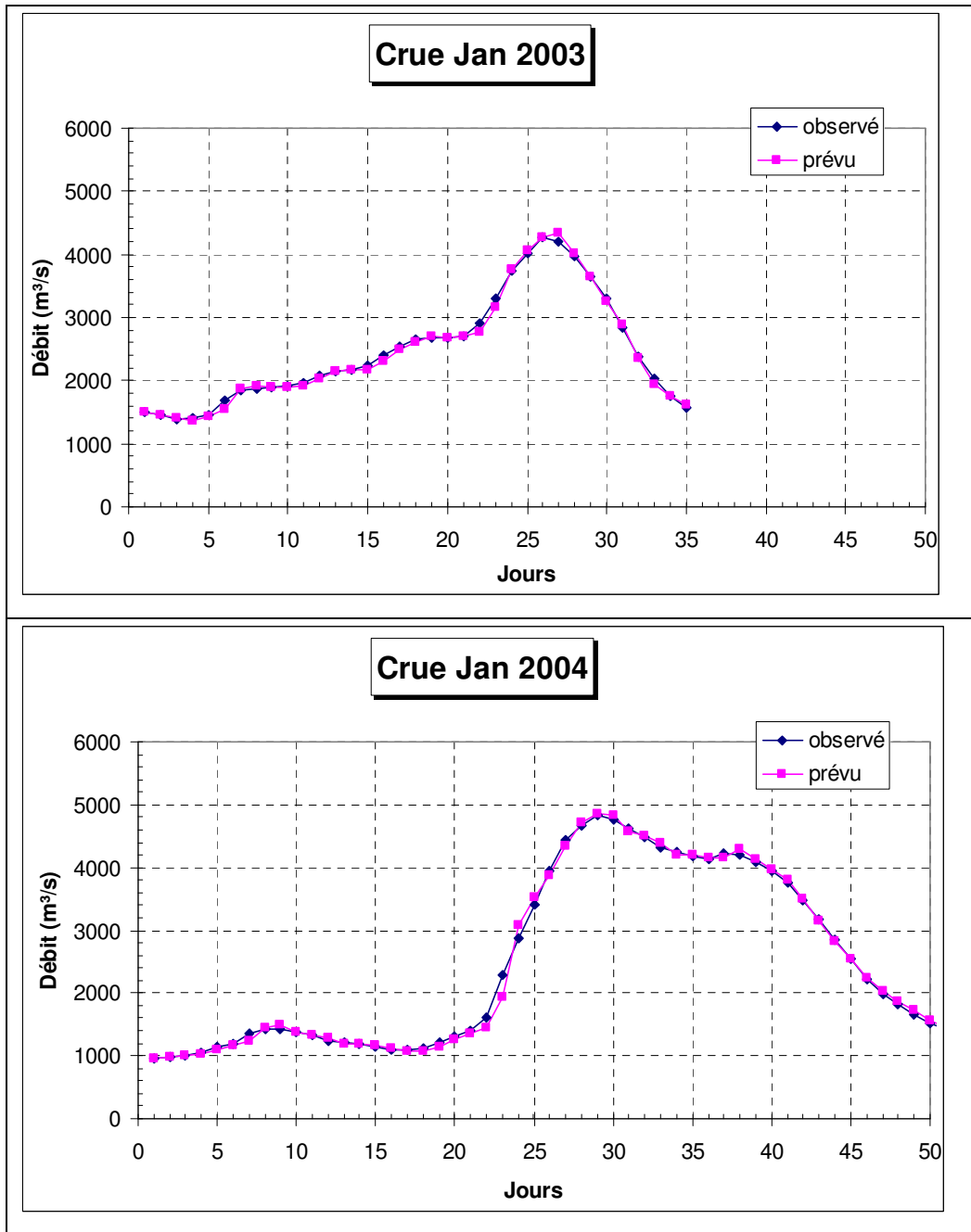




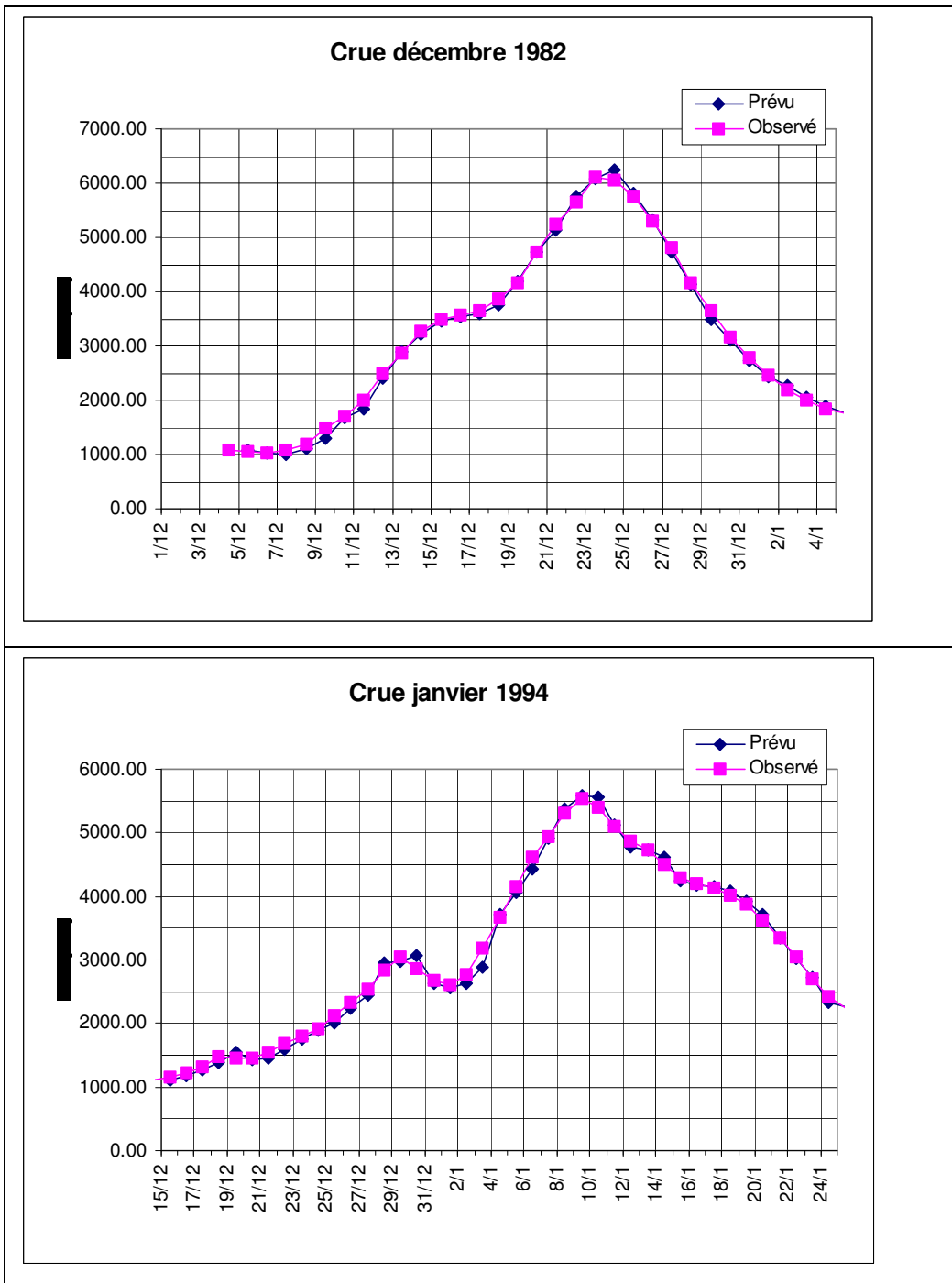








Les graphes suivants présentent les prévisions calculées à Montjean-sur-Loire à l'échéance 24heures, comparées aux débits observés pour les crues de janvier 1994 et décembre 1982. Pour la crue de décembre 1982, les données utilisées sont des données journalières pour toutes les rivières, pour la crue de janvier 1994, les données de la Loire sont des données journalières, les données des autres rivières étant des données horaires.



