

Analyse critique des données piézométriques et prévision de niveaux non influencés en Haute- Normandie

BRGM/RP-54628-FR

Avril 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 06 EAU G18

J.L. Pinault

Avec la collaboration de Luc Arnaud

Vérificateur :

Nom : Luc ARNAUD

Date : 13 avril 2003

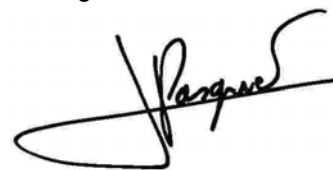
Signature :

Approbateur :

Nom : Jean-François PASQUET

Date : 13 avril 2006

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Analyse Fréquentielle, Craie, Nappe, Prévion, Eure, Seine-Maritime, Haute-Normandie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Pinault J.-L.. – Analyse critique des données piézométriques et prévision de niveaux non influencés en Haute-Normandie. Rapport BRGM/RP-54628-FR, 58 p., 62 fig., 4 tabl., 1 ann.

Synthèse

Dans le cadre des Appuis à la Police de l'Eau, deux objectifs ont été assignés au BRGM par la DIREN Haute-Normandie :

- 1) l'analyse critique de séries piézométriques représentatives du fonctionnement des six masses d'eau concernant l'aquifère crayeux en Haute-Normandie afin de disposer de séries fiables, complètes et aussi représentatives que possible de l'état de remplissage des réservoirs aquifères ;
- 2) l'utilisation d'une partie de ces chroniques pour l'aide à la gestion des ressources en eaux souterraines notamment en période d'étiage marqué.

L'outil d'aide à la gestion mis en œuvre fonctionne dans un environnement EXCELTM et permet pour l'ensemble des piézomètres retenus d'effectuer des prévisions, après une phase de calage sur les observations, en générant quelques centaines de séries climatiques (pluie - ETP) et en faisant une analyse fréquentielle des niveaux.

La sélection des piézomètres a porté sur ceux dont le fonctionnement est bien compris : peu influencés, une modélisation pluie - niveau permet de les représenter avec un degré de précision compatible avec les exigences de la prévision.

8 piézomètres ont été retenus et ont fait l'objet d'une modélisation pluie – niveau suivie de simulations prévisionnelles avec l'utilisation d'un générateur permettant de produire des séquences stochastiques de pluies et d'ETP à partir de la date d'émission de la prévision (1/3/2006). Les simulations sont entièrement automatisées, de même que la mise à jour des données météorologiques et hydrogéologiques à partir de fichiers au format TEXTE, ce qui permet de réaliser des prévisions à court et long termes (un à deux ans) représentées sous la forme de quantiles correspondant à diverses périodes de retour.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Analyse des données piézométriques et modélisation.....	11
2.1. LE MODELE PLUIE-NIVEAU PIEZOMETRIQUE.....	11
2.1.1.Phase de calage sur les observations.....	11
2.1.2.Phase de prévision.....	12
2.2. LES DONNEES CLIMATOLOGIQUES.....	13
2.3. PRESELECTION DES PIEZOMETRES.....	16
3. Prévisions à court et long termes	27
3.1. PRINCIPE.....	27
3.2. L'ENVIRONNEMENT EXCEL.....	28
3.3. LA PREVISION A COURT ET LONG TERME PORTANT SUR LES PIEZOMETRES REPRESENTATIFS DES DIFFERENTES MASSES D'EAU ..	32
4. Conclusions	41
5. Bibliographie.....	43

Liste des illustrations

Fig. 1 - Principe d'un modèle "pluie-niveau" à réponses impulsionnelles	12
Fig. 2 – Principe du modèle autorégressif	13
Fig. 3 – Optimisation du corrélogramme croisé pluie/Niveau Moisville.....	14
Fig. 4 –Farceaux : retenu pour la prévision.	17
Fig. 5 - Catenay : ne convient pas pour la prévision en raison de l'influence des pompages (tendance à la baisse).	17
Fig. 6 – Le Héron : influencé par les pompages en années déficitaires.	18
Fig. 7 – Montaure : retenu pour la prévision.....	18
Fig. 8 – Les Trois Pierres : aquifère hétérogène, ne convient pas pour la prévision.	19
Fig. 9 – Bois d’Ennebourg : retenu pour la prévision.	19
Fig. 10 – Hattenville : aquifère hétérogène, ne convient pas pour la prévision (la crue de 2001 est sensiblement au même niveau que celle de 1995 alors que la lame d'eau est plus importante en 2001 qu'elle n'est en 1995, ce qui laisse supposer que la partie supérieure de l'aquifère possède un coefficient d'emmagasinement supérieur à celui de sa partie inférieure).....	20
Fig. 11 – Veauville-les-Quelles : aquifère hétérogène, ne convient pas pour la prévision	20
Fig. 12 – Tocqueville-en-Caux : retenu pour la prévision.....	21
Fig. 13 – Rocquemont : redondance avec Criquiers.	21
Fig. 14 – Aumale : piézomètre influencé (tendance à la baisse), ne convient pas pour la prévision.	22
Fig. 15 – Criquiers : retenu pour la prévision.	22
Fig. 16 – Realcamp : fonctionnement en 'tout ou rien' en raison de la triple porosité de la craie (comportement karstique ?), ne convient pas pour la prévision.	23
Fig. 17 – Moisville : retenu pour la prévision.	23
Fig. 18 – Graveron-Semerville : retenu pour la prévision.....	24
Fig. 19 – Goupillières : influencé par les pompages (tendance à la baisse), ne convient pas pour la prévision.....	24
Fig. 20 – Fourmetot : retenu pour la prévision.	25
Fig. 21 – Lieurey : un niveau de base semble être imposé par la nappe de l'Albien sous-jacente, ne convient pas pour la prévision.	25
Fig. 22 – Saint Maclou : aquifère hétérogène, ne convient pas pour les prévisions.	26
Fig. 23 – Feuille « Prévision » du classeur EXCEL.....	29
Fig. 24 – Les différents paramètres de la prévision.	30
Fig. 25 – Les différents paramètres de la représentation graphique.....	30
Fig. 26 – La feuille « Graphiques » représente l'ensemble des piézomètres associés à un modèle prévisionnel.....	31

Fig. 27 – Farceaux (MES 3201) : Prévision à court terme.....	33
Fig. 28 – Farceaux (MES 3201) : Prévision à long terme.....	33
Fig. 29 – Montaure (MES 3202) : Prévision à court terme.	34
Fig. 30 – Montaure (MES 3202) : Prévision à long terme.....	34
Fig. 31 – Bois d'Ennebourg (MES 3202) : Prévision à court terme.	35
Fig. 32 – Bois d'Ennebourg (MES 3202) : Prévision à long terme.	35
Fig. 33 – Tocqueville en Caux (MES 3203) : Prévision à court terme.....	36
Fig. 34 – Tocqueville en Caux (MES 3203) : Prévision à long terme.....	36
Fig. 35 – Criquiers (MES 3204) : Prévision à court terme.....	37
Fig. 36 – Criquiers (MES 3204) : Prévision à long terme.....	37
Fig. 37 – Moisville (MES 3211) : Prévision à court terme.....	38
Fig. 38 – Moisville (MES 3211) : Prévision à long terme.....	38
Fig. 39 – Graveron-Semerville (MES 3211) : Prévision à court terme.....	39
Fig. 40 – Graveron-Semerville (MES 3211) : Prévision à long terme.....	39
Fig. 41 – Fourmetot (MES 3212) : Prévision à court terme.....	40
Fig. 42 – Fourmetot (MES 3212) : Prévision à long terme.....	40
Fig. 43 – Boite de dialogue invitant à définir le fichier associé au logiciel Tempo.....	48
Fig. 44 – Définition du chemin du fichier associé à Tempo.	48
Fig. 45 – Saisie des pluies depuis la climathèque.....	49
Fig. 46 – Saisie des pluies depuis la climathèque (pas de temps).....	49
Fig. 47 – Saisie des pluies depuis la climathèque (référence temporelle).....	50
Fig. 48 – Saisie des pluies depuis la climathèque (station).....	50
Fig. 49 – Saisie des pluies depuis la climathèque (sélection de la station et validation).....	51
Fig. 50 – Saisie des pluies depuis la climathèque (commande).....	51
Fig. 51 – Saisie des pluies depuis la climathèque (extraction).....	52
Fig. 52 – Saisie des pluies depuis la climathèque (enregistrement).....	52
Fig. 53 – Saisie de l'ETP depuis la climathèque.....	53
Fig. 54 – Saisie de l'ETP depuis la climathèque (suite).....	53
Fig. 55 – Importation des données de pluie depuis Normandie.xls.....	54
Fig. 56 – Importation des données de pluie depuis Normandie.xls (choix du format).....	54
Fig. 57 – Importation des données d'ETP depuis Normandie.xls (choix du format).....	54
Fig. 58 – Importation des données piézométriques depuis Normandie.xls (choix du format).....	55
Fig. 59 – Références temporelles de la prévision : date de la fin de la validation et du début de la prévision.	55
Fig. 60 – Validation, simulation.	55

Fig. 61 – Simulation : avancement des calculs	56
Fig. 62 – Options concernant la représentation graphique	56
Tabl. 1 – Pluies optimales appliquées aux différentes masses d'eau.....	15
Tabl. 2 – Liste des piézomètres ayant été analysés pour chacune des masses d'eau.	16
Tabl. 3 – Temps de transit moyen (jours) correspondant aux composantes lente et rapide des différents piézomètres retenus pour la prévision.....	29
Tabl. 4 – Piézomètres simulés	47

Liste des annexes

Annexe 1 – Mode opératoire de l'outil de prévision	45
--	----

1. Introduction

Cette étude a été confiée au brgm par la DIREN Haute-Normandie dans le cadre des Appuis à la Police de l'Eau. Deux objectifs principaux lui ont été assignés :

- 1) l'analyse critique des séries piézométriques télétransmises du réseau IDF (<http://seine-normandie.brgm.fr/accueil.dbc>) afin de disposer de séries fiables, complètes et aussi représentatives que possible de l'état de remplissage des réservoirs aquifères ;
- 2) l'utilisation d'une partie de ces séries piézométriques pour élaborer des outils d'aide à la gestion des ressources en eaux souterraines notamment en période de sécheresse.

L'outil d'aide à la gestion mis en œuvre dans cette étude comporte des **modèles de transfert "pluie - niveau piézométrique"** qui, pour chaque piézomètre, permettent d'effectuer des prévisions après une phase de calage sur les observations en générant de très nombreuses séries climatiques (pluies-ETP) et en faisant une analyse fréquentielle des niveaux correspondants.

Dans l'ensemble des piézomètres disponibles gérés par le brgm Haute-Normandie ont été écartés ceux pour lesquels les chroniques sont trop courtes et ceux qui sont trop influencés par des pompages. Certains piézomètres ont également été écartés car leur fonctionnement est mal compris, ce qui signifie que leur comportement ne peut s'expliquer à partir d'un modèle pluie-niveau en raison d'éléments perturbateurs importants qu'il n'a pas toujours été possible d'analyser avec certitude dans le cadre de cette étude.

In fine, 8 piézomètres ont été retenus et on fait l'objet d'une modélisation "pluie - niveau" suivie de simulations prévisionnelles avec utilisation d'un générateur permettant de produire des séquences stochastiques de pluies et d'ETP à partir de la date d'émission de la prévision (1/3/2006). Les simulations sont totalement automatisées et intégrées dans un environnement Excel.

2. Analyse des données piézométriques et modélisation

Les données piézométriques sont parfois influencées par des prélèvements, qui peuvent être variables dans le temps (par exemple saisonniers pour l'irrigation). Il peut s'agir de l'influence d'un pompage voisin du piézomètre d'observation ou bien des influences conjuguées de nombreux pompages se traduisant alors dans la nappe captée par un cône de dépression qui peut s'étendre plus ou moins suivant les caractéristiques de l'aquifère et l'importance de la nappe.

En fonction du régime annuel des prélèvements, de leur évolution dans le temps, cela peut se traduire dans la chronique piézométrique par des cycles courts ou bien par une tendance à la baisse (par exemple une tendance linéaire), qui peut se manifester durablement si les prélèvements sont en croissance régulière ou si la nappe est surexploitée.

2.1. LE MODELE PLUIE-NIVEAU PIEZOMETRIQUE

Le traitement numérique des séries piézométriques est réalisé à l'aide du logiciel TEMPO du brgm, logiciel dédié au "traitement du signal" (séries temporelles de mesures). En hydrologie/hydrogéologie, ce logiciel permet, entre autres possibilités :

- de décomposer des hydrogrammes ;
- de faire de la prévision de débits ou de niveaux piézométriques.

2.1.1. Phase de calage sur les observations

Dans le cadre de cette étude, les variations piézométriques sont reconstituées à partir d'un modèle de transfert pluie/niveau au moyen de fonctions de transfert comme indiqué sur la Fig. 1.

Dans sa formulation la plus générale, ce modèle est non linéaire de manière à prendre en compte les transferts au travers de la zone non saturée en présence d'une double porosité.

Dans ce cas, deux fonctions de transfert sont définies :

- l'une correspond à une réponse lente caractérisant la migration de l'eau au travers de la matrice ;
- l'autre correspond à une réponse rapide destinée à prendre en compte les écoulements au travers des macropores (ou de fractures).

De manière à minimiser le nombre de degrés de liberté du modèle, ces fonctions de transfert, encore appelées réponses impulsionnelles, sont définies par un modèle paramétrique : les fonctions de transfert sont des fonctions analytiques obtenues par le

produit de convolution d'une gaussienne (recharge de la nappe) par une exponentielle (tarissement).

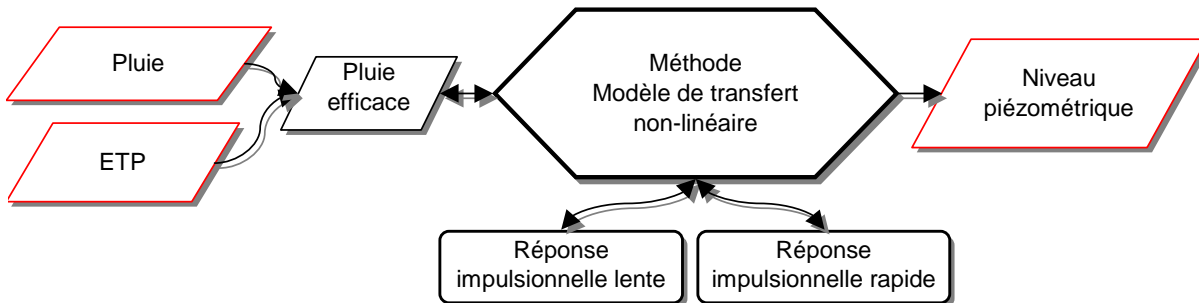


Fig. 1 - Principe d'un modèle "pluie-niveau" à réponses impulsionnelles

Le niveau piézométrique en sortie est exprimé par rapport au niveau basses eaux. Lorsque le temps de régulation du niveau piézométrique est inférieur à une année (Fig. 4), le niveau basses eaux Z_{\min} est calculé de sorte que $Z_{\min} = \bar{Z} - 2.5.S$ où \bar{Z} est la moyenne du niveau piézométrique calculée sur la période d'observation et S son écart-type estimé, ce qui correspond à une période de retour de 160 ans (approximation gaussienne).

Lorsque le niveau piézométrique est influencé par des pompages, une tendance doit être éventuellement prise en compte, ce qui revient à faire varier le niveau de base au cours du temps.

La pluie efficace est exprimée à partir de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) comme le montre la Fig. 1.

2.1.2. Phase de prévision

Toutefois, pour la prévision des niveaux piézométriques à court terme, ce modèle de transfert peut introduire des erreurs systématiques en raison des écarts entre les observations et le niveau calculé dont les origines sont diverses : échantillonnage de la pluie, non prise en compte de certains phénomènes tels que les pompages saisonniers par le modèle. Pour pallier ce manque de précision qui peut être préjudiciable lorsque la prévision se fait à très court terme, un processus autorégressif est utilisé à la place du modèle de transfert (Fig. 2).