Le Tableau 8 présente la qualité des prévisions effectuées à Montjean-sur-Loire pour les crues testées, en terme d'écart moyen et d'écart sur le maximum.

**Tableau 8 : Qualité des prévisions à Montjean-sur-Loire**

Crue	Qmax observé (m <sup>3</sup> /s)	Erreur absolue sur le maximum (m <sup>3</sup> /s)	Erreur absolue au moment du maximum observé (m <sup>3</sup> /s)	Fourchette d'erreur pour les hauteurs supérieures à 4m à Angers (m <sup>3</sup> /s)	Ecart-type de l'erreur (m <sup>3</sup> /s)	Décalage sur le maximum (h)
Déc-82	6100	136	-28	-152 à 186	40	24 (retard) (données journalières)
Janv-94	5550	28	28	-311 à 445	81	0
janv-95	5049	-3	-3	-269 à 193	61	0
janv-98	2951	101	101	*	52	0
mai-98	3392	23	23	*	41	0
févr-99	3761	-46	-46	*	49	0
déc-99	4998	64	64	*	43	0
nov-00	3087	13	13	*	53	0
janv-01	3134	56	56	-120 à 118	66	0
mars-01	4070	-12	-12	*	48	0
mai-01	3965	62	46	*	52	48 (avance) crue plate
janv-03	4263	70	0	-149 à 126	43	24 (retard)
janv-04	4833	20	20	-108 à 204	48	0

## 3.2. PREVISIONS A 24H A ANGERS

### 3.2.1. Méthode

Le gradient horaire de variation de la hauteur à Angers est calculé à partir du gradient horaire de variation de la hauteur à Montjean-sur-Loire.

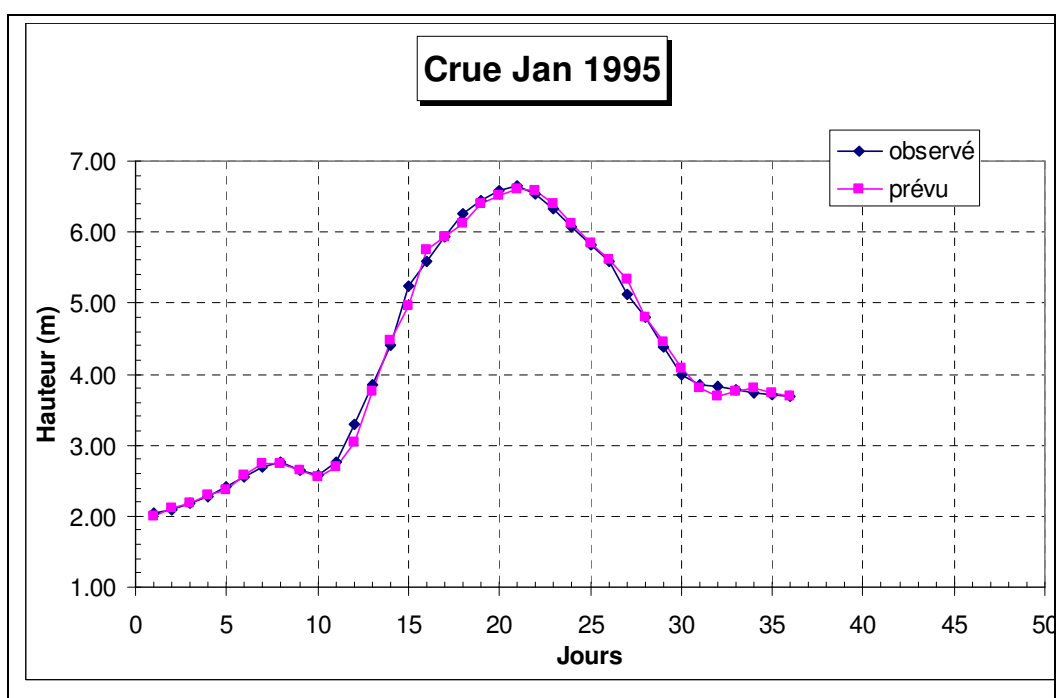
Les crues pour lesquelles on dispose des données de hauteur à Angers en continu sont les crues de janvier 2003 et de janvier 2004. La crue de calage est la crue de janvier 2004. La crue de janvier 2003 a été utilisée pour le test. D'autre part, les mesures sont effectuées au pont de Basse Chaîne et au pont de Haute Chaîne. Le point de prévision étant le pont de Basse Chaîne, le calage a été effectué sur ces données. Pour les crues plus anciennes, la hauteur à Angers est une hauteur mesurée au pont de Verdun chaque jour à 12h, la valeur du maximum n'est pas toujours exactement connue.

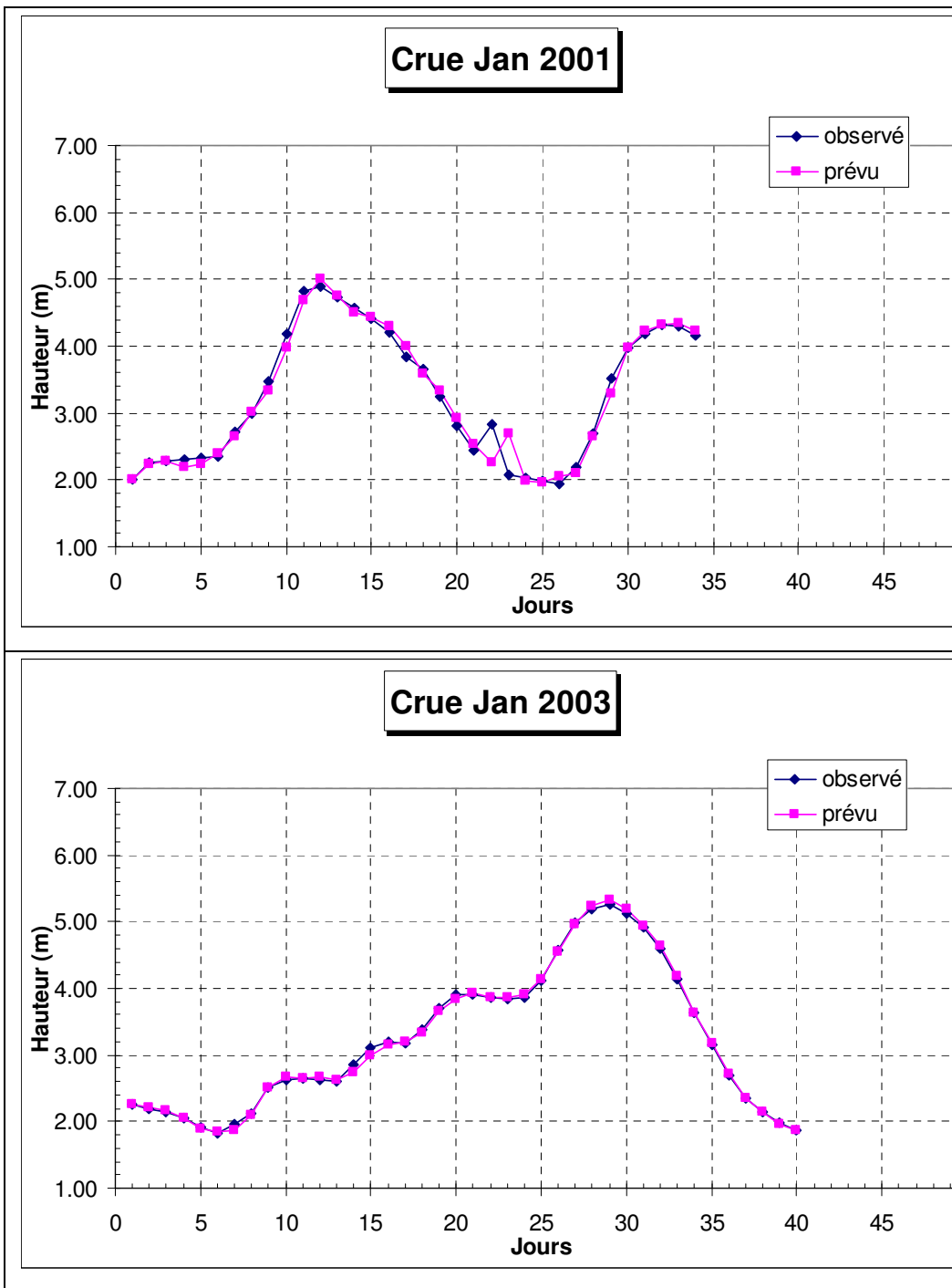
La régression effectuée sur la crue de janvier 2004 conduit à la relation suivante :