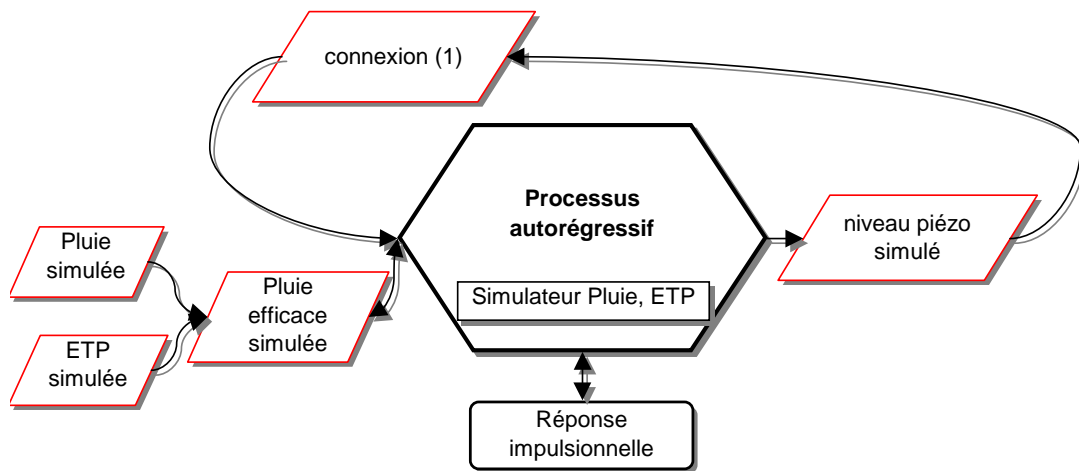


Fig. 2 – Principe du modèle autorégressif

En plus de la pluie efficace, un tel modèle utilise le niveau piézométrique passé qui devient une entrée du modèle pour le calcul au pas de temps suivant.

Pour le premier pas de temps de la prévision, le niveau piézométrique passé est le niveau observé. Dans la prévision à long terme, le modèle utilise "en entrée" les niveaux simulés au cours des pas de temps précédents (d'où le qualificatif autorégressif).

Le processus autorégressif assure la quasi-continuité de la prévision suite aux observations. De plus, il permet un ajustement généralement de meilleure qualité que le modèle de transfert, ce qui peut être vérifié en appliquant le modèle autorégressif aux séquences de pluie et d'ETP observées en réalisant une prévision à long terme, c'est-à-dire sans prendre en compte le niveau observé (excepté lors de l'initialisation du processus), puis de comparer *a posteriori* le résultat au niveau observé.

2.2. LES DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Elles comprennent les données pluviométriques et d'évapotranspiration potentielle. Six stations climatologiques sont utilisées au pas décadaire : Chartres, Rouen, Caen, Trappes, Senlis et Amiens. Ces stations automatiques n'appartiennent pas nécessairement à la zone d'étude mais elles caractérisent les flux de précipitation sur les différents bassins.

La pluviométrie mesurée à un endroit donné est caractérisée par sa valeur moyenne ainsi que ses variations journalières (ou décadaires). La valeur moyenne de la pluie qui s'exprime à partir des isohyètes est généralement bien connue et peut être interpolée de manière à en donner une représentation spatiale continue. Cette valeur moyenne dépend du relief, de la proximité à l'océan ou bien de conditions locales conjuguant plusieurs effets comme pour les pluies cévenoles. Par contre, les valeurs journalières de la pluie réduite (la pluie divisée par sa moyenne ou par son écart-type) sont mal

connues car les données fournies par les pluviomètres sont entachées d'erreurs d'échantillonnage importantes. Or, ce sont ces données qui sont déterminantes aussi bien pour la prévision des crues que pour l'estimation de la ressource disponible.

Régionaliser les pluies à l'échelle de bassins revient à optimiser le corrélogramme croisé formé à partir d'une combinaison linéaire de séries de pluies efficaces mesurées à différentes stations et du débit (ou un niveau piézométrique) mesuré à l'exutoire. En effet, les données d'entrée et de sortie des modèles de transfert étant réduites (divisées par leur écart-type), seules les valeurs journalières (ou décadaires) de la pluie réduite interviennent et déterminent la précision des modèles. La pluie optimale R_{Σ} est donc construite à partir d'une somme pondérée des séries pluviométriques de telle sorte que l'aire déterminée par la branche ascendante du corrélogramme croisé :

$$[\text{pluie efficace pondérée}] \longrightarrow [\text{débit à l'exutoire}]$$

soit maximale. Cette méthode d'optimisation ne repose sur aucune hypothèse arbitraire puisqu'elle ne fait que traduire et renforcer la relation causale pluie/débit.

La Fig. 3 montre le résultat de l'optimisation. Bien que les stations retenues dans la pluie optimale R_{Σ} ne soient pas sur la zone d'étude, leur combinaison linéaire maximise l'aire de la branche croissante du corrélogramme.

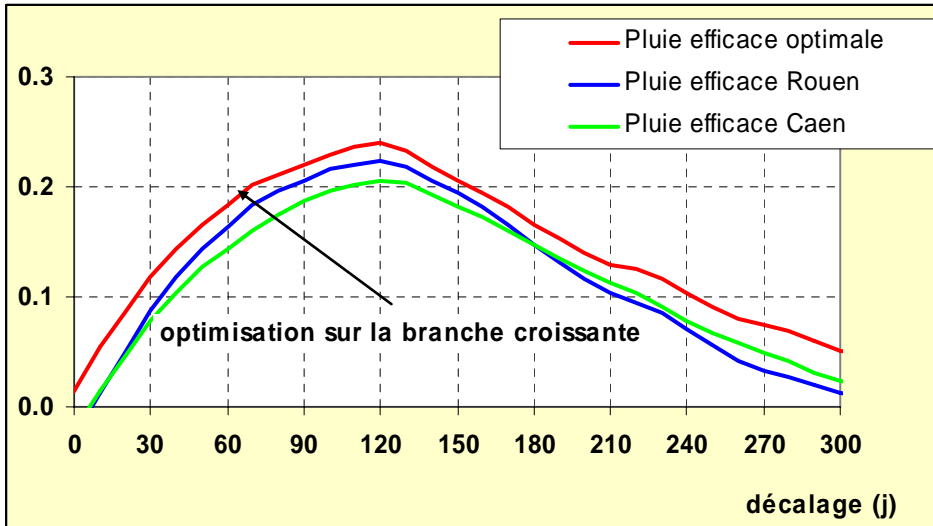


Fig. 3 – Optimisation du corrélogramme croisé pluie/Niveau Moisville.

La pluie optimale est :

$$R_{\Sigma} = 0.25 \times \text{Chartres} + 0.25 \times \text{Amiens} + 0.50 \times \text{Senlis}$$

Le Tabl. 1 synthétise les pluies optimales utilisées pour les différents piézomètres sélectionnés. La combinaison des pluies maximise l'aire du corrélogramme croisé correspondant au temps de concentration (partie croissante du corrélogramme ; le décalage est compris entre 0 et 120 jours au pas décadaire). Le corrélogramme croisé correspondant à la combinaison optimale se trouve au-dessus de tout corrélogramme croisé obtenu à partir des pluies considérées indépendamment les unes des l'autres (Rouen par exemple).

Cette partie du corrélogramme croisé correspond en effet au temps de concentration de la pluie efficace dans la formation aquifère (le temps qui s'écoule entre un événement de pluie efficace et le maximum atteint par le niveau piézométrique). Cette technique d'optimisation permet d'obtenir la meilleure corrélation possible entre la combinaison des pluies proposée et les variations piézométriques. Notons que seule la branche croissante du corrélogramme croisé est utilisée dans le processus d'optimisation car elle est le reflet direct de la recharge, la suite du corrélogramme traduisant la vidange de la nappe.

MES 3201	0.14*Chartres+0.29*Amiens+0.57*Senlis
MES 3202	0.20* Amiens+0.80*Senlis
MES 3203	0.47*Amiens+0.53*Senlis
MES 3204	0.47*Amiens+0.53*Senlis
MES 3211	0.25*Chartres+0.25*Amiens+0.50*Senlis
MES 3212	0.25*Chartres+0.25*Amiens+0.50*Senlis

Tabl. 1 – Pluies optimales appliquées aux différentes masses d'eau.

Les données d'ETP ont généralement peu d'influence sur les modèles pluie/Niveau piézométrique. C'est l'ETP mesurée à Chartres qui sera utilisée systématiquement dans les différents modèles.

2.3. PRESELECTION DES PIEZOMETRES

Les données piézométriques sont extraites de la banque de données piézométriques du bassin Seine-Normandie (<http://seine-normandie.brgm.fr/accueil.dbc>) gérée par le brgm.

Une première analyse des séries piézométriques a permis de faire une présélection de piézomètres. Le tabl. 2 dresse la liste des ouvrages considérés.

Masse d'eau	Piézomètres potentiels	
	Commune	Indice BSS
CRAIE DU VEXIN NORMAND ET PICARD - 3201	Farceaux	01252X0011
	Catenay	00777X0008
	Le Héron	01004X0003
CRAIE ALTEREE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE - 3202	Bosc-Bénard-Comin	01232X0002
	Montaure	01245X0010
	Les Trois Pierres	00755X0006
	Bois d'Ennebourg	01003X0008
CRAIE ALTEREE DU LITTORAL CAUCHOIS - 3203	Hattenville	00753X0030
	Veauville-les-Quelles	00578X0002
	Ermenouville	00581X0015
	Tocqueville-en-Caux	00583X0005
CRAIE DES BASSINS VERSANTS DE L'EAULNE, BETHUNE... - 3204	Rocquemont	00773X0002
	Aumale	00604X0224
	Criquières	00608X0206
	Realcamp	00603X0003
CRAIE ALTEREE DU NEUBOURG - 3211	Moisville	01805X0036
	St-André-de-l'eure	01803X0004
	Graveron-Semerville	01493X0001
CRAIE DU LIEUVIN-OCHE - 3212	Goupillières	01491X0009
	Fourmetot	00987X0009
	Lieurey	01227X0038
	Saint-Maclou	00985X0040

Tabl. 2 – Liste des piézomètres ayant été analysés pour chacune des masses d'eau.

Certains piézomètres ne peuvent pas en effet être utilisés, soit parce qu'ils sont trop influencés par les pompes soit parce que les séries sont trop courtes. D'autres piézomètres ont été rejetés car, probablement en raison de l'hétérogénéité de l'aquifère de la craie (variation de l'emménagement avec la profondeur), la série chronologique ne peut être modélisée avec une précision suffisante à partir d'un modèle de transfert recharge/niveau (ou d'un processus autorégressif). Lorsque plusieurs piézomètres voisins expriment sensiblement les mêmes variations, un seul d'entre eux est retenu (problème de redondance).

Les différents calages obtenus sont représentés sur les figures qui suivent. Il est à noter que l'analyse n'a pas été réalisée pour les piézomètres de Bosc-Bénard-Comin, Ermenouville et Saint-André de l'Eure en raison de chroniques piézométriques trop courtes.

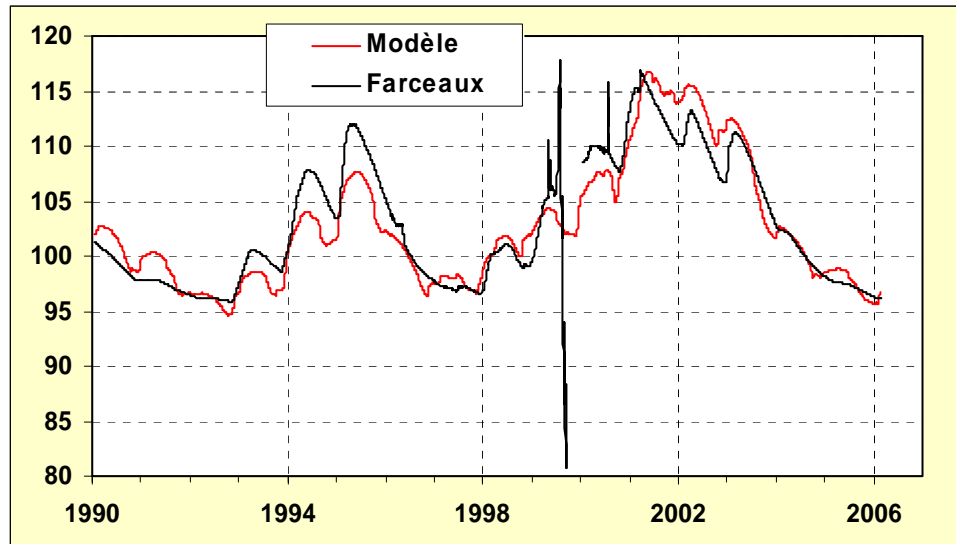


Fig. 4 – Farceaux : retenu pour la prévision.

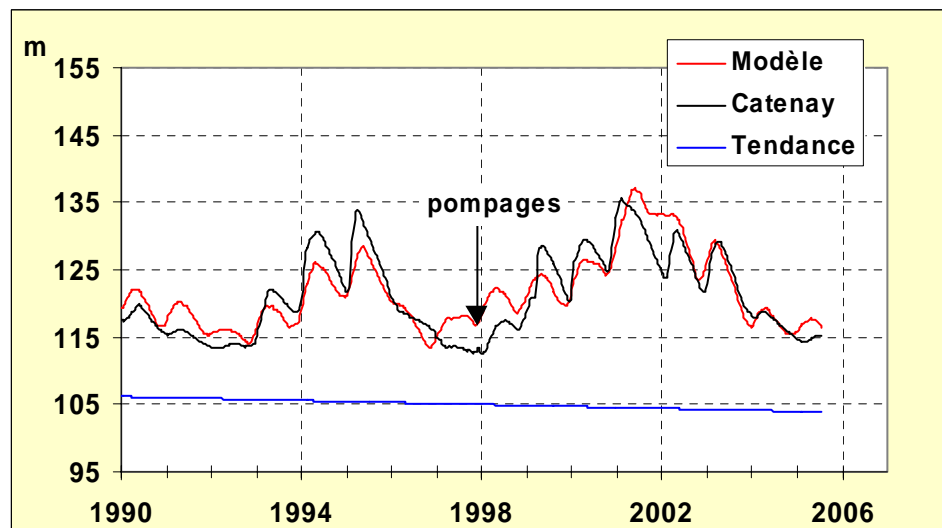


Fig. 5 – Catenay : ne convient pas pour la prévision en raison de l'influence des pompages (tendance à la baisse).

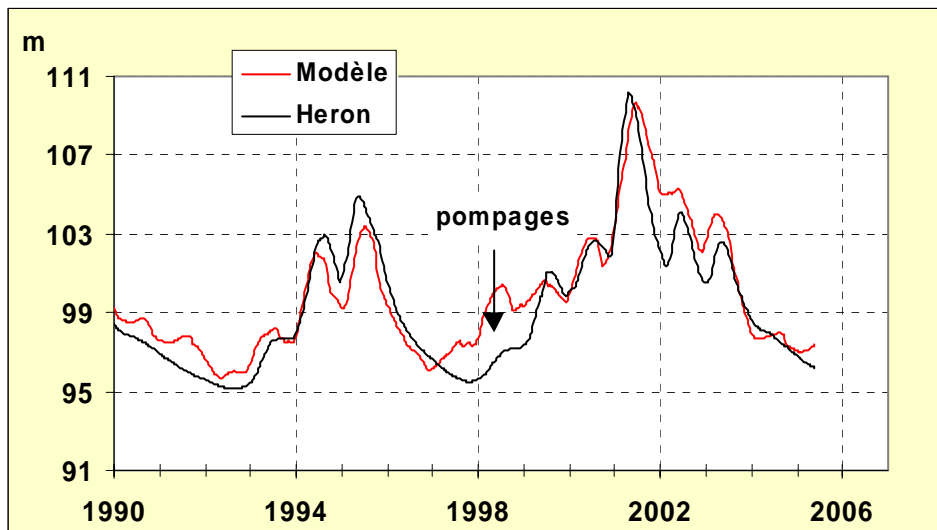


Fig. 6 – Le Héron : influencé par les pompages en années déficitaires.

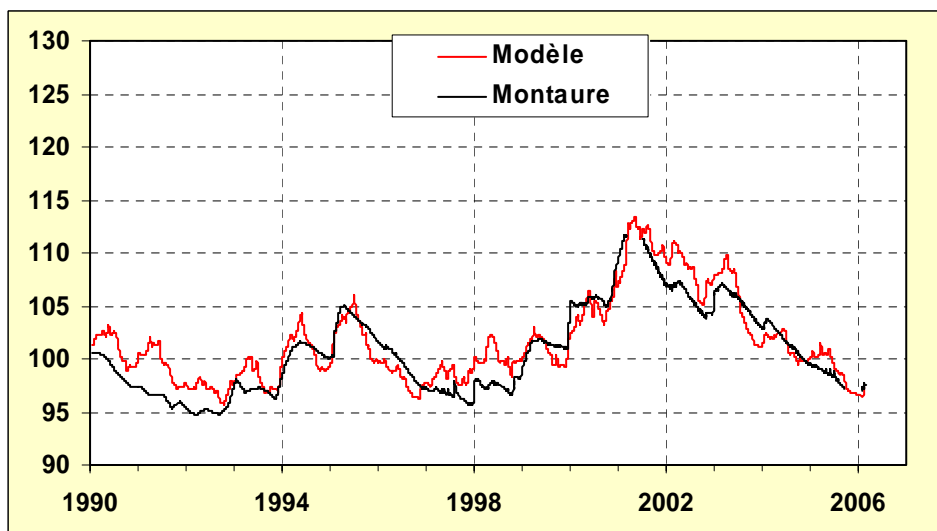


Fig. 7 – Montaure : retenu pour la prévision.