$$H(t)\text{Angers estimé} = H(t-1)\text{Angers observé} + 0.962 * [H(t)\text{Montjean} - H(t-1)\text{Montjean}] \text{(les hauteurs sont fournies en m)}$$

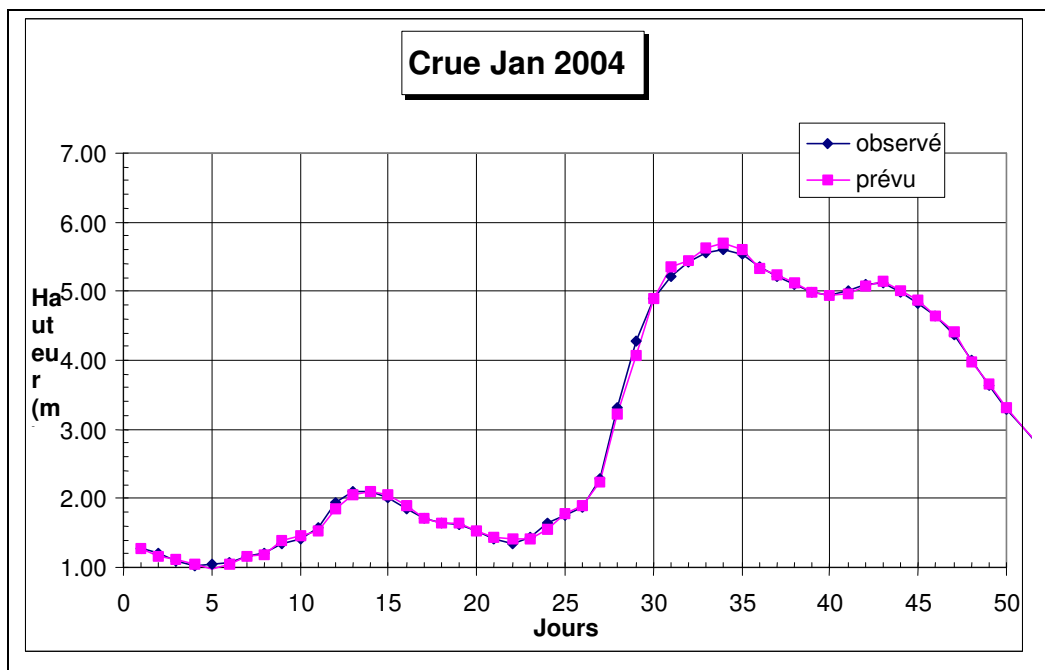
### 3.2.2. Tests

La relation obtenue ci dessus a été testée sur les crues de janvier 1995, 2001, 2003 et 2004, à partir des hauteurs **observées** à Montjean-sur-Loire. Les graphes suivants représentent la hauteur prévue et observée à Angers, pour le délai 24heures. Pour les crues de janvier 1995 et janvier 2001, la hauteur observée à Angers est la hauteur au Pont de Verdun (une mesure par jour). Pour les crues de janvier 2003 et janvier 2004, il s'agit de la hauteur observée au Pont de Basse Chaîne (mesure en continu).









Hormis un décalage sur un pic secondaire de la crue de janvier 2001 pour des faibles hauteurs d'eau à Angers (dû à un problème de données), les résultats sont dans l'ensemble très satisfaisants.

### 3.2.3. Outil complet de prédiction

L'objet de ce paragraphe est de tester l'outil de prédiction complet intégrant les prévisions à Montjean-sur-Loire et les prévisions à Angers, permettant ainsi de prévoir les hauteurs d'eau au pont de la basse Chaîne à Angers en fonction des débits observés sur la Sarthe à Beffes, sur le Loir à Durtal, sur la Mayenne à Château Gontier, sur l'Oudon à Segré et sur la Loire à Saumur et à Montjean-sur-Loire.

A partir des débits prévus à Montjean, la hauteur prévue a été calculée en appliquant la courbe de tarage provisoire existante à Montjean, fournie par la DIREN Pays de Loire (valable depuis 1992). La courbe utilisée est de la forme suivante :

$$H(t) = H_0 + [Q(t)/a]^{1/b}$$

Avec :

Pour  $Q < 1020 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H_0 = -410$

$$a = 0.000189$$

$$b = 2.4864$$

Pour  $1020 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 7060 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H_0 = -468.1$

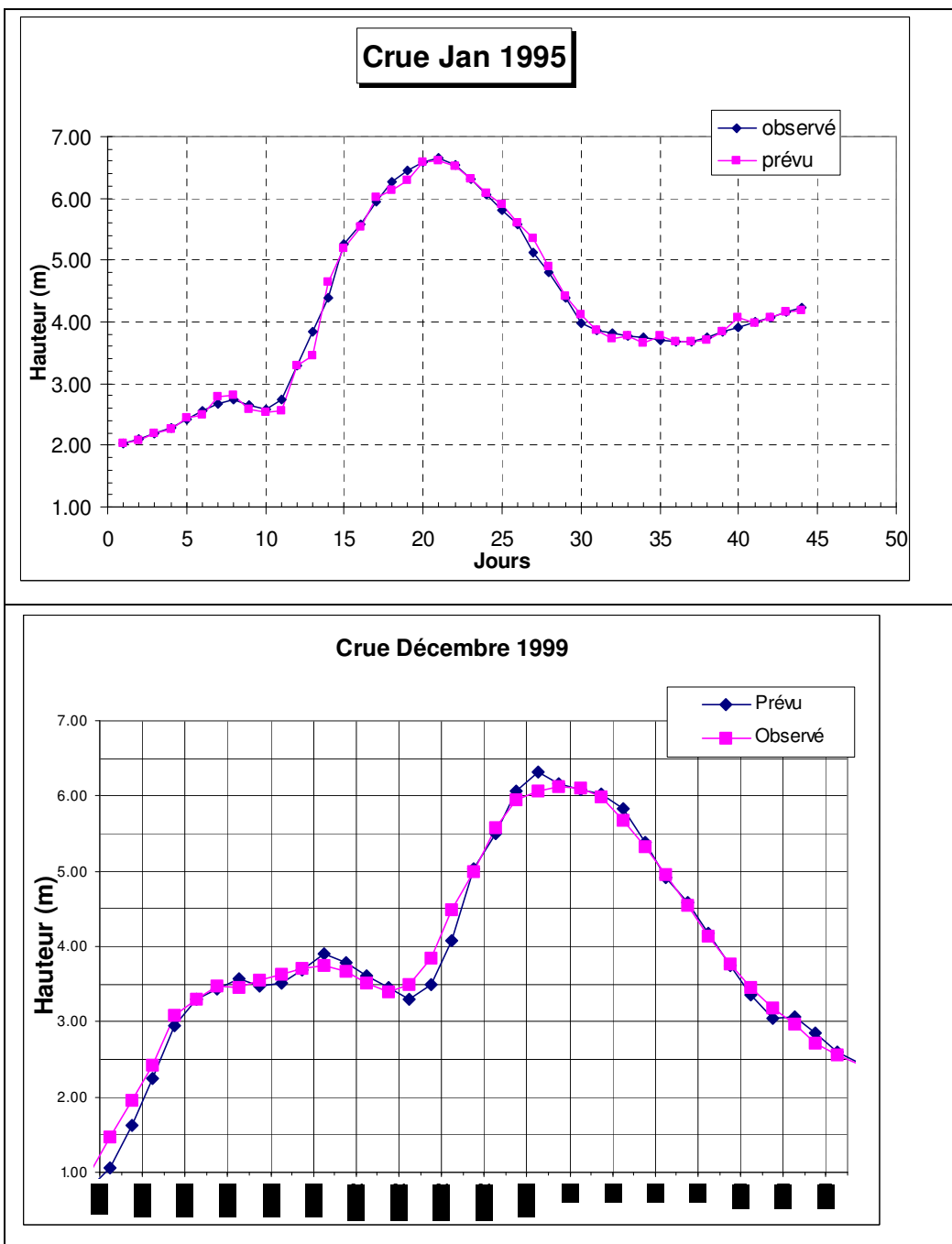
$$a = 0.000145$$

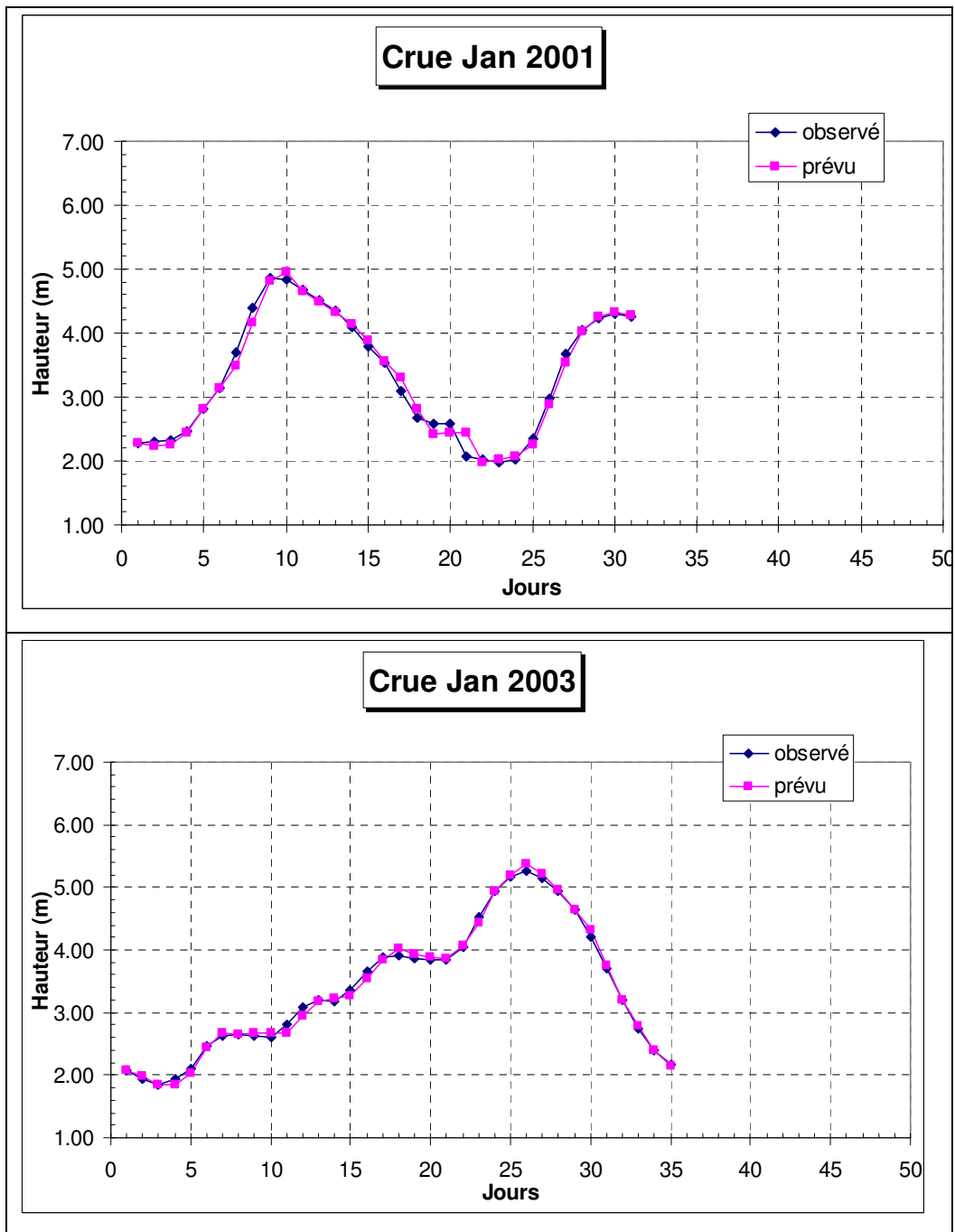
$$b = 2.4864$$

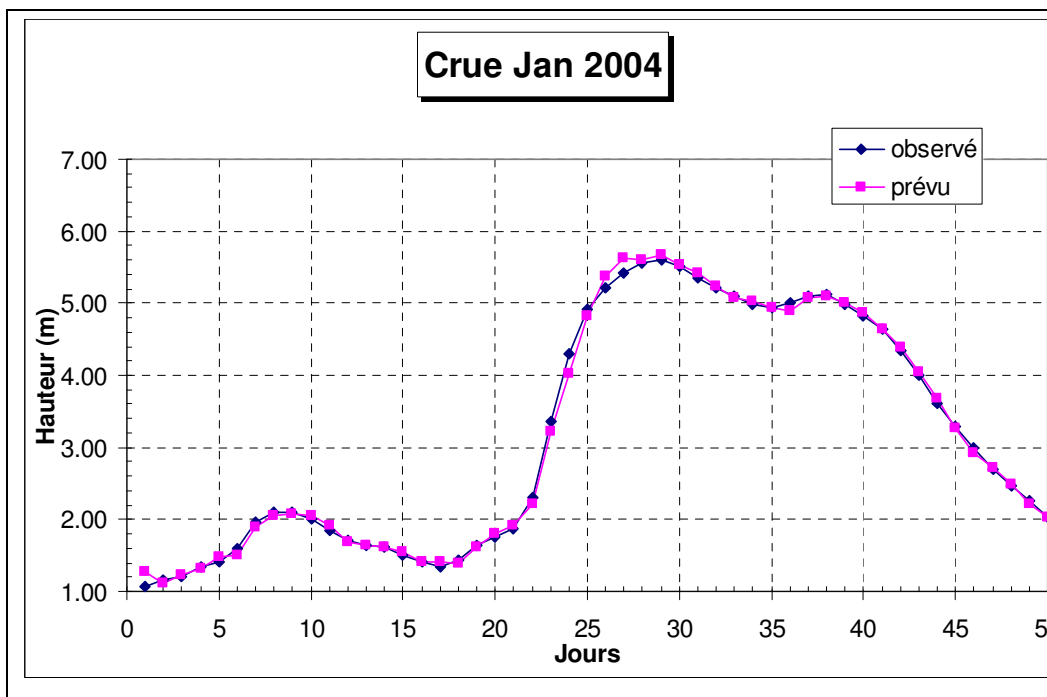
unités : Q en  $\text{m}^3/\text{s}$ , H en cm