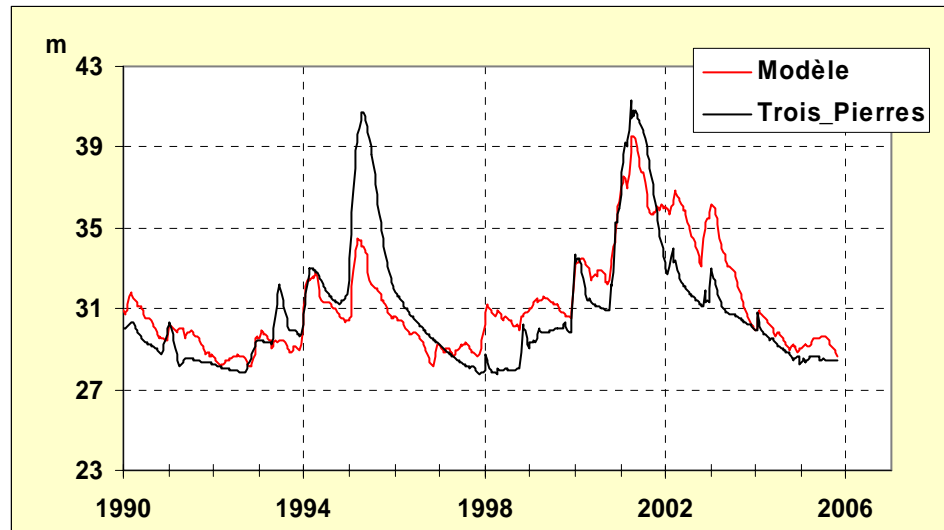


Fig. 8 – Les Trois Pierres : aquifère hétérogène, ne convient pas pour la prévision.

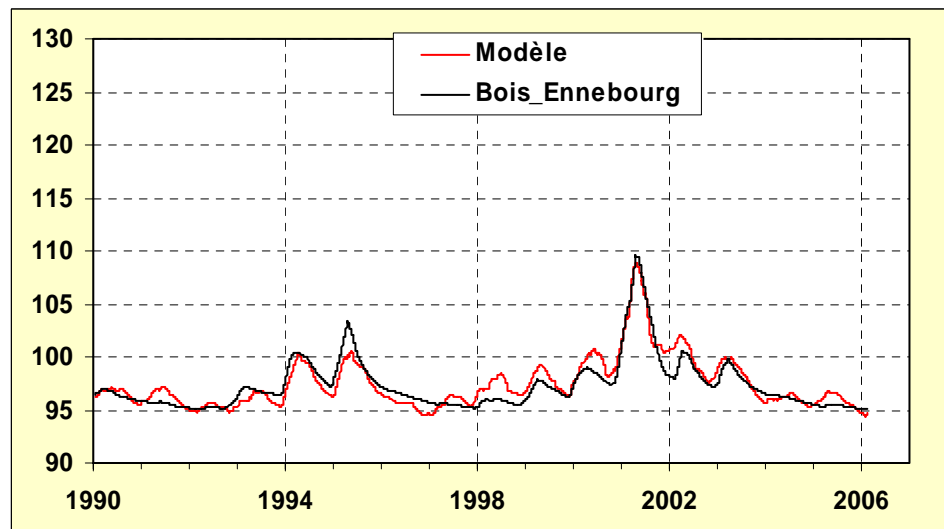


Fig. 9 – Bois d'Ennebourg : retenu pour la prévision.

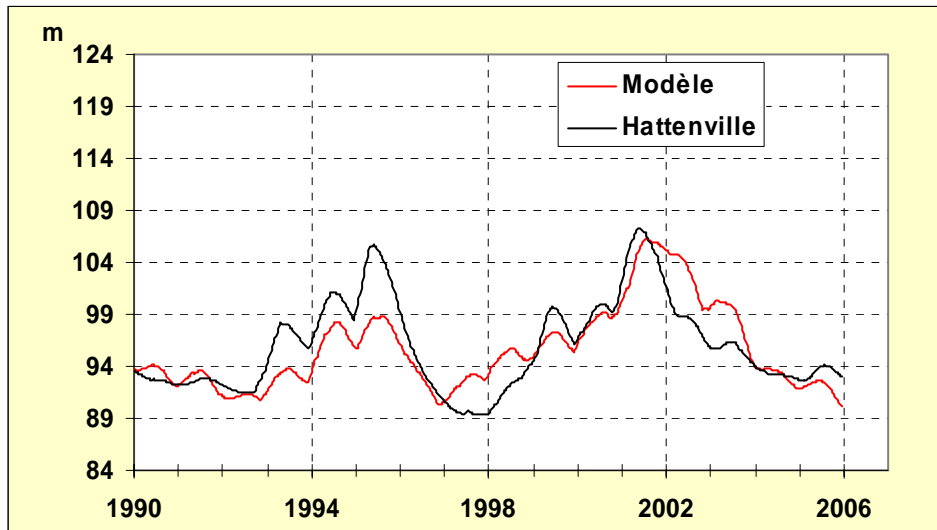


Fig. 10 – Hattenville : aquifère hétérogène, ne convient pas pour la prévision (la crue de 2001 est sensiblement au même niveau que celle de 1995 alors que la lame d'eau est plus importante en 2001 qu'elle n'est en 1995, ce qui laisse supposer que la partie supérieure de l'aquifère possède un coefficient d'emmagasinement supérieur à celui de sa partie inférieure).

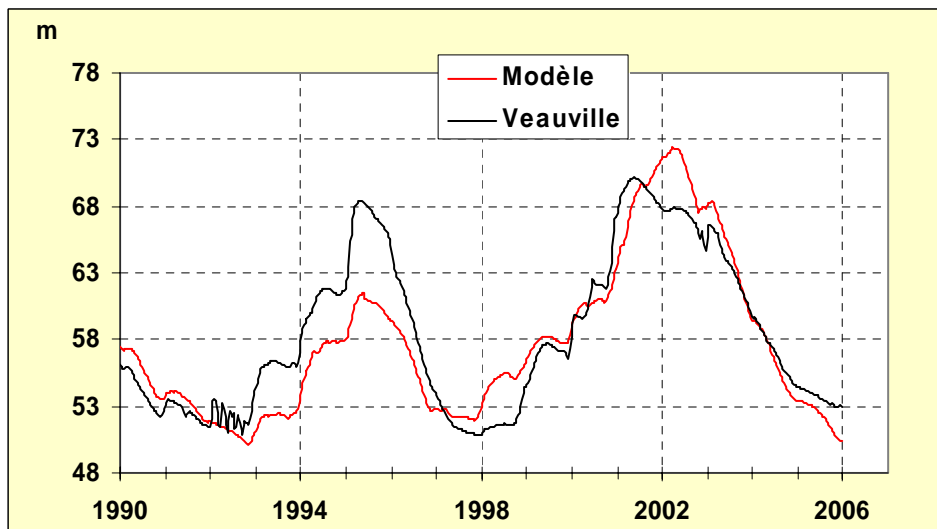


Fig. 11 – Veauville-les-Quelles : aquifère hétérogène, ne convient pas pour la prévision

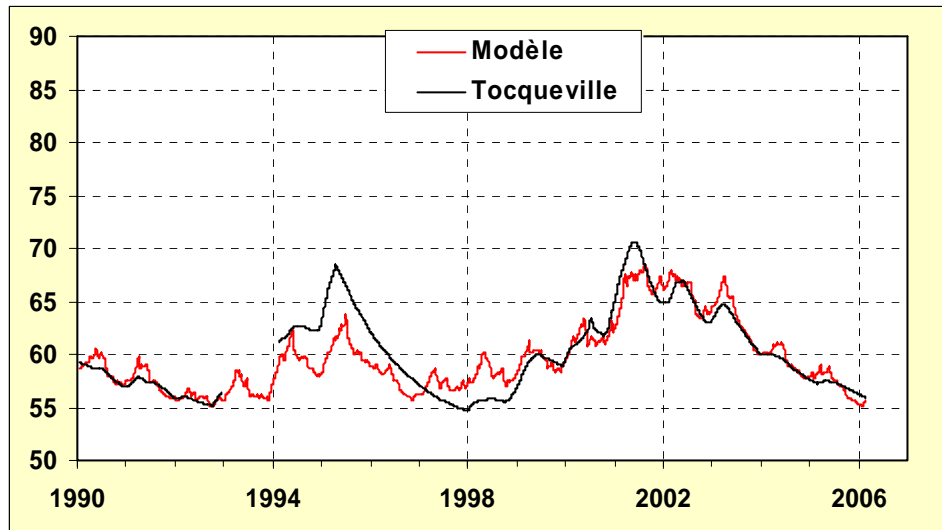


Fig. 12 – Tocqueville-en-Caux : retenu pour la prévision.

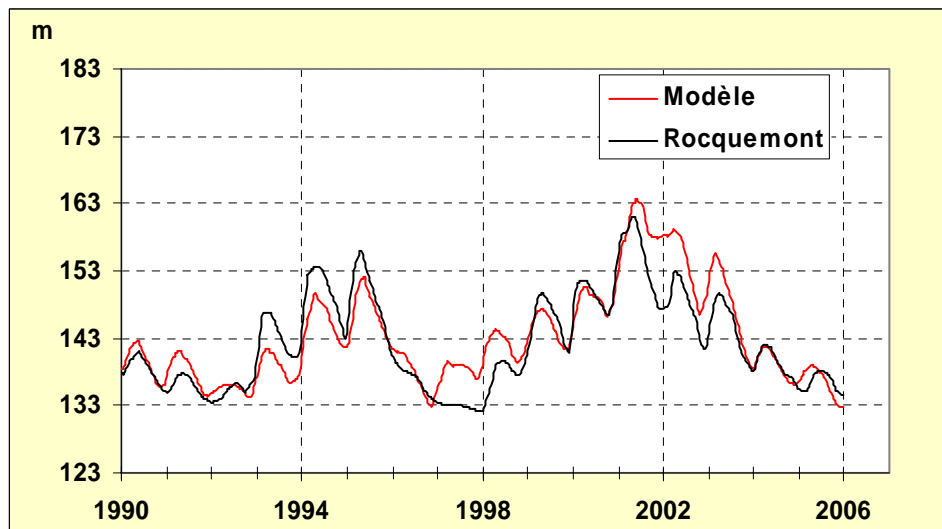


Fig. 13 – Rocquemont : redondance avec Criquiers.

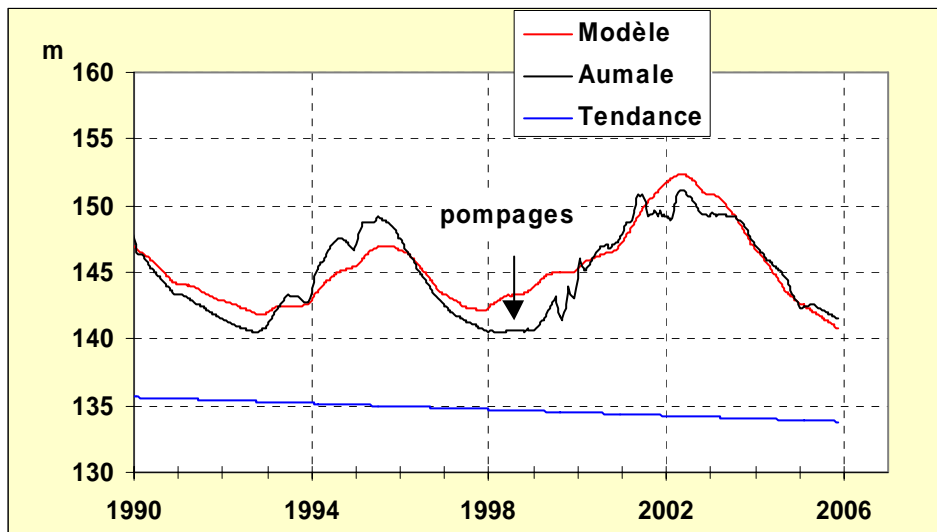


Fig. 14 – Aumale : piézomètre influencé (tendance à la baisse), ne convient pas pour la prévision.

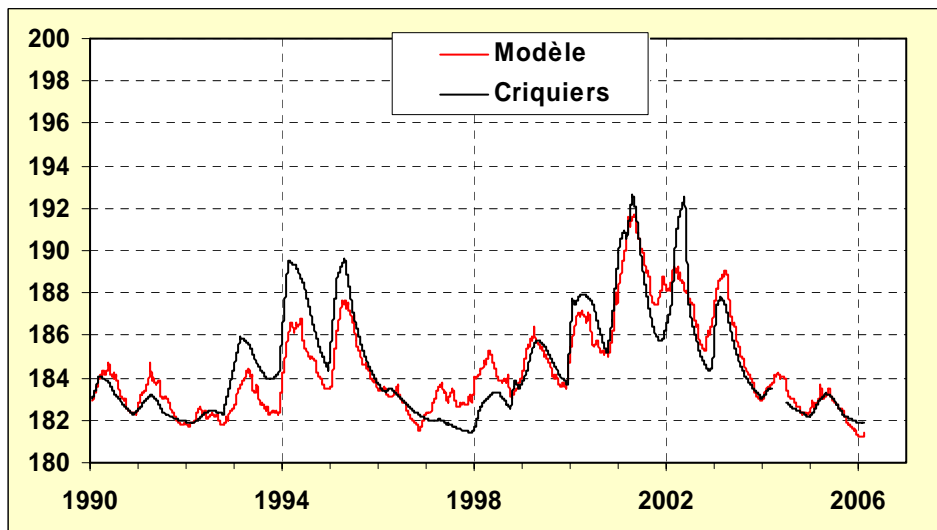


Fig. 15 – Criquiers : retenu pour la prévision.

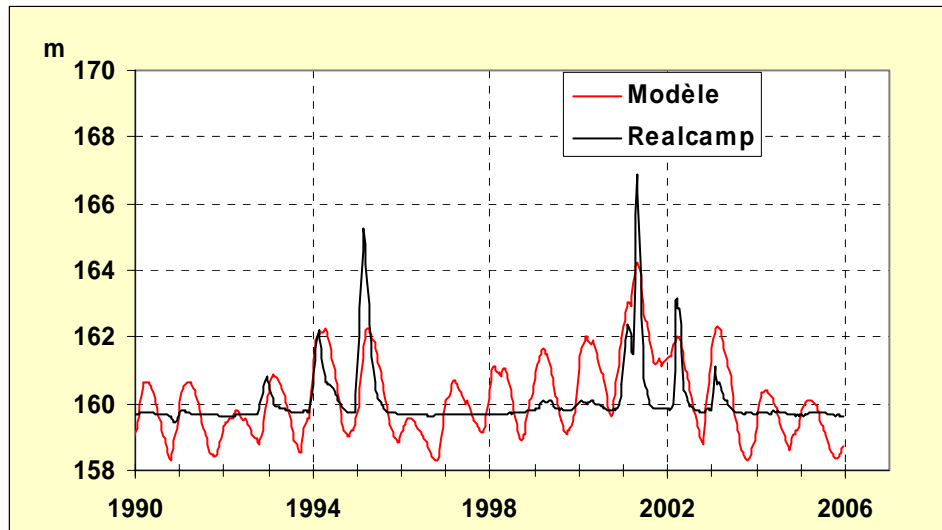


Fig. 16 – Realcamp : fonctionnement en 'tout ou rien' en raison de la triple porosité de la craie (comportement karstique ?), ne convient pas pour la prévision.

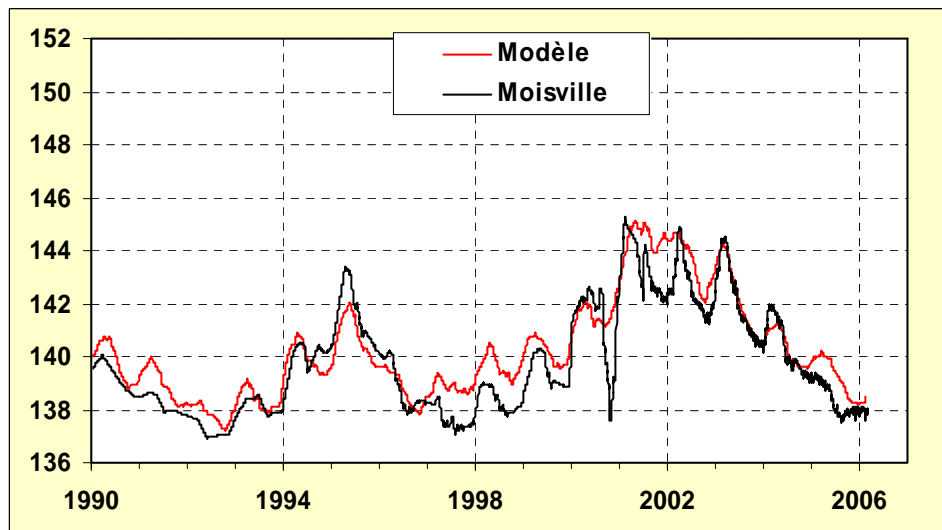


Fig. 17 – Moisville : retenu pour la prévision.