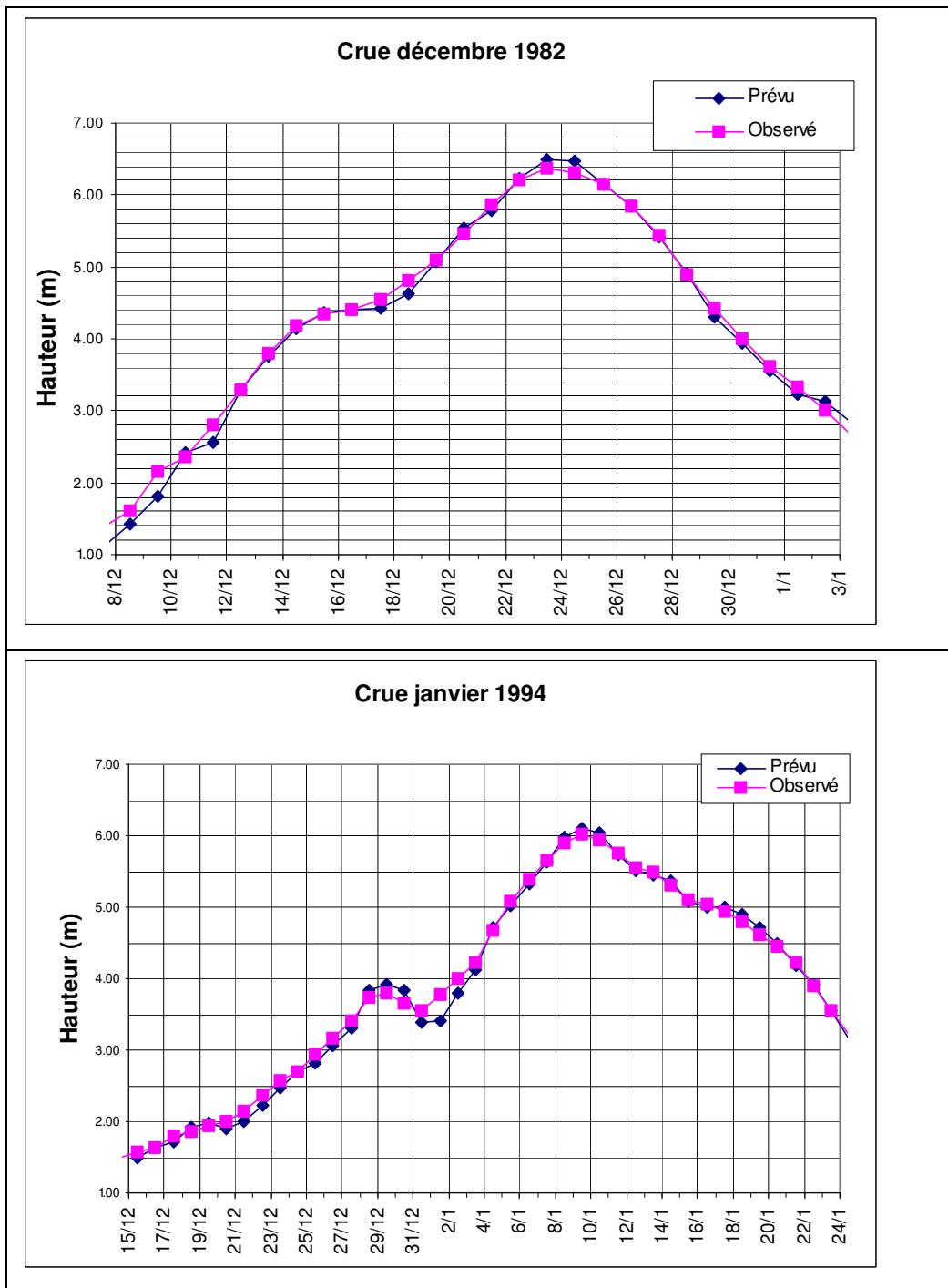
Remarque : cette courbe de tarage est provisoire.

Les hauteurs à Angers sont alors prévues à partir des hauteurs **prévues** à Montjean-sur-Loire. Les graphes suivants permettent de comparer les prévisions effectuées pour l'échéance 24heures, pour les crues de janvier 1995, décembre 1999, janvier 2001, janvier 2003, janvier 2004, janvier 1994 et décembre 1982. Pour ces deux dernières crues, certaines données sont journalières. De plus, pour la crue de décembre 1982, la courbe de tarage à Montjean-sur-Loire n'est pas valable.









Le Tableau 9 présente la qualité des prévisions effectuées à Angers.

**Remarques :**

- pour les crues antérieures à janvier 2003, on ne dispose que d'une seule mesure par jour à Angers, effectuée en principe à 12h. La valeur exacte du maximum n'est par conséquent pas connue ni l'heure d'occurrence.

- Compte-tenu de l'évolution du lit de la Loire à Montjean-sur-Loire (voir analyse hydrologique), la hauteur observée à Montjean-sur-Loire a été recalculée pour chaque crue à partir du débit observé, en utilisant la courbe de tarage unique à Montjean-sur-Loire présentée précédemment (courbe provisoire valable depuis 1992). Cela permet de ne pas biaiser le calcul de prévisions à Montjean-sur-Loire. Par contre, cela a pour effet de biaiser les calculs de prévisions à Angers pour les crues anciennes. La hauteur à Angers présentée dans le Tableau 9 est la hauteur réellement observée.

**Tableau 9 : Qualité des prévisions à Angers (enchaînement prévisions Montjean-sur-Loire et Angers)**

Crue	Hmax observée à Angers (*) (m)	Erreur absolue sur le maximum (cm)	Erreur absolue au moment du maximum observé (cm)	Fourchette d'erreur pour les hauteurs supérieures à 4m à Angers (cm)	Ecart-type de l'erreur (cm)	Décalage sur le maximum (h)
déc-82	6.37	12	12	-18 à 16	4	0
janv-94	6.02	8	8	-43 à 11	6	0
janv-95	6.65	-3	-3	-15 à 24	7	0
déc-99	6.12	20	3	-8 à 25	4	24 (avance)
janv-01	4.85	10	-4	-23 à 11	9	24 (retard)
janv-03	5.26	12	12	-8 à 12	5	0
janv-04	5.61	7	7	-29 à 20	5	0

(\*) : avant 2003 : hauteur observée une fois par jour au pont de Verdun ; à partir de 2003 : hauteur mesurée en continu au pont de Basse Chaîne

### 3.3. PRISE EN COMPTE EXPLICITE DES APPORTS INTERMEDIAIRES A PARTIR DE L'AUBANCE ET DU LAYON

A partir du calage précédemment retenu pour les prévisions à Montjean-sur-Loire et à Angers, l'impact de la prise en compte des apports intermédiaires a été testé. Les apports intermédiaires comprennent les bassins du Layon, du Thouet, de l'Aubance et de l'Authion, ainsi que la zone des BVA en aval des stations hydrométriques. Les débits du Layon et de l'Aubance ont été utilisés pour représenter l'ensemble des apports intermédiaires (cf Etude hydrologique). Les débits pris en compte sont les débits journaliers, on considère en effet que les pointes de courte durée de ces petits affluents auront un rôle peu important sur les crues de la Loire ou de la Maine. De plus, ces deux affluents étant utilisés pour représenter l'ensemble des apports intermédiaires, les pointes spécifiques à ces rivières ne représenteraient pas les pointes des autres affluents et leur prise en compte serait plutôt source d'erreurs.

Un débit global des apports intermédiaires a été estimé à partir des débits du Layon et de l'Aubance de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 Q \text{ intermédiaire}(t) &= Q_{\text{Layon}}(t) && \text{(représente le Layon)} \\
 &+ Q_{\text{Layon}}(t-12h) * 3.019 - 10.4 && \text{(représente le Thouet)} \\
 &+ Q_{\text{aubance}}(t) * 14.07 && \text{(représente l'Aubance, l'Authion et les apports intermédiaires des BVA)}
 \end{aligned}$$

Ces coefficients résultent de l'étude hydrologique.

Les stations hydrométriques prises en compte sont les stations de St Lambert du Lattay pour le Layon et de Soulaines sur Aubance pour l'Aubance. Ce sont des stations gérées par la DIREN des Pays de la Loire.

Le gradient horaire de variation de ce débit intermédiaire a été ajouté à la somme des gradients horaires des affluents de façon à obtenir un nouveau jeu de paramètres de régression pour l'équation générale qui reste la même :

$$\Delta Q(t)_{\text{Montjean}} = a * \sum \Delta Q(t-t_0)_{\text{Affluents}} + b * \Delta Q(t-24)_{\text{Montjean}}$$

avec :

$\Delta Q(t)$  gradient horaire du débit en m<sup>3</sup>/s/h entre l'instant t et l'instant t-1, t en h,

t<sub>0</sub> = décalage temporel propre à chaque affluent (cf Tableau 3)

t<sub>0</sub> = 0h pour  $\Delta Q$  intermédiaire

Remarque : les débits horaires des apports intermédiaires sont calculés par interpolation à partir des débits journaliers, en affectant la valeur du débit journalier à 12h.

Les coefficients obtenus sont fournis dans le Tableau 10.

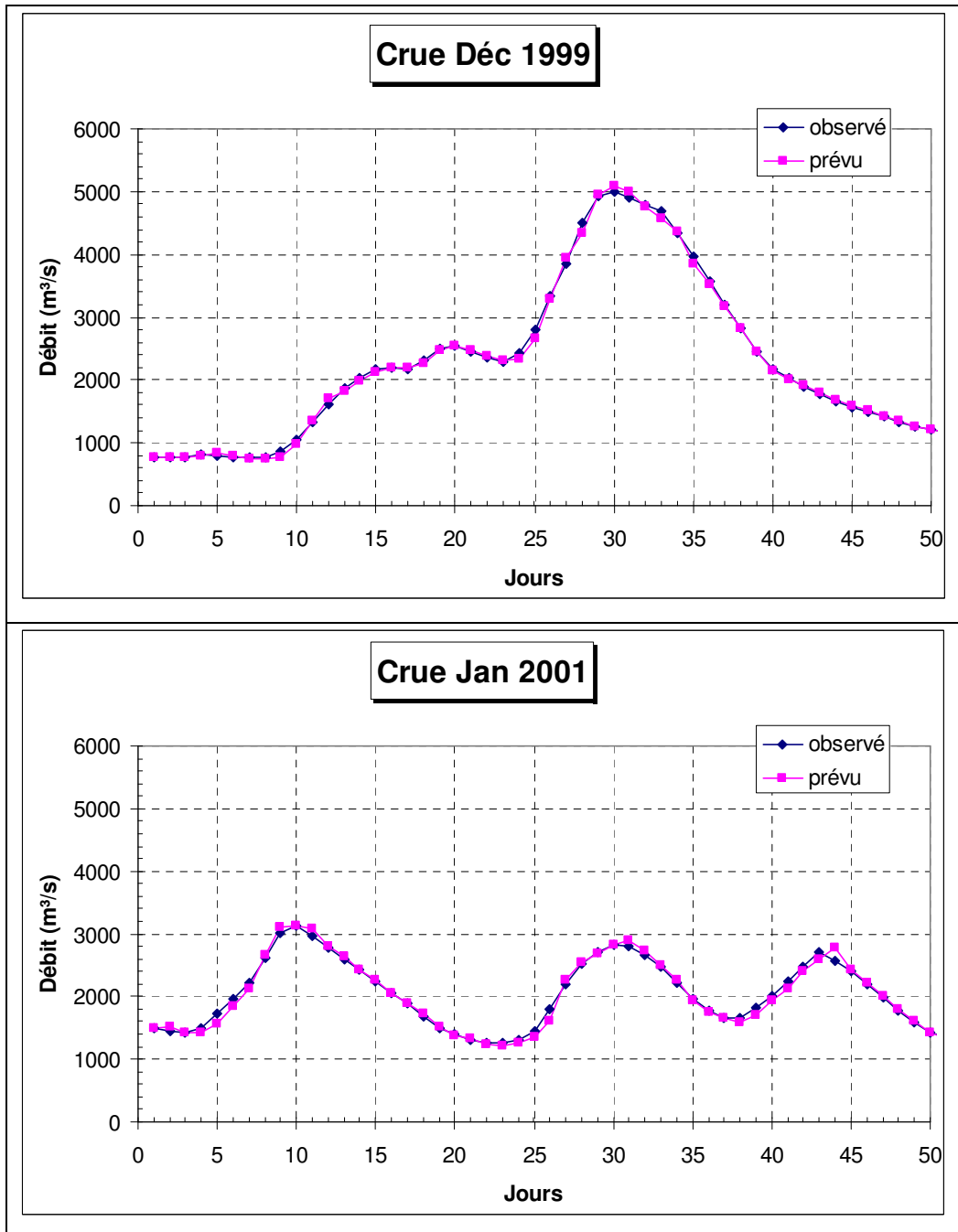
**Tableau 10 : Coefficients des équations de prédiction à Montjean-sur-Loire prenant en compte les débits du Layon et de l'Aubance**

Classe de gradient de débit horaire à Montjean (m <sup>3</sup> /s/h)	a	B
$\Delta Q_{\text{Montjean}} < -10$	0.316	0.793
$-10 < \Delta Q_{\text{Montjean}} < 0$	0.329	0.610
$0 < \Delta Q_{\text{Montjean}} < 10$	0.249	0.401
$10 < \Delta Q_{\text{Montjean}} < 20$	0.654	0.339
$20 < \Delta Q_{\text{Montjean}}$	0.187	0.835