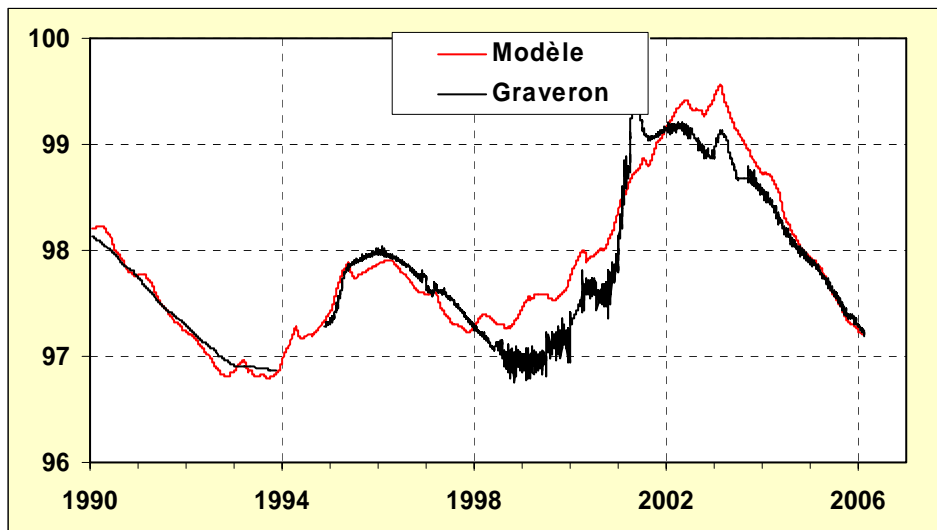


Fig. 18 – Graveron-Semerville : retenu pour la prévision.

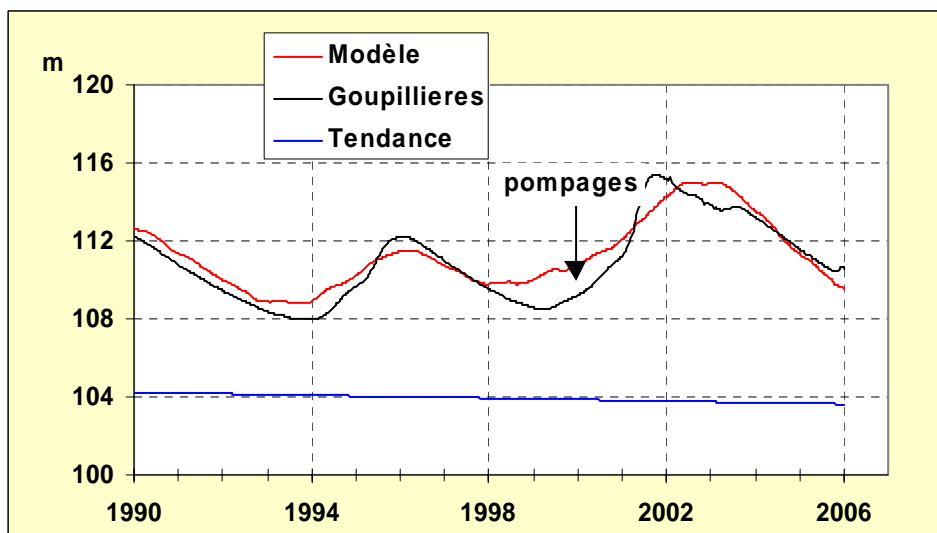


Fig. 19 – Goupillières : influencé par les pompages (tendance à la baisse), ne convient pas pour la prévision.

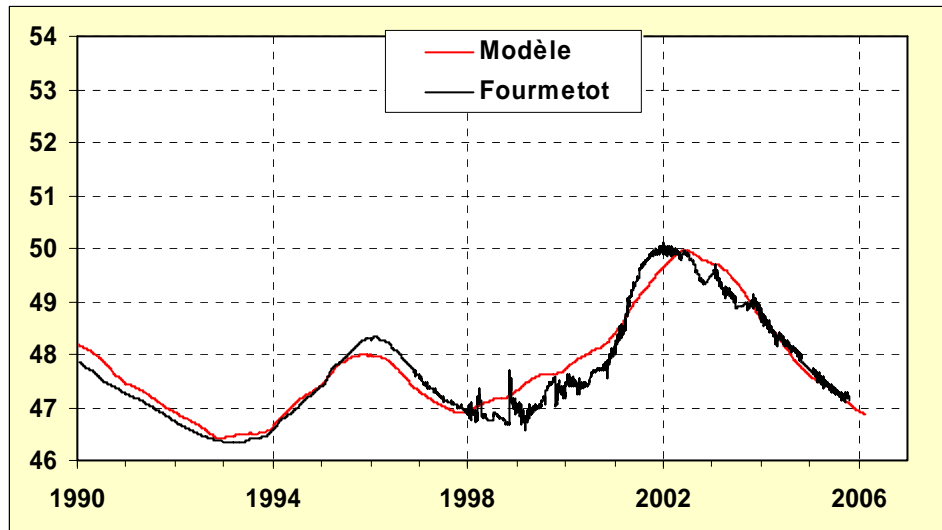


Fig. 20 – Fourmetot : retenu pour la prévision.

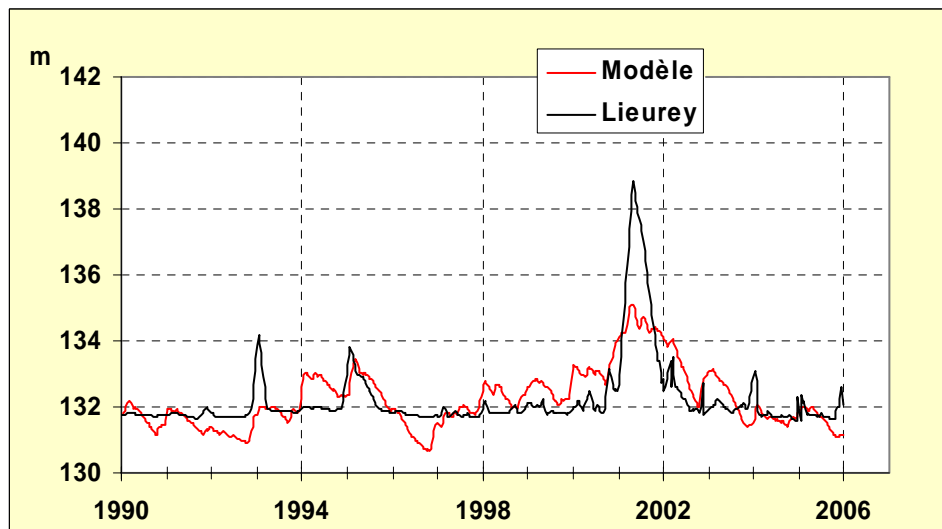


Fig. 21 – Lieurey : un niveau de base semble être imposé par la nappe de l'Albien sous-jacente, ne convient pas pour la prévision.

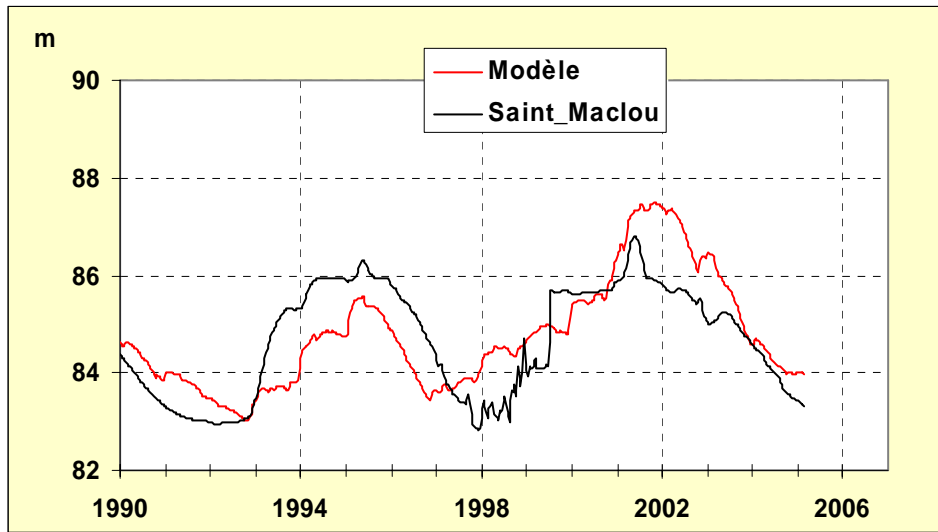


Fig. 22 – Saint Maclou : aquifère hétérogène, ne convient pas pour les prévisions.

3. Prévisions à court et long termes

Une fois les modèles calés, leur exploitation pour l'élaboration de la prévision des niveaux piézométriques est réalisée à partir d'une date donnée (la date d'émission) et pour une durée déterminée. Cette exploitation se fait sous environnement Excel (mode opératoire décrit en annexe 1). Cet environnement, d'utilisation simple, permet de charger les données provenant des différentes bases de données (pluies, ETP, niveaux piézométriques), puis d'archiver les résultats des analyses statistiques ainsi que des prévisions.

3.1. PRINCIPE

Les simulations prévisionnelles consistent à générer de très nombreuses séquences de pluie et d'ETP (plusieurs centaines) et à faire une analyse statistique des variables "en sortie", c'est-à-dire ici les niveaux de nappes.

Le générateur de pluies (ou d'ETP) permet de créer une séquence stochastique de pluie (ou d'ETP) respectant un certain nombre de conditions déduites de l'analyse des séquences de pluies (ou d'ETP) observées.

Pour chaque réalisation de pluies et d'ETP, le logiciel simule une séquence de niveaux par l'intermédiaire :

- d'une méthode utilisant les fonctions de transfert calculées dans la phase de calage ;
- ou bien d'un processus autorégressif (les prévisions tiennent compte du passé récent et peuvent éventuellement intégrer des prévisions météorologiques).

Les niveaux obtenus à partir de toutes les simulations sont ensuite classés par ordre croissant pour chaque pas de temps (décade) ; sur chacun de ces intervalles de temps. Ce classement permet de définir différents quantiles correspondant à une certaine probabilité d'occurrence pour chaque intervalle de temps (une probabilité de non dépassement). De cette probabilité est déduite la période de retour correspondante.

Si F est la probabilité de non dépassement, déduite de la fonction de répartition, on définira une période de retour par :

$$T = \frac{1}{1 - P(X < x)} \quad \text{si } P > 0.5$$

$$T = \frac{1}{P(X < x)} \quad \text{si } P < 0.5$$

3.2. L'ENVIRONNEMENT EXCEL

Il se présente sous la forme d'un classeur EXCEL qui comporte les feuilles :

- « Prévision » (Fig. 23) destinée aux mises à jour de la base de données et à l'exécution de la prévision selon les différents paramètres affichés (Fig. 24 et Fig. 25) ;
- « Graphiques » (Fig. 26) où chacun des piézomètres est représenté : observations du niveau piézométrique, modèle et prévision sous la forme de quantiles ;
- « Données » qui constitue la base de données **au pas journalier** (pluie aux différentes stations, ETP, niveaux piézométriques).

Les liens associés aux différents graphiques se trouvent sur les feuilles « Previ_1 », « Previ_2 »,... (légendes, séries).

La prévision est réalisée à la fois à court et long terme :

- **la prévision à court terme est conditionnelle** (partant de la dernière observation). C'est la prévision des niveaux piézométriques à partir d'un état donné observé (date d'émission de la prévision) pour une période donnée (durée de la prévision) ;
- **la prévision à long terme est non conditionnelle (analyse des périodes de retour)**. Pour cela, la période de prévision doit débuter plusieurs années après la date d'émission de la prévision de manière à rendre la prévision indépendante de l'état initial du système.

Ces deux types de prévision sont réalisés simultanément de manière à déterminer la portée de la prévision, c'est-à-dire la durée au-delà de laquelle les prévisions à court et long termes se confondent. Au-delà de la portée de la prévision, le système a perdu la mémoire des conditions initiales et la prévision devient indépendante de la date d'émission. Dans le cas de la prévision de niveaux piézométriques, la portée de la prévision est directement reliée au temps de transit du système. Le temps de transit moyen est de l'ordre de un à deux ans pour ce qui concerne la composante lente (Tabl. 3).

La portée de la prévision est fonction de la date d'émission : elle est maximale à la fin du printemps (les pluies d'été sont peu efficaces et influent donc peu sur la prévision) et minimale en automne, lorsque les pluies redeviennent efficaces (la prédictibilité est donc moins bonne).

	Temps de transit moyen	
	comp. Rapide (jours)	comp. Lente (jours)
Farceaux	116	456
Montaure	113	493
Bois d'Ennebourg	59	392
Tocqueville	66	454
Criquiers	59	373
Moisville	73	498
Graveron	73	732
Fourmetot	61	656

Tabl. 3 – Le temps de transit moyen (jours) correspondant aux composantes lente et rapide des différents piézomètres retenus pour la prévision.

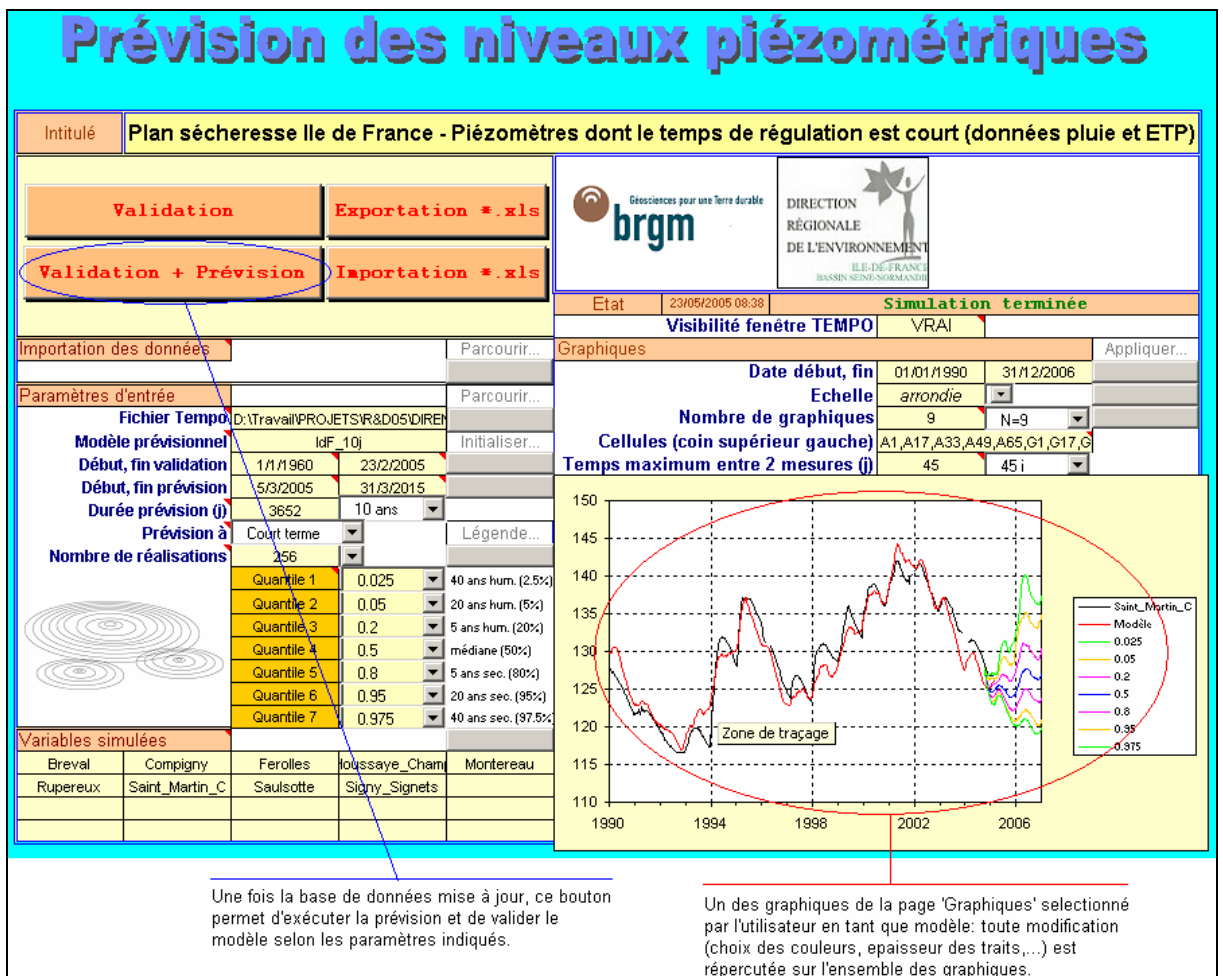


Fig. 23 – Feuille « Prévision » du classeur EXCEL.