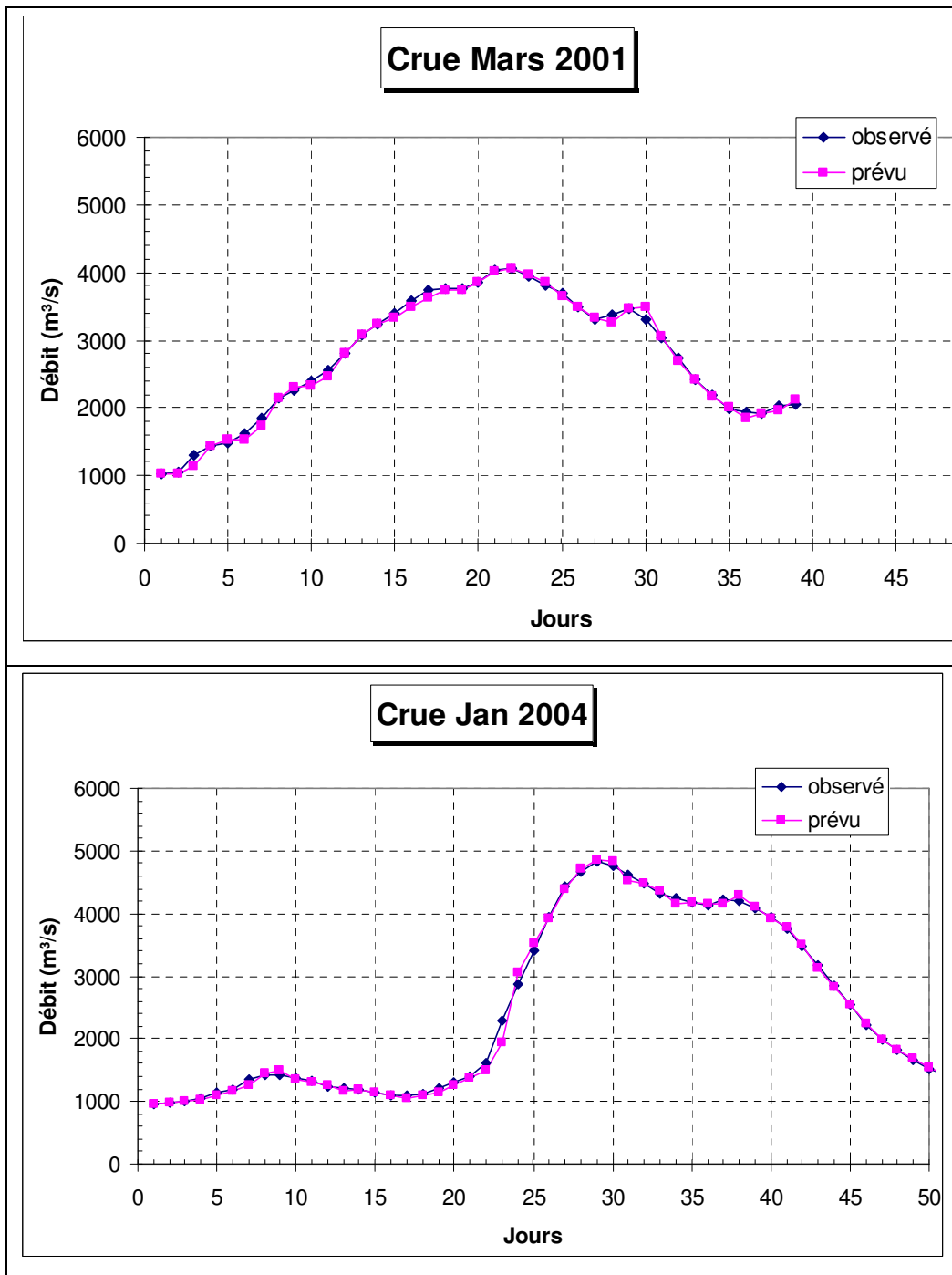
Ce jeu de paramètre a ensuite été appliqué à quelques crues de manière à comparer la qualité des résultats obtenus avec celles des modèles précédents.

### 3.3.1. Prévisions à Montjean-sur-Loire

Les résultats sur les débits prévus à Montjean-sur-Loire sont présentés dans les graphes suivants (comparaison des prévisions à 24heures).







Le Tableau 11 présente la qualité des prévisions effectuées à Montjean-sur-Loire.

**Tableau 11 : Qualité des prévisions à Montjean-sur-Loire avec prise en compte des débits du Layon et de l'Aubance**

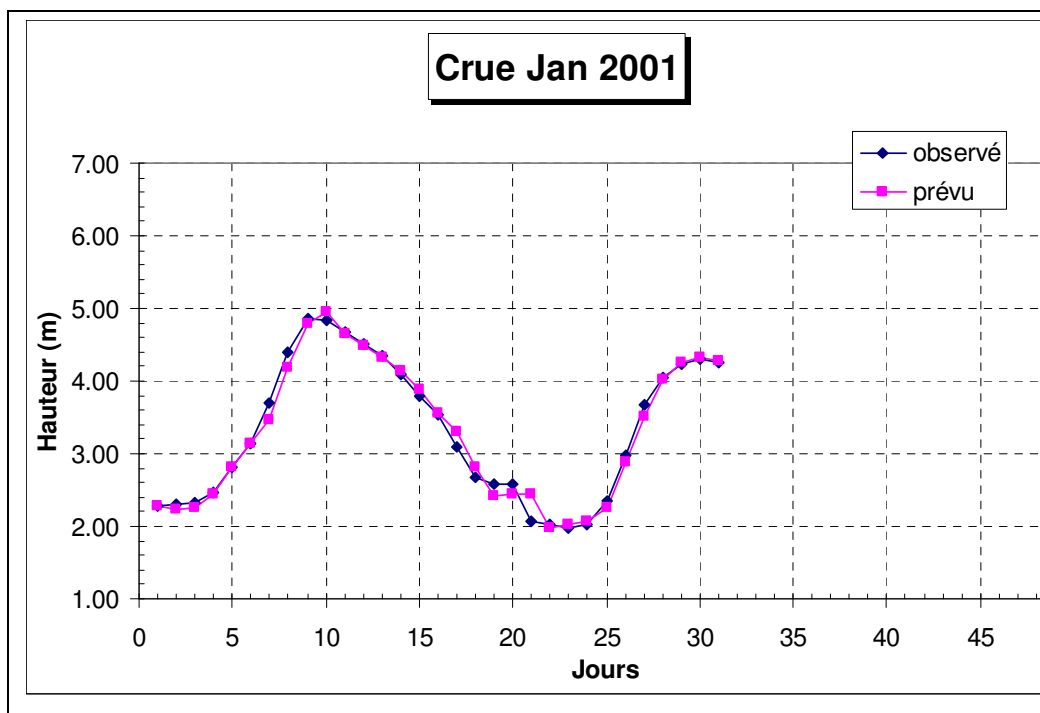
Crue	Qmax observé (m <sup>3</sup> /s)	Erreur absolue sur le maximum (m <sup>3</sup> /s)	Erreur absolue au moment du maximum observé (m <sup>3</sup> /s)	Fourchette d'erreur pour les hauteurs supérieures à 4m à Angers (m <sup>3</sup> /s)	Ecart-type de l'erreur (m <sup>3</sup> /s)	Décalage sur le maximum (h)
Déc-99	4998	86	86	*	37	0
Janv-01	3134	-3	-3	-8 à 136	52	0
mars-01	4070	2	2	*	46	0
Janv-04	4833	20	20	-84 à 180	42	0