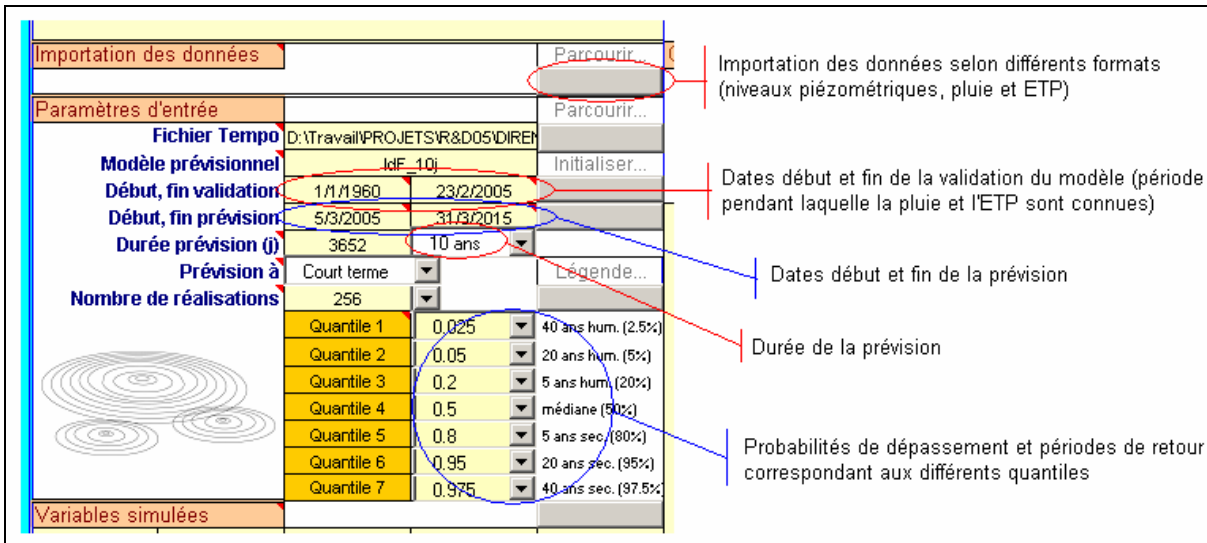


Fig. 24 – Les différents paramètres de la prévision.

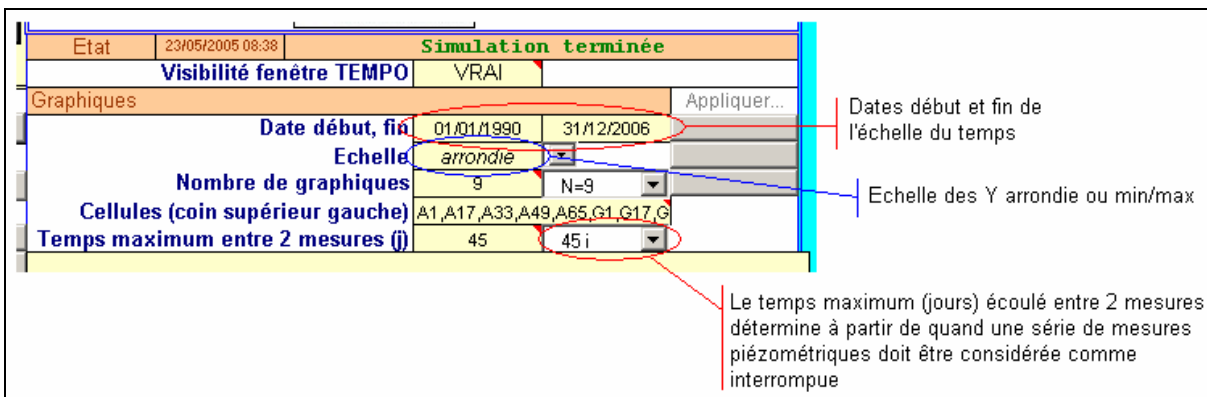


Fig. 25 – Les différents paramètres de la représentation graphique.

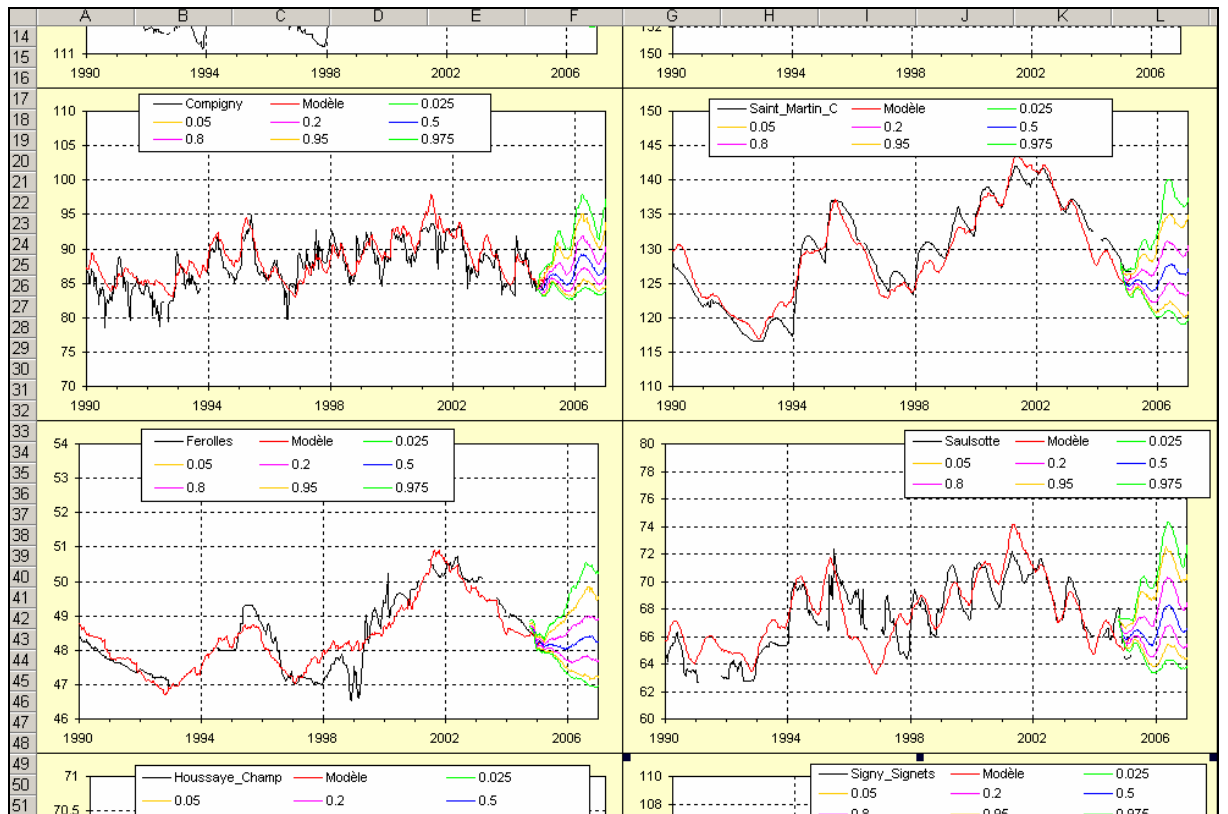


Fig. 26 – La feuille « Graphiques » représente l'ensemble des piézomètres associés à un modèle prévisionnel.

3.3. LA PREVISION A COURT ET LONG TERMES PORTANT SUR LES PIEZOMETRES REPRESENTATIFS DES DIFFERENTES MASSES D'EAU

Le modèle de prévision au sens probabiliste du terme permet, à partir d'une situation hydrogéologique donnée (par exemple le niveau piézométrique à fin avril, période à laquelle, en général, l'essentiel de la recharge des aquifères a eu lieu = date d'émission de la prévision), d'émettre pour les n mois à venir (par exemple 7 mois de mai à novembre = durée de la prévision) une prévision des niveaux, c'est-à-dire là encore une représentation du niveau piézométrique qui a p chances sur 100 d'être dépassé (ou 1-p chances sur 100 de ne pas être dépassé), p étant fixé par l'utilisateur. Les quantiles doivent être remis à jour périodiquement pour prendre en compte la situation hydrogéologique concrète du bassin (les fréquences qui interviennent sont conditionnelles car elles dépendent de l'état initial). La prévision des niveaux piézométriques s'affinera au cours du temps jusqu'à conduire, pendant la période d'étiage, à un résultat quasi-déterministe.

Dans les paragraphes qui suivent, la prévision à court et long termes est présentée pour chacun des piézomètres modélisés, ce type de représentation permettant très rapidement d'apprécier l'état de la nappe. La prévision est réalisée à partir du 1/3/2006, date de la dernière mise à jour des données.

Le nombre de réalisations est fixé à 256.

7 quantiles sont définis, correspondant aux fréquences de dépassement et aux périodes de retour suivantes:

- 1 % : période de retour de 100 ans (année humide) ;
- 5 % : période de retour de 20 ans (année humide) ;
- 20 % : période de retour de 5 ans (année humide) ;
- 50 % : médiane ;
- 80 % : période de retour de 5 ans (année sèche) ;
- 95% : période de retour de 20 ans (année sèche) ;
- 99% : période de retour de 100 ans (année sèche).

Mais ce choix est arbitraire et peut être modifié à tout moment par l'utilisateur (Fig. 24). La prévision à court et long terme est représentée sur les figures qui suivent pour chacun des piézomètres sélectionnés. En ce qui concerne les prévisions à long terme, les périodes de retour des niveaux piézométriques sont calculées sur des niveaux non influencés, d'où certaines divergences apparentes avec les observations.

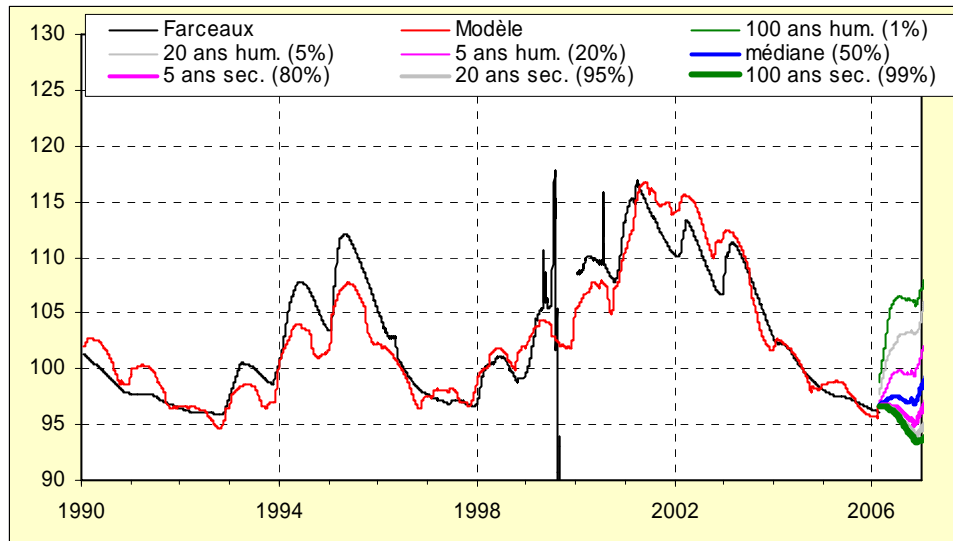


Fig. 27 – Farceaux (MES 3201) : Prévission à court terme.

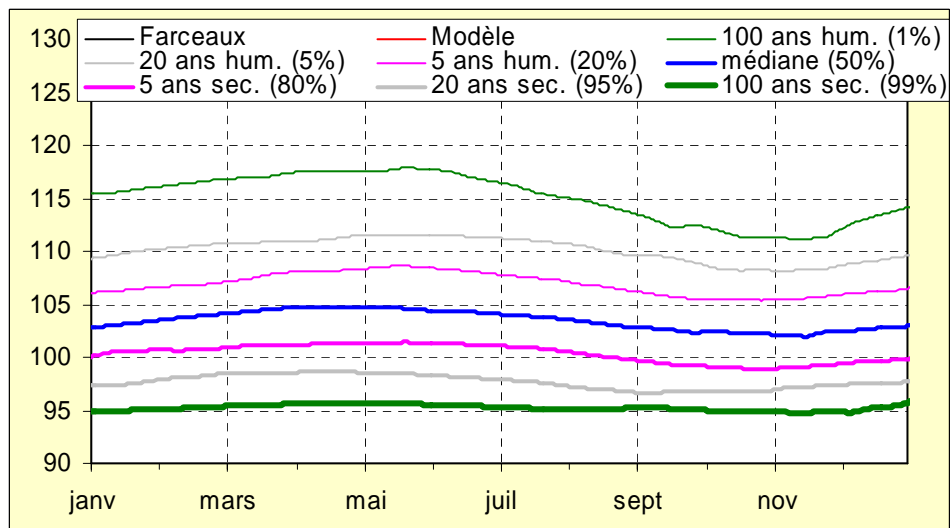


Fig. 28 – Farceaux (MES 3201) : Prévission à long terme.

Piézomètre Farceaux : niveau médian prévu pendant l'étiage 2006 correspondant à une période de retour de 20 ans sec (peu de recharge au cours de l'hiver 2006).

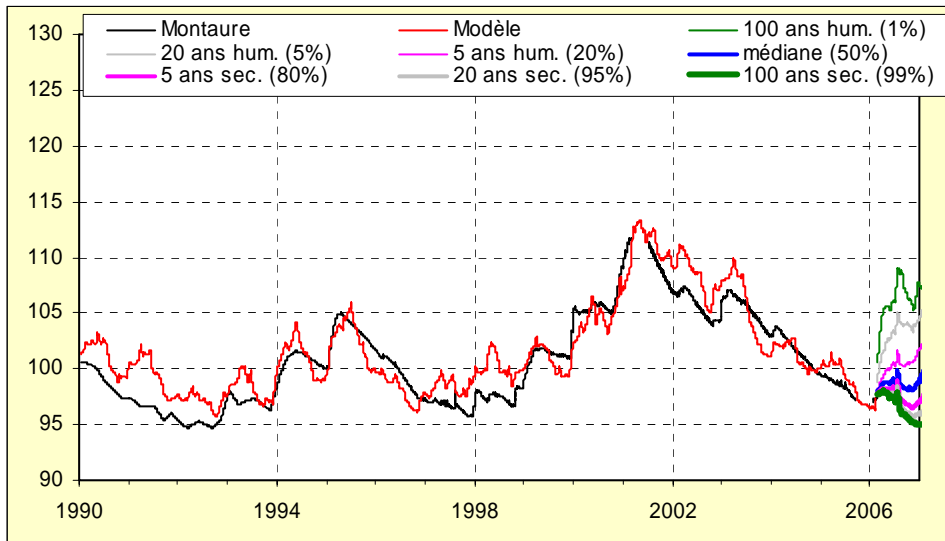


Fig.29 – Montaire (MES 3202) : Prévision à court terme.

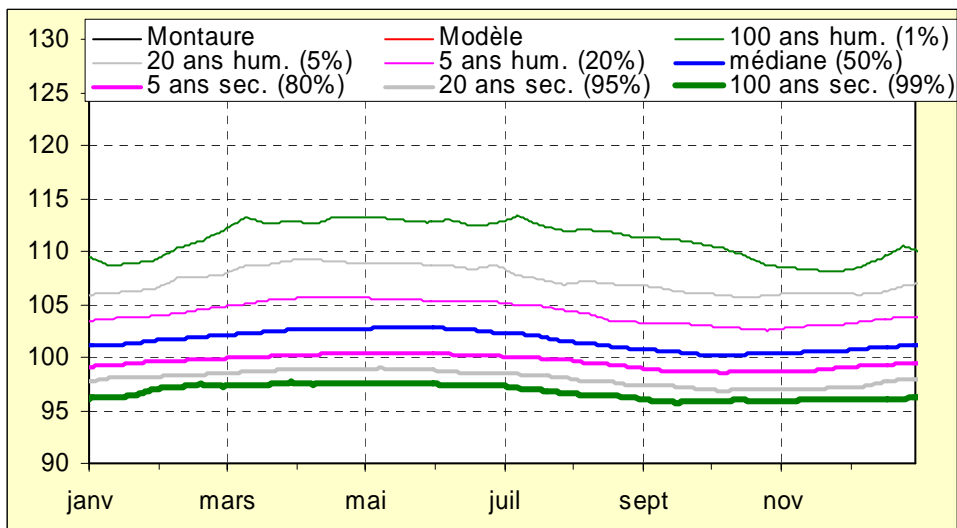


Fig. 30 – Montaire (MES 3202) : Prévision à long terme.

Piézomètre Montaire : niveau médian prévu pendant l'étiage 2006 correspondant à une période de retour de 20 ans sec (peu de recharge au cours de l'hiver 2006).

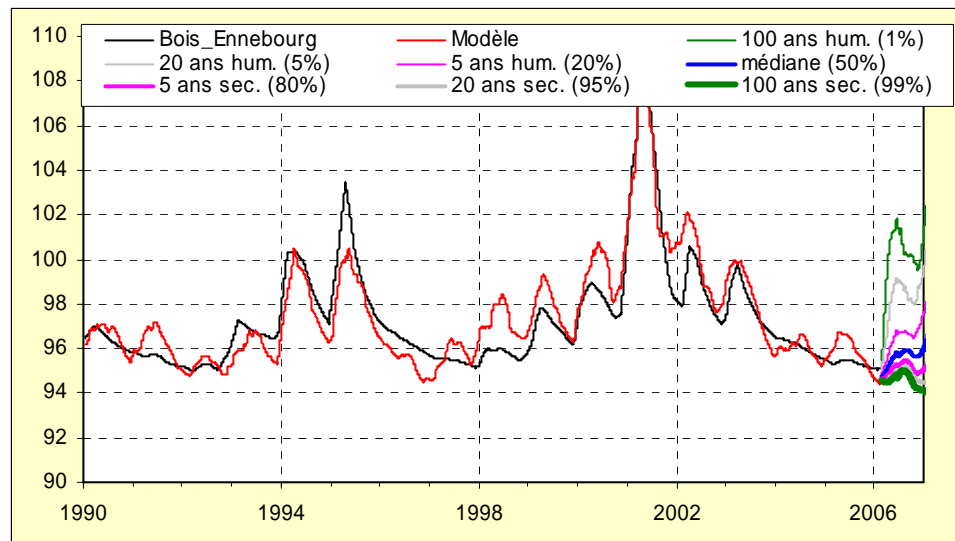


Fig. 31 – Bois d'Ennebourg (MES 3202) : Prévision à court terme.

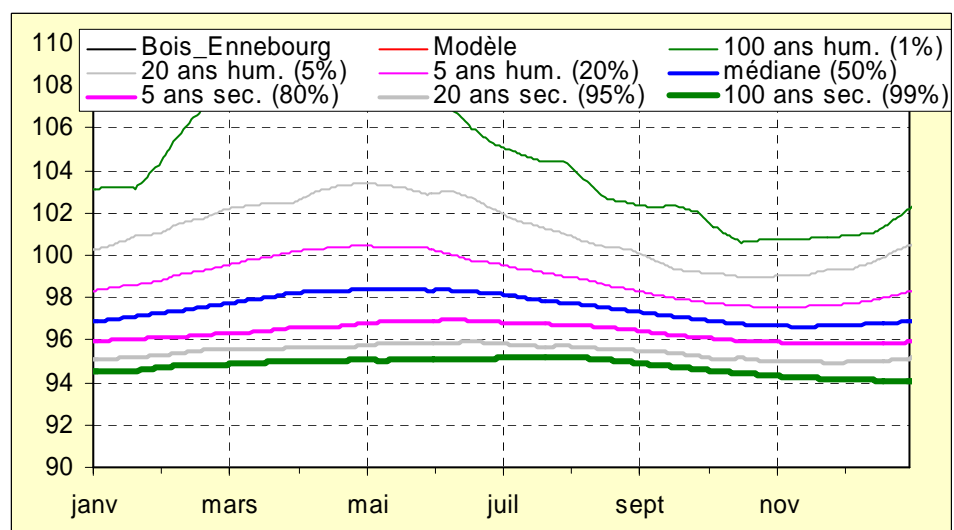


Fig. 32 – Bois d'Ennebourg (MES 3202) : Prévision à long terme.

Piézomètre Bois d'Ennebourg : niveau médian prévu pendant l'étiage 2006 correspondant à une période de retour de 5 ans sec.

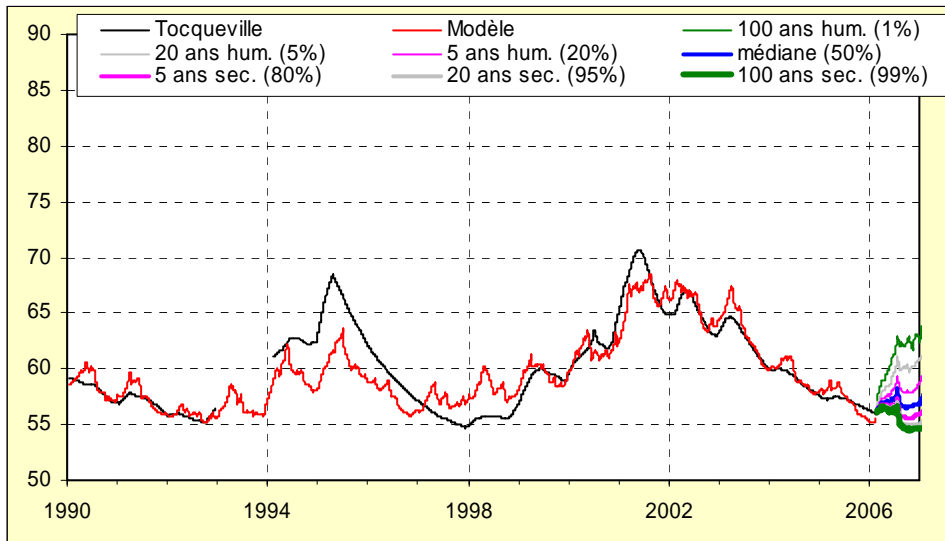


Fig. 33 – Tocqueville en Caux (MES 3203) : Prévision à court terme

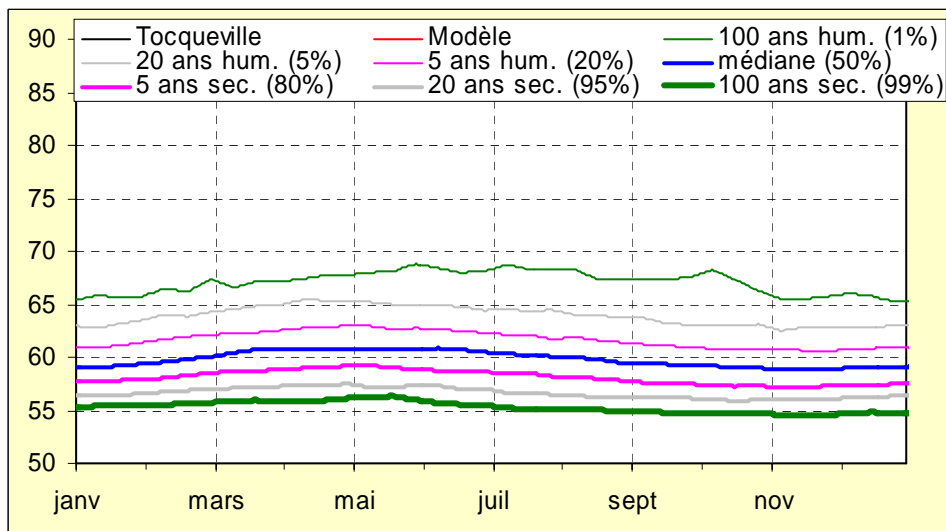


Fig. 34 – Tocqueville en Caux (MES 3203) : Prévision à long terme

Piézomètre Tocqueville en Caux : niveau médian prévu pendant l'été 2006 correspondant à une période de retour de 20 ans sec (peu de recharge en 2006).

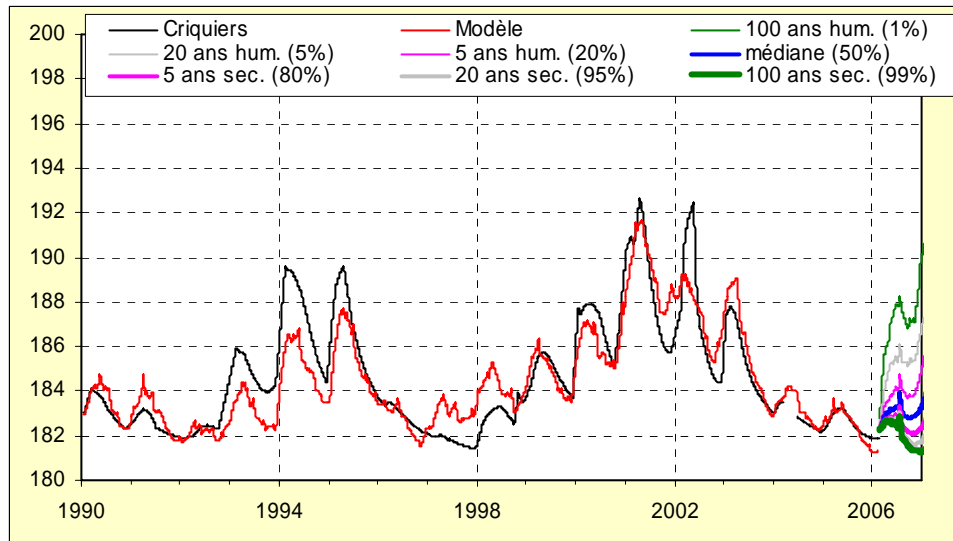


Fig. 35 – Criqueurs (MES 3204) : Prévision à court terme

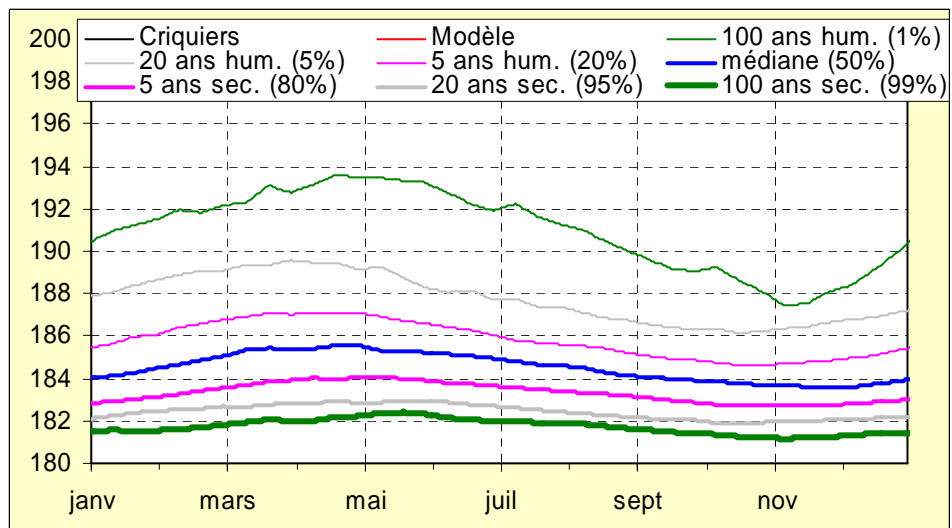


Fig. 36 – Criqueurs (MES 3204) : Prévision à long terme

Piézomètre Criqueurs : niveau médian prévu pendant l'étiage 2006 correspondant à une période de retour de 5 ans sec.

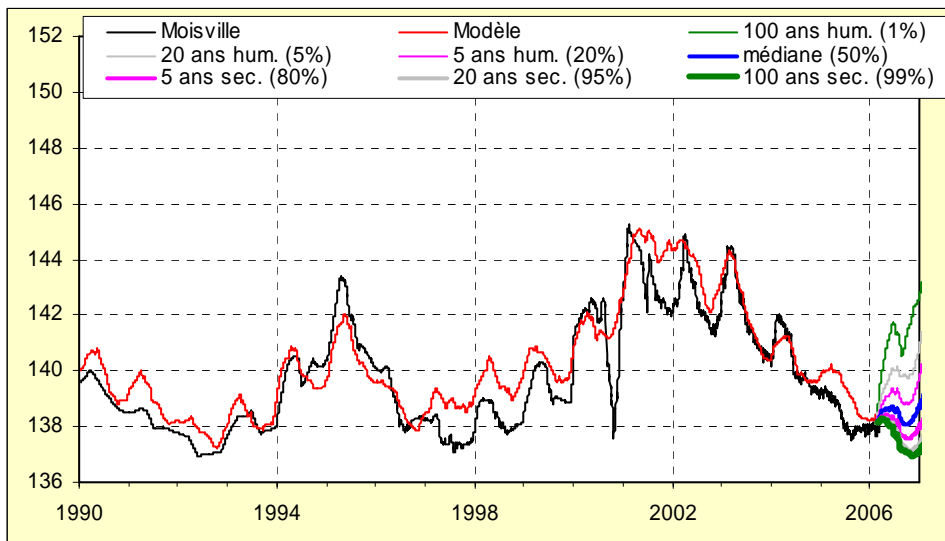


Fig. 37 – Moisville (MES 3211) : Prévision à court terme

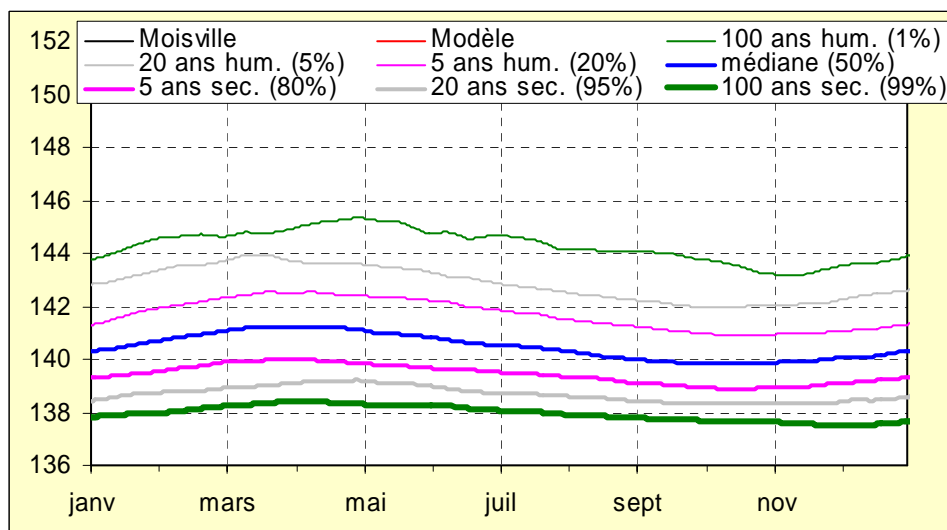


Fig. 38 – Moisville (MES 3211) : Prévision à long terme

Piézomètre Moisville : niveau médian prévu pendant l'été 2006 correspondant à une période de retour supérieure à 20 ans sec (absence de recharge en 2006).

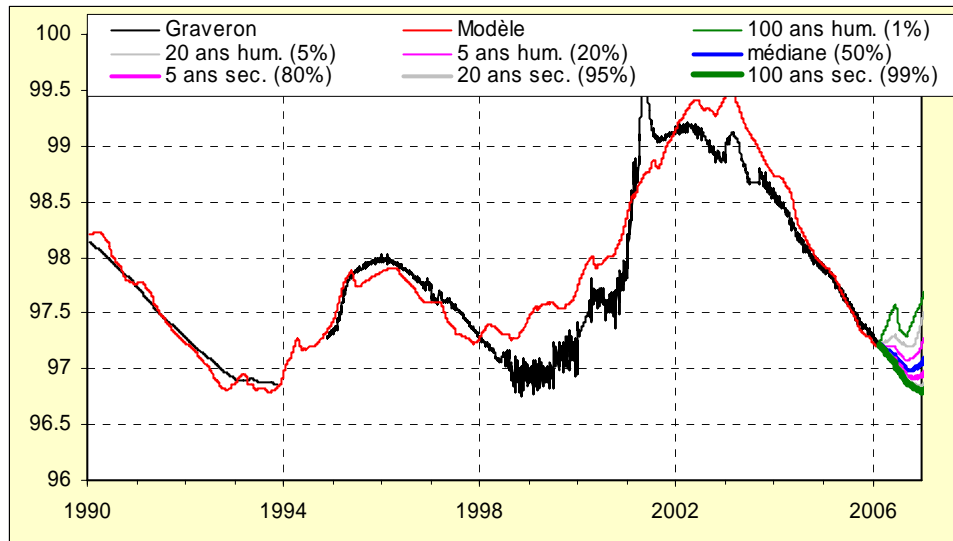


Fig. 39 – Graveron-Semerville (MES 3211) : Prévision à court terme

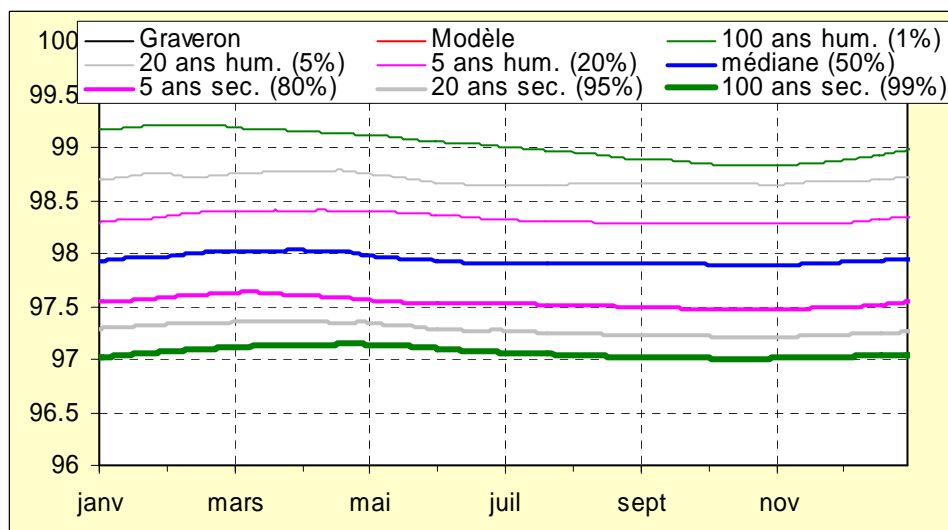


Fig. 40 - Graveron-Semerville (MES 3211) : Prévision à long terme

Piézomètre Graveron-Semerville : niveau médian prévu pendant l'étiage 2006 correspondant à une période de retour de 100 ans sec (absence de recharge en 2006 en raison du temps de transit moyen au travers de la zone non saturée de plusieurs années). Ici, le résultat sur la période de retour (100 ans sec) est donné à titre indicatif car il est extrapolé (la longueur de la chronique ne permet pas ici un calcul précis).