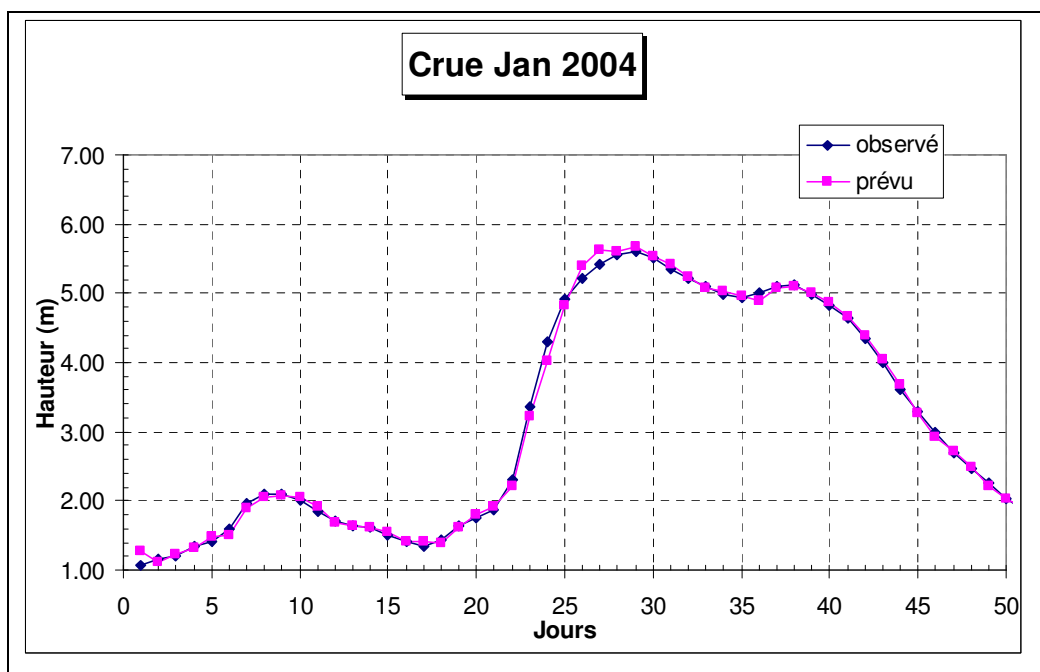
Par rapport aux équations précédentes, les résultats sont légèrement meilleurs en terme d'écart type (il est réduit de 2 à 14 m<sup>3</sup>/s selon les crues).

Les conclusions sur le maximum de la crue sont plus variables, puisque l'on gagne 53 m<sup>3</sup>/s en valeur absolue (-3 m<sup>3</sup>/s contre 56 m<sup>3</sup>/s) pour la crue de janvier 2001, alors que l'on perd 22 m<sup>3</sup>/s pour la crue de décembre 1999.

### 3.3.2. Prévisions à Angers

Les résultats sur les hauteurs prévues à Angers au pont de Basse Chaîne sont présentés sur les graphes suivants.





Le Tableau 12 présente la qualité des prévisions effectuées à Angers :

**Tableau 12 : Qualité des prévisions à Angers avec prise en compte des débits du Layon et de l'Aubance**

Crue	Hmax observée (*) (m)	Erreur absolue sur le maximum, erreur relative (cm)	Erreur absolue au moment du maximum observé (cm)	Fourchette d'erreur pour les hauteurs supérieures à 4m à Angers (cm)	Ecart-type de l'erreur (cm)	Décalage sur le maximum (h)
janv-01	4.85	11	-6	-21 à 12	9	24 (retard)
janv-04	5.61	7	7	-29 à 20	5	0

(\*) janvier 2001 : hauteur observée une fois par jour au pont de Verdun, janvier 2004 : hauteur mesurée en continu au pont de Basse Chaîne

Les résultats sur les hauteurs à Angers sont identiques aux résultats obtenus précédemment : inclure les apports du Layon et de l'Aubance n'améliore pas, pour les crues testées, la qualité de la prévision à Angers.

L'utilisation des débits du Layon et de l'Aubance pour les prévisions nécessiterait d'une part l'automatisation des stations, d'autre part l'élaboration de prévisions des débits journaliers sur ces rivières. En effet, les décalages temporels utilisés sont de 24h pour le Thouet (prévision non nécessaire), de 12h sur l'Aubance (prévision à 12h nécessaire), et de 0h pour le Layon (prévision à 24h nécessaire). L'utilisation de prévisions en données d'entrées risquerait d'entraîner de nouvelles erreurs de prévision.

La prise en compte explicite des apports intermédiaires à partir de l'Aubance et du Layon n'a donc pas été retenue pour le modèle de prévision.

### 3.4. CONCLUSION

Le développement d'un outil de prévision des hauteurs d'eau à Montjean-sur-Loire et Angers à partir des outils existants a été possible par l'élaboration de nouvelles équations. Ces nouvelles équations sont basées sur les mêmes principes que les équations des modèles antérieurs, c'est à dire une prévision du gradient et non une prévision directe du débit. Les modifications apportées sont les suivantes :

- Prise en compte de nouvelles variables explicatives, en particulier, prise en compte du gradient horaire à Montjean à t-24h.
- Suppression des coefficients multiplicatifs des débits d'entrée, qui représentaient l'accroissement de débit proportionnel à la surface des bassins versants intermédiaires. Comme il a été vu dans l'étude hydrologique, les apports intermédiaires ne seront pas a priori toujours corrélés aux débits amont, les épisodes pluvieux affectant les grands bassins amont étant différents des épisodes pluvieux touchant le bassin intermédiaire,
- Calage sur des crues récentes. En particulier la crue de décembre 1982 n'a pas été utilisée pour le calage, contrairement au calage des outils antérieurs. D'une part, les conditions d'écoulement étaient différentes des conditions actuelles, du fait de l'approfondissement du lit de la Loire. D'autre part, les débits instantanés n'étaient pas disponibles pour toutes les stations pour cette crue.
- Calage des coefficients par tranche de gradient et non par tranche de débit. Les problèmes rencontrés avec les outils antérieurs provenaient souvent de défauts associés à des valeurs de gradients variables au sein d'une même gamme de débit.

Les résultats obtenus avec le nouvel outil de prévision conduisent à une réduction importante de l'erreur moyenne ainsi qu'à une nette réduction des décalages en phase de montée et au moment du maximum, par rapport aux outils antérieurs. La prévision du maximum de la crue est également améliorée.

A Montjean-sur-Loire, l'erreur sur le maximum est très faible (de l'ordre de 1 à 2% sur le débit), et le calage dans le temps est très satisfaisant. De légers décalages peuvent subsister en phase de montée pour des débits relativement faibles (dans la gamme de 2000 à 3000 m<sup>3</sup>/s). En ce qui concerne les hauteurs, l'erreur dépendra fortement de la stabilité du lit de la Loire et par conséquent de la relation hauteur-débit.

A Angers, l'erreur sur le maximum est en moyenne de l'ordre de 10cm. En phase de montée, on peut cependant obtenir des écarts plus importants (20 à 40cm) car de légers décalages temporels liés à la prévision à Montjean-sur-Loire peuvent subsister, surtout pour les faibles hauteurs (inférieures à 4m à Angers). La précision de la prévision à Angers est tributaire de la précision obtenue sur les hauteurs à Montjean-sur-Loire, dépendant elle-même de la précision des prévisions de débits et de la courbe de tarage. Compte-tenu de l'évolution du lit de la Loire à Montjean-sur-Loire, les résultats obtenus sur les crues passées sont probablement biaisés. L'évolution de la relation hauteur-débit à Montjean-sur-Loire est à surveiller afin de mettre à jour l'outil de prévision dès que nécessaire.

La prise en compte explicite des apports intermédiaires à partir des débits du Layon et de l'Aubance apporte pour certaines crues une légère amélioration à Montjean-sur-Loire, mais n'apporte pas d'amélioration à Angers pour les crues testées.. L'utilisation de prévisions de débits du Layon et de l'Aubance en données d'entrées risquerait d'entraîner de nouvelles erreurs de prévision.

La prise en compte explicite des apports intermédiaires a partir de l'Aubance et du Layon n'a donc pas été retenue pour le modèle de prévision.