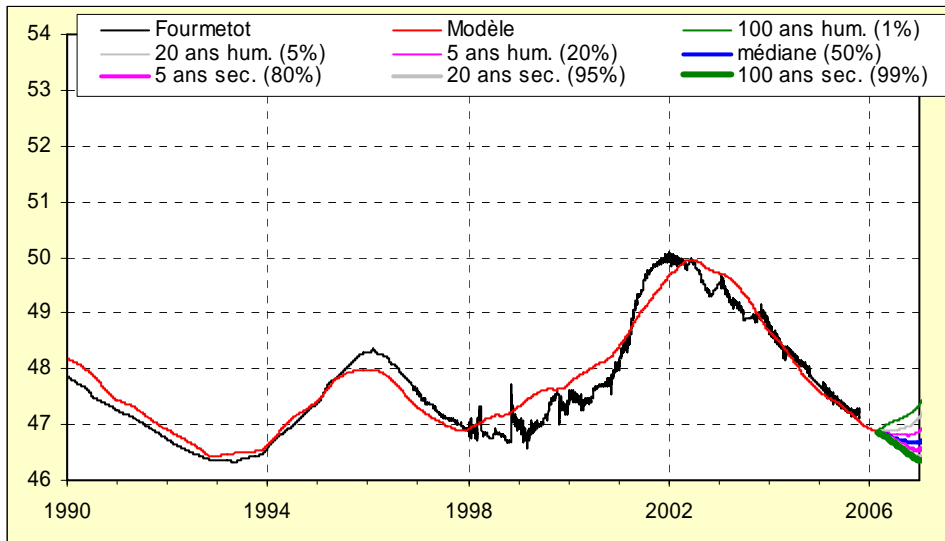


Fig. 41 – Fourmetot (MES 3212) : Prévision à court terme

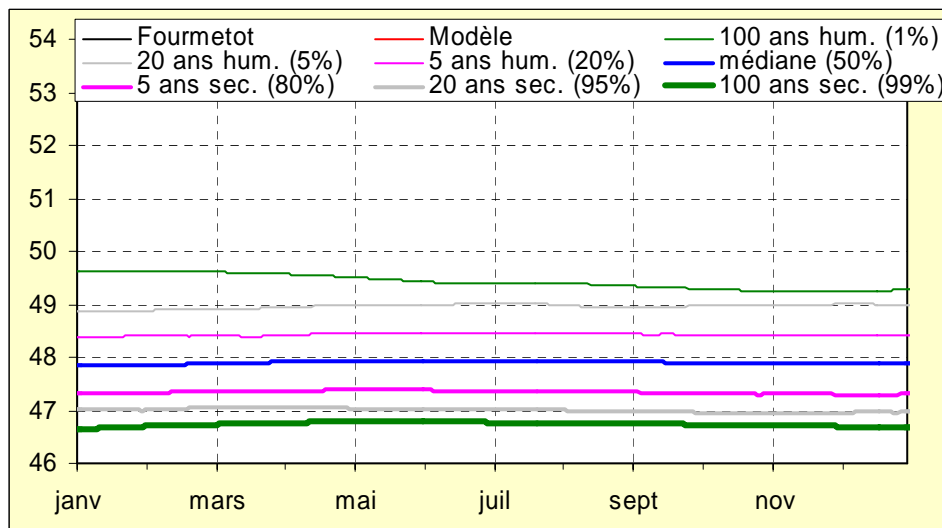


Fig. 42 – Fourmetot (MES 3212) : Prévision à long terme

Piézomètre Fourmetot : niveau médian prévu pendant l'été 2006 correspondant à une période de retour de 100 ans sec (absence de recharge en 2006 en raison du temps de transit moyen au travers de la zone non saturée de plusieurs années). Dans le cas de Fourmetot, le résultat sur la période de retour est également donné à titre indicatif.

4. Conclusions

Cette étude a permis de mettre en évidence les critères applicables aux différents piézomètres pour la prévision de l'état de recharge des différentes masses d'eau.

Les modèles prévisionnels utilisés dans le cadre de cette étude reposent sur deux principes :

- les modèles pluie – niveaux sont des processus autorégressifs qui s'appuient non seulement sur les chroniques de pluie et d'ETP mais également sur le niveau observé. Ces processus permettent d'établir la continuité entre le niveau observé et le niveau prévu, même si ce niveau observé est temporairement influencé. D'autre part, ils minimisent les erreurs d'estimation des différents quantiles, ce gain de précision étant surtout sensible pour les périodes de retour élevées. Enfin, le très petit nombre de degrés de liberté à partir desquels sont définis ces processus confère à la méthode prévisionnelle une grande robustesse. Sa pérennité est assurée tant que les conditions qui ont prévalu lors du calage des modèles sont conservées. Toute modification des prélèvements ayant une influence durable sur l'un des niveaux piézométriques devra conduire à un nouveau calage ;
- la prévision s'appuie sur une méthode stochastique visant à générer des séries de pluie, d'ETP et de niveaux piézométriques en nombre suffisant pour représenter les différents quantiles de manière fiable. Elle permet en outre d'automatiser la procédure de prévision en fonction des besoins concrets.

La méthode stochastique est également utilisée pour la prévision à long terme (prévision non conditionnelle) indépendamment des conditions initiales, de manière à représenter les niveaux piézométriques en fonction de la période de retour. Cette méthode est générale et s'applique quel que soit le temps de régulation de la nappe, contrairement aux méthodes statistiques classiques basées sur l'analyse des niveaux observés en considérant les années indépendamment les unes des autres.

Les modélisations réalisées ont démontré qu'un calage satisfaisant pouvait être obtenu pour les piézomètres de Farceaux, Montaure, Bois d'Ennebourg, Tocqueville-en-Caux, Rocquemont, Criquiers, Moisville, Graveron-Semerville et Fourmetot. A partir de ces calages, des prévisions des niveaux piézométriques à court et long termes ont, par conséquent, pu être élaborées. Des prévisions à court terme pourront, à l'avenir, être reproduites après simple mise à jour des données. Les chroniques piézométriques ainsi valorisées devraient aider à la gestion quantitative de l'aquifère crayeux en Haute-Normandie notamment en période d'étiage marqué. Dans ce but, l'outil de prévision développé par le brgm sous environnement EXCEL sera mis à la disposition de la DIREN Haute-Normandie.

L'outil de prévision est applicable pour d'autres objectifs faisant intervenir non seulement des niveaux piézométriques mais également des débits de cours d'eau

avec, éventuellement, leur mise en relation. Pour être opérationnel, tout modèle prévisionnel doit au préalable faire l'objet d'un calage, ce qui sous entend une critique des données, puis une validation.

5. Bibliographie

Pinault, J.-L., N. Amraoui, and C. Golaz (2005), Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes, *Water Resour. Res.*, 41, W05001, doi:10.1029/2004WR003169

Pinault, J.-L., N. Doerfliger, B. Ladouche, and M. Bakalowicz (2004), Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach: The saline springs of Thau, southern France, *Water Resour. Res.*, 40, W08501, doi:10.1029/2003WR002553.

Pinault J-L, Pauwels H. and Cann Ch., Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Application to nitrate transport and denitrification, *Water Res. Research*, 37 (8), pp 2179-2190, 2001.

Pinault J-L, Plagnes V, Aquilina L. and Bakalowicz M., Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of karst system functioning, *Water Res. Research*, 37 (8), pp 2191-2204, 2001.

Lachassagne P, Pinault J-L, Laporte P, Radon 222 emanometry: a relevant methodology for water well siting in hard rock aquifers, *Water Res. Research*, 37 (12), pp 3131-3148, 2001.

Pinault J-L, Baubron J-C, Signal processing of diurnal and semidiurnal variations in radon and atmospheric pressure: A new tool for accurate in situ measurement of soil gas velocity, pressure gradient, and tortuosity, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, N° B8, pp 18,101-18,120, 1997

Pinault J-L, Baubron J-C, Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture and soil temperature data: A new approach for radon concentration modelling, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, N° B2, pp 3157-3171, 1996

Annexe 1

Mode opératoire de l'outil de prévision

Il est constitué d'un fichier EXCEL Normandie.xls dans le répertoire CD_Normandie du CD ROM.

Montaure	Bois_Ennebourg	Tocqueville	Criquiers	Moisville
Graveron	Fourmetot	Farceaux		

Tabl. 4 – Piézomètres simulés

Ce répertoire contient également l'exécutable TEMPO.EXE appelé depuis les fichiers EXCEL ainsi que différents fichiers d'échange.

1) Première utilisation

Copier le répertoire CD_Normandie depuis le CD ROM. Dé - verrouiller en écriture : le répertoire étant sélectionné depuis l'explorateur Windows, agir sur le bouton droit de la souris et modifier les propriétés. EXCEL étant activé, ouvrir Normandie.xls. Le chemin du fichier associé au logiciel Tempo Normandie.\$pa doit être défini explicitement (Fig. 43). Le chemin peut être redéfini à tout moment (Fig. 44). En particulier ce chemin devra être redéfini à chaque fois que le répertoire CD_Normandie est déplacé ou que son nom est modifié. Cette procédure qui peut paraître contraignante permet d'appeler différents fichiers TEMPO correspondant à diverses applications depuis un seul et même environnement EXCEL.

Normandie.xls contient non seulement les données des piézomètres mais également les données climatologiques, la pluie à Chartres, Amiens et Senlis et l'ETP à Chartres.

2) Mise à jour des données climatologiques

Les données climatologiques sont au pas décadaire, bien qu'elles soient représentées au pas journalier dans la base de données de la feuille 'Données'. Ces données sont lues depuis la climathèque de meteo-France. La pluie est lue au format SANDRE (Fig. 45 à Fig. 52) et l'ETP au format en colonnes (Fig. 53 et Fig. 54).

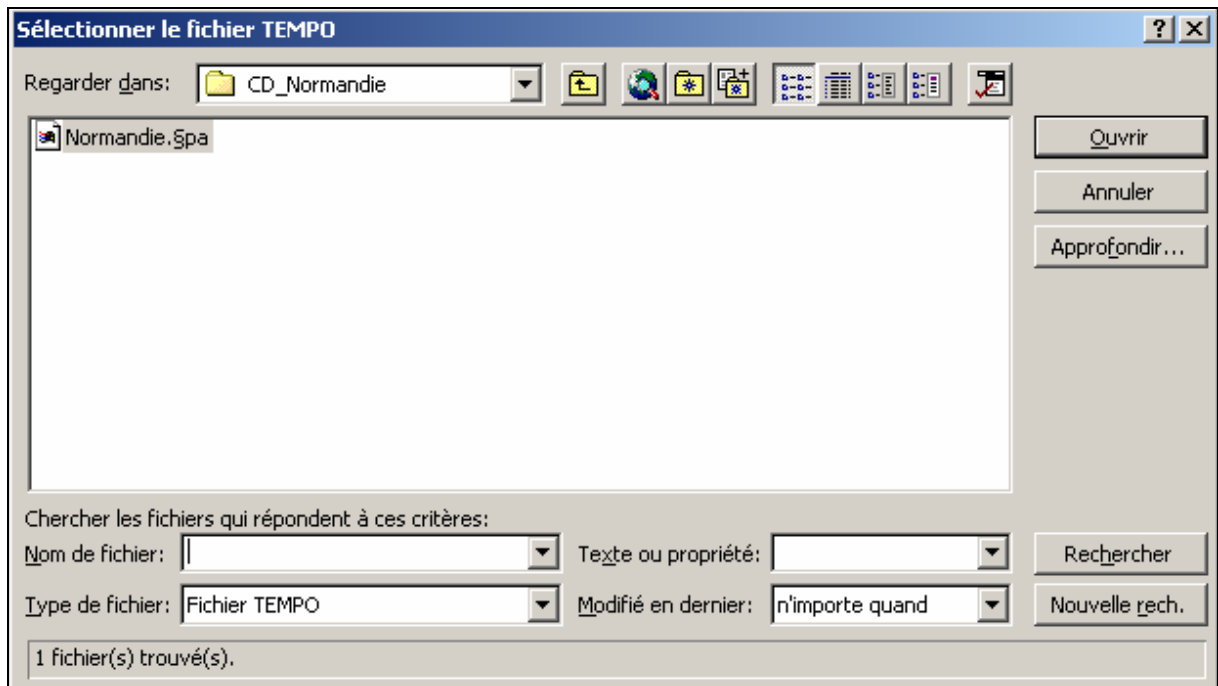


Fig. 43 – Boite de dialogue invitant à définir le fichier associé au logiciel Tempo

Importation des données		Parcourir...
Paramètres d'entrée		Parcourir...
Fichier Tempo	D:\Travail\PROJETS\R&D06\Norm	
Modèle prévisionnel	Normandie	Initialiser...
Début, fin validation	1/1/1990	31/12/2006

Fig. 44 – Définition du chemin du fichier associé à Tempo.



Fig. 45 – Saisie des pluies depuis la climathèque

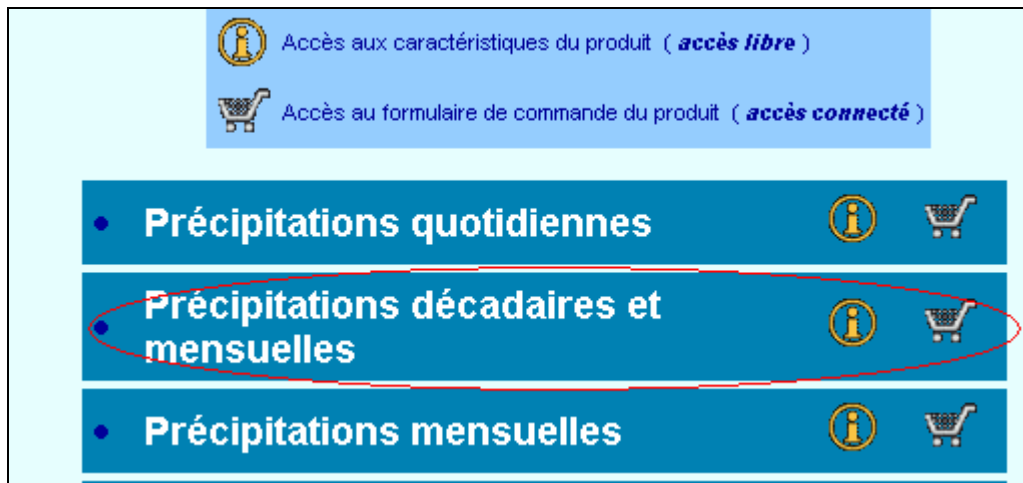


Fig. 46 – Saisie des pluies depuis la climathèque (pas de temps)

■ Référence temporelle

Période

Date Début Format : *MMAAAA*

Date Fin

Fig. 47 – Saisie des pluies depuis la climathèque (référence temporelle)

Définir ses critères, lancer la recherche, puis sélectionner ses stations météorologiques.

Moteur de recherche de stations Charger une liste pré-élaborée de stations Accès rapide

MOTEUR DE RECHERCHE DES STATIONS METEOS

Vider les critères

Par nom de station

Aide à la saisie Par numéro(s)

Par code du bassin

Selon la période d'ouverture du au

Selon le type de station 0 1 2 3 4 5

Selon les paramètres mesurés Pluie Température Humidité Pression
 Vent Rayonnement Insolation Etat mer

Selon la proximité d'une commune Effacer

Nom ou numéro de commune à rechercher 3 >>

>> Chartres 2 >> Chercher

Chercher

Message :

Fig. 48 – Saisie des pluies depuis la climathèque (station)

Définir ses critères, lancer la recherche, puis sélectionner ses stations météorologiques.

NUMERO	E	T	Nom de la station
28041001	0	2	BLANDAINVILLE
28048001	0	4	LA BOURDINIÈRE
28070001	0	0	CHARTRES
28094001	0	4	CHAUDON
28168001	0	4	GALLARDON
28195001	0	4	HOUX
28196001	0	4	ILLIERS-COMBRAY
28203001	0	4	LANDELLES
28350001	0	4	ST-LUPERCE
28380001	0	4	SOURS - MAN
28380002	0	2	SOURS
28386001	0	4	THIMERT

12 postes dans la liste

Station(s) sélectionnée(s) :

Etablir le devis

Ajouter ce produit à votre panier Annuler Vider la sélection

Fig. 49 – Saisie des pluies depuis la climathèque (sélection de la station et validation)

Supprimer	Description	Détail	Conserver ce formulaire	Devis en €
<input type="checkbox"/>	Précipitations décennales et mensuelles			0,14
			Total	0,14 €

(1 € = 10 points)

Ajouter un produit Supprimer **Confirmer la commande**

Fig. 50 – Saisie des pluies depuis la climathèque (commande)

Boîte de réception des produits commandés <small>(total : 16)</small>					
Actualiser		Comment récupérer un produit ?		Tarification	
Référence	Statut	Description	Commandé le	Prix en €	Récupérer
99136	Arrivé	Précipitations décadaires et mensuelles	02/08/2005 à 14:24	0,14	
88185	Anomalie! plus d'infos	Précipitations décadaires et mensuelles	13/06/2005 à 09:16		

Fig. 51 – Saisie des pluies depuis la climathèque (extraction)

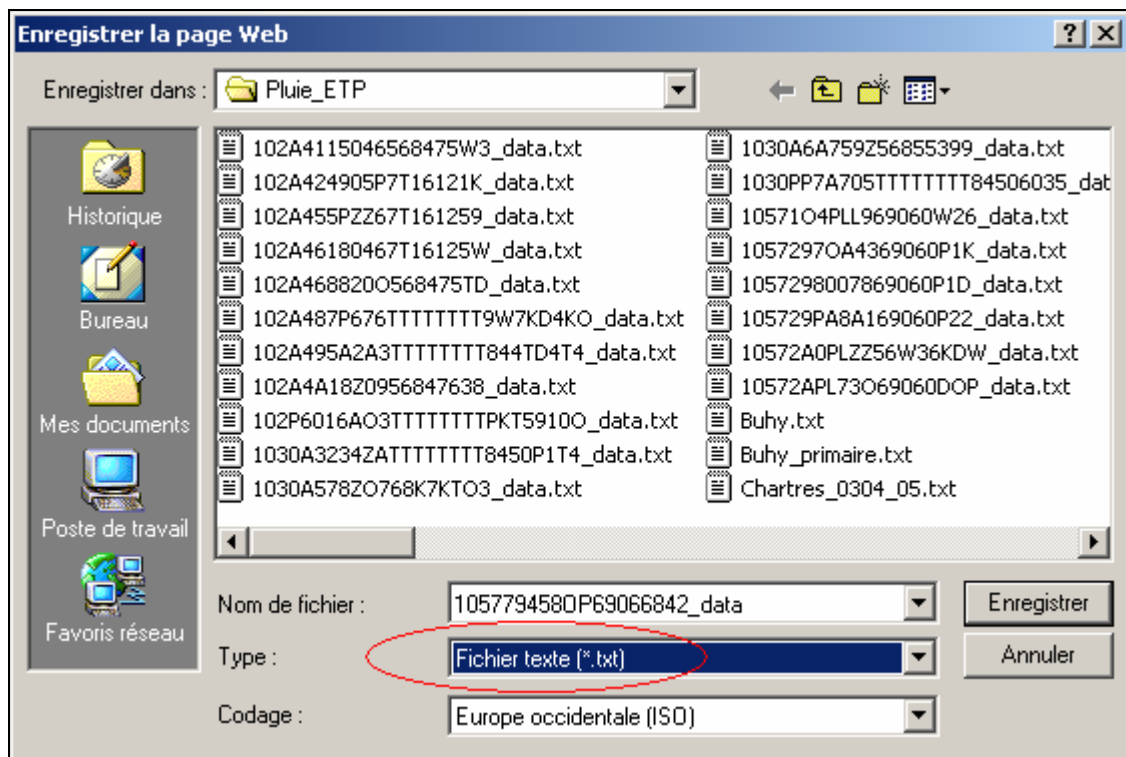


Fig. 52 – Saisie des pluies depuis la climathèque (enregistrement)

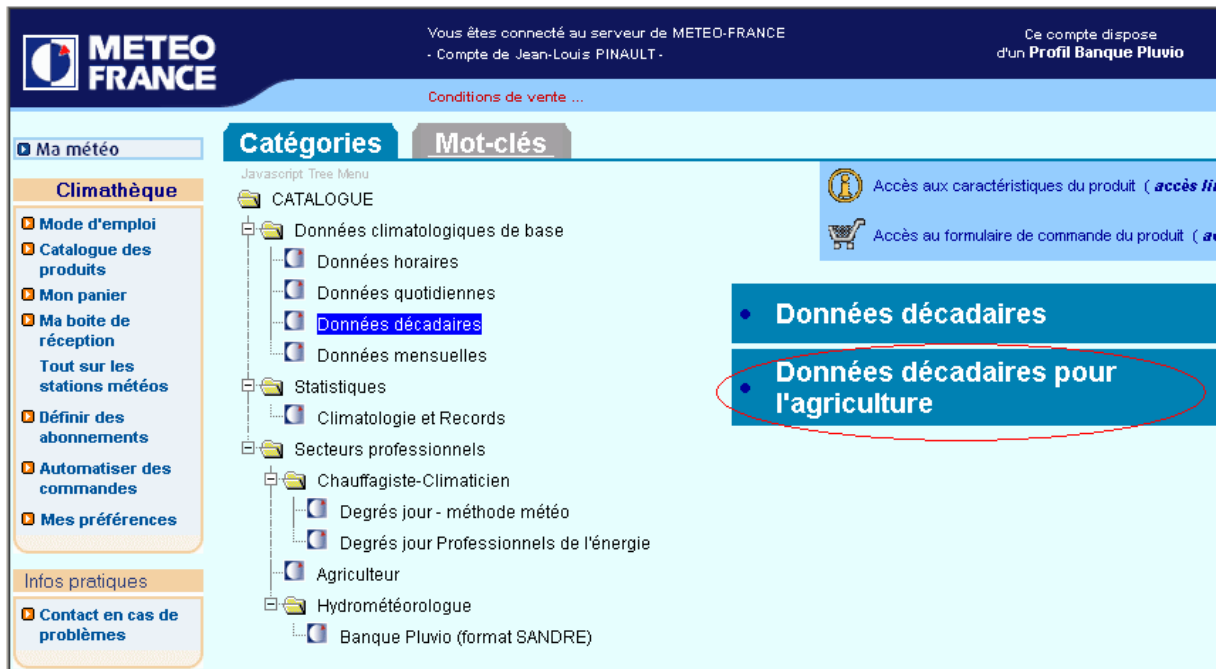


Fig. 53 - Saisie de l'ETP depuis la climathèque

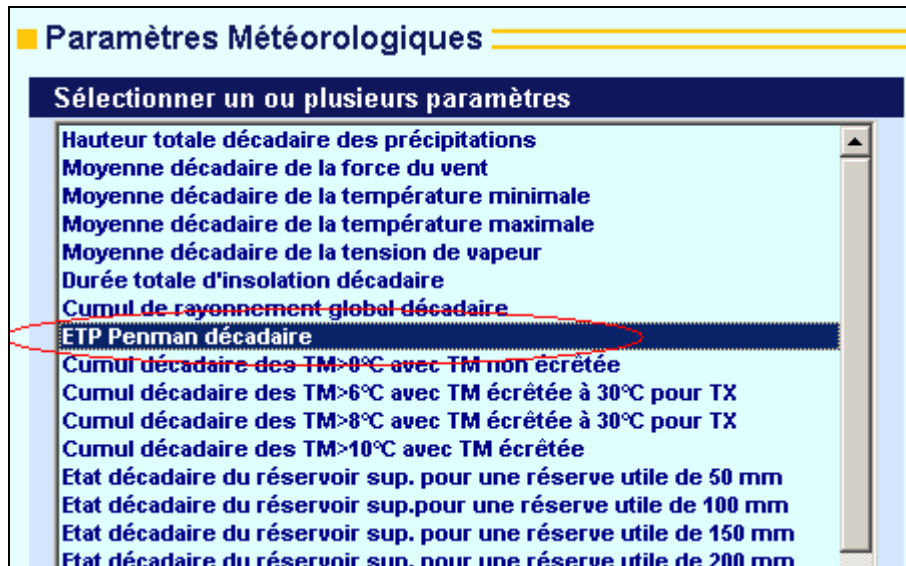


Fig. 54 – Saisie de l'ETP depuis la climathèque (suite)

Les fichiers TEXTE créés sont importés dans la base de données EXCEL (Fig. 55 à Fig. 57).

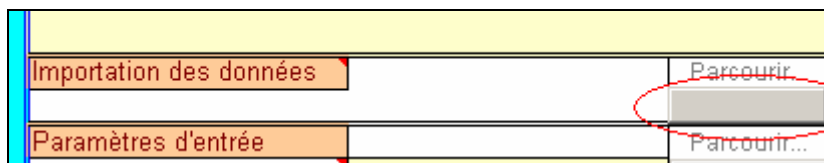


Fig. 55 - Importation des données de pluie depuis Normandie.xls.

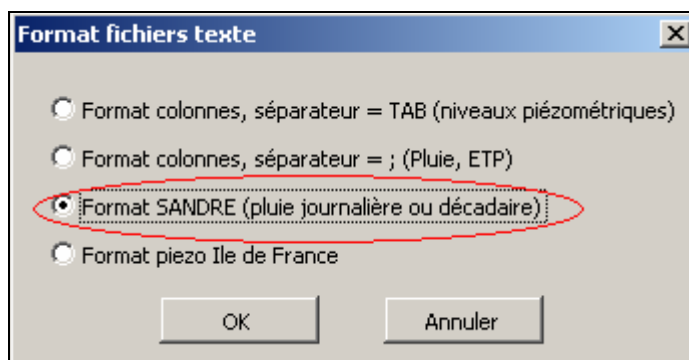


Fig. 56 - Importation des données de pluie depuis Normandie.xls (choix du format)

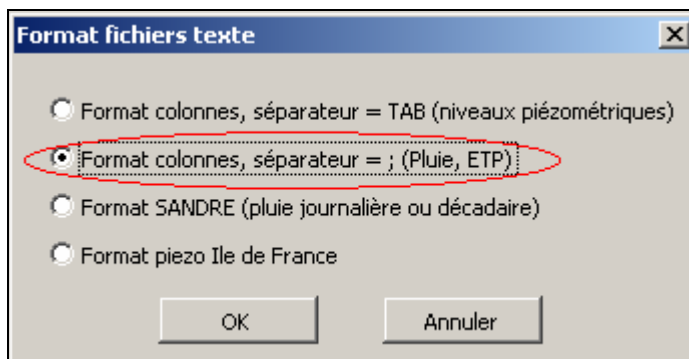


Fig. 57 - Importation des données d'ETP depuis Normandie.xls (choix du format)

3) Mise à jour des données piézométriques

Les données piézométriques enregistrées en format TEXTE sont importées de la même manière (Fig. 58).

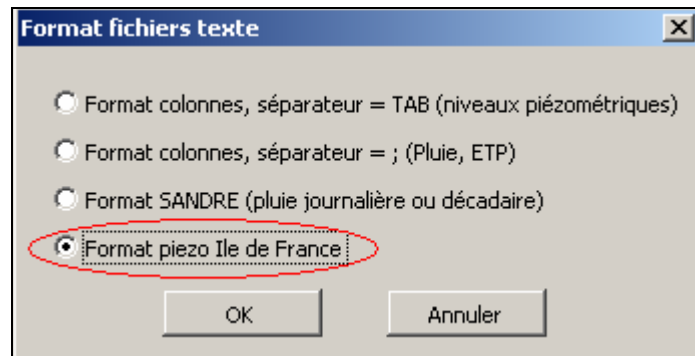


Fig. 58 - Importation des données piézométriques depuis Normandie.xls (choix du format)

4) Validation ou simulation

La base de données de la feuille « Données » étant à jour, il ne reste plus qu'à définir les références temporelles (Fig. 59), puis activer la validation ou bien l'enchaînement des tâches validation et simulation (Fig. 60). L'avancement des calculs (Fig. 61) apparaît lors de la simulation (prévision) qui peut être interrompue à tout moment (le temps nécessaire peut atteindre ½ heure, fonction de la fréquence d'horloge du processeur). Cette boîte de dialogue apparaît d'abord sur le fenêtre EXCEL puis disparaît pour ne réapparaître qu'en tâche de fond.

La validation consiste à visualiser les observations piézométriques et le modèle. La prévision aboutit à la représentation des différents quantiles.

Paramètres d'entrée		Parcourir...
Fichier Tempo	D:\Travail\PROJETS\R&D06\Norm	
Modèle prévisionnel	Normandie	
Début, fin validation	1/1/1990	31/12/2006
Début, fin prévision	25/2/2006	31/3/2012
Durée prévision (j)	1826	5 ans

Fig. 59 – Références temporelles de la prévision : date de la fin de la validation et du début de la prévision.

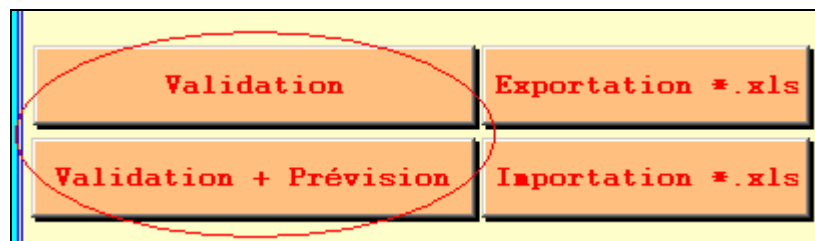


Fig. 60 – Validation, simulation.

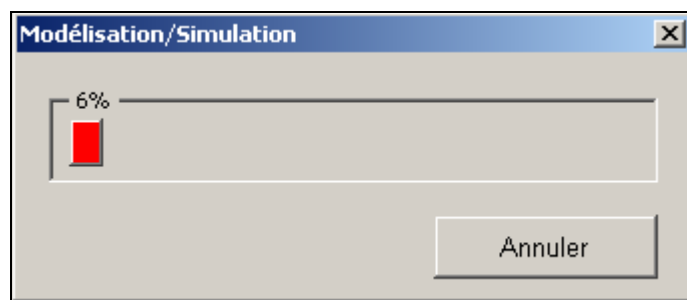


Fig. 61 - Simulation: avancement des calculs

La **prévision à court terme** doit être remise à jour régulièrement, contrairement à la **prévision à long terme**, obtenue en modifiant les dates début et fin de l'échelle graphique (Fig. 62), qui ne varie pas d'une simulation à l'autre (la prévision à long terme représente les niveaux d'étiage en fonction du temps pour différentes périodes de retour, a posteriori, alors que la prévision à court terme dépend des conditions initiales au moment de l'émission de la prévision).

Graphiques			Appliquer...
Date début, fin	01/01/2011	31/12/2011	
Echelle	arrondie		
Nombre de graphiques	8	N=8	
Cellules (coin supérieur gauche)	A1,A17,A33,A49,A65,G1,G17,G		
Temps maximum entre 2 mesures (j)	100	100 i	
Continuité Observations/Prévisions	FAUX		

Fig. 62 – Options concernant la représentation graphique

Le changement de date de l'échelle graphique s'applique à tous les graphiques dès lors que le bouton *Appliquer...* est activé. L'échelle des ordonnées peut être arrondie ou ajustée aux valeurs minimales et maximales. La modification du nombre de graphiques revient à dupliquer le graphique modèle (Fig. 23), ce qui permet de modifier et d'homogénéiser rapidement l'apparence des graphiques. Le changement d'échelle re-affecte la feuille de calcul propre à chaque graphique. La prise en compte de la continuité entre observations et prévision est obtenue en translatant verticalement le faisceau des quantiles.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Haute-Normandie
Parc de la Vatine
10 rue A. Sakharov
76130 – Mont Saint Aignan - France
Tél. : 02 35 60 12 00