

Thèse

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LILLE1 – SCIENCES ET
TECHNOLOGIES**

Aménagement et urbanisme

Présentée et soutenue publiquement

Par

Ouissem KHARROUBI

**Prévision des crues par modèle de réseau de neurones artificiels :
application au bassin versant de l'Eure**

Thèse soutenue le 28/06/2013, devant le jury composé de :

M. Youssef DIAB	Professeur des universités, Université de Marne-la-Vallée	Président
M. Benoit BECKERS	Enseignant-chercheur – HDR, Université de Technologie Compiègne	Rapporteur
M. Pascal Le GAUFFRE	Maître de Conférences – HDR, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon	Rapporteur
M. Olivier BLANPAIN	Professeur des universités, Université Lille 1	Directeur
M. Eric MASSON	Maitre de conférences, Université Lille 1	Codirecteur
M. Pierre-Gil SALVADOR	Professeur des universités, Université Lille 1	Examinateur
M. Sami LALLAHEM	Docteur-Ingénieur, Président de la société IXSANE, Lille	Invité

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes parents Khalifa et Zina.

A ma chère femme Charrouza et à mon futur enfant O. C

Junior.

A mon frère Sofien et sa femme Zeineb.

A mes chères sœurs Ahlem et Sourour.

Au grand Koussa et petite Kenzo.

A ma deuxième famille Maher, Zohra, Housseem et

Wassim.

A mon oncle Hassen Kharroubi.

Merci pour tous les sacrifices consentis par tous et chacun

pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

Avec toute ma tendresse.

Cet humble geste comme preuve de reconnaissance.

REMERCIEMENT

Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce sujet de thèse.

En premier lieu, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, M. **Olivier BLANPAIN**, Professeur des universités, Université des Sciences et Technologies de Lille de m'avoir accueilli au sein de son équipe. Je lui suis également reconnaissant pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

J'adresse de chaleureux remerciements à mon co-encadrant de thèse, M. **Eric MASSON**, Maître de conférences, Université des Sciences et Technologies de Lille, pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse.

Un grand merci à mon co-encadrant de thèse, M. **Sami LALLAHEM**, Docteur-Ingénieur, Président de la société IXSANE Lille, pour son implication dans le projet, notamment sur la problématique de modélisation. Il m'a beaucoup appris, j'ai apprécié son enthousiasme et sa sympathie. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui.

Je voudrais remercier les rapporteurs de cette thèse M. **Benoît BECKERS**, Maître de conférences-HDR, Université de Technologie Compiègne et M. **Pascal Le GAUFFRE**, Maître de conférences-HDR, Institut national des sciences appliquées de Lyon (INSA), pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je désire grandement remercier M. **Youssef DIAB**, Professeur des universités, Université de Marne-la-Vallée d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse de recherche. Je lui exprime mon profond respect.

Je remercie également M. **Pierre-Gil SALVADOR**, Professeur des universités, Université des Sciences et Technologies de Lille, d'avoir accepté d'être parmi les membres de jury et de porter un intérêt à mes travaux de recherche.

Mes remerciements s'adressent également à Mme **A. HABANE**, Mme **M. FRANCHOMME** et Mme **C. AUDOUIT**, pour leurs conseils et discussions au sein du laboratoire TVES.

Je n'oublierai pas de remercier Mme **K. LADIDRAY-GONCALVES**, Responsable du Bureau Hydrométrie et Prévision des Crues et **C. ZANIOLO** Prévisionniste responsable du bassin versant de l'Eure, service de prévision des crues Rouen pour leur sympathie durant mon séjour à Rouen et les nombreux conseils qu'ils m'ont prodigués.

Je tiens aussi à remercier tous mes amis du Laboratoire TVES pour leur ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, leur sympathie et leur soutien durant toutes ces années de recherche. Je cite Julie, Nicolas, Amélie, Gisèle et Lucie, et je leur souhaite une bonne continuation dans leurs travaux.

Je dédie enfin ce manuscrit à tous mes amis qui m'ont toujours aidé, encouragé et soutenu durant toutes ces longues années de recherche jusqu'au l'achèvement de ce travail, et plus précisément je cite : Chiraz, Raouf, Baligh, Hassen, Hassen , Oussema, Bouzid (Mohammed Amine), Rabaa, Mohammed (frère Syrien), Samah, Emna, Khawla, Khaled, Majdi, Achraf, Rabah (frère Palestinien), Adel, Amir, Emna.

Je remercie enfin toutes les personnes intéressées par mon travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans mon mémoire de thèse des explications utiles.

Merci encore à tous.

RÉSUMÉ

La croissance des populations riveraines engendre un accroissement de la vulnérabilité de nos sociétés aux inondations donc une forte demande sociale pour prévenir et prévoir ces catastrophes naturelles afin de protéger la population contre les inondations provoquées par les crues. Pour atteindre cet objectif, la disposition d'outils de prévision des crues, opérationnels et fiables, est primordiale. Mais la prévision des crues demeure un exercice loin d'être évident. D'une part, parce que les exigences en matière de prévision (précision et délai d'anticipation) sont de plus en plus fortes et d'autre part, parce que les outils physiques de prévisions des crues sont limités par les connaissances relatives à la dynamique des crues et aux nombreuses propriétés intrinsèques du bassin versant, qui est généralement un système naturel très complexe. Dans ce contexte, ce mémoire présente les travaux effectués pour réaliser des modèles pluie-débit à base de réseaux de neurones artificiels à des fins de prévision des crues dans le bassin versant de l'Eure (et deux de ses sous-bassins) jusqu'à un horizon de prévision de 48h. En premier lieu, une analyse de la complexité géographique et géologique du bassin versant sera menée afin de déterminer les différents éléments influençant le régime hydrologique du bassin de l'Eure. Ensuite, une démarche méthodologique d'analyse des données, sur la base d'outils statistiques, permettra une synthèse sur la nature hydrologique des bassins versants étudiés (Eure, Iton et Avre) et d'apporter les éléments nécessaires à la définition des relations non linéaires pluie-débit. Cet apport a permis la création d'un modèle pluie-débit non linéaire à base de réseaux neurones artificiels pour la prévision des crues. La création de ce modèle a nécessité plusieurs étapes aux quelles nous avons pu déterminer les paramètres du modèle qui ont permis la compréhension de la complexité hydrologique et de produire les informations nécessaires pour simuler les débits futurs. Elles ont abouti à un modèle de réseaux de neurones artificiels capable d'effectuer des prévisions des crues jusqu'à un horizon de prévision de 48h. Ce processus a été testé sur les trois bassins versants et les résultats des tests montrent une production de prévisions fiables ainsi qu'une capacité de généralisation à d'autres hydro systèmes.

ABSTRACT

The growth of riparian populations generates an increase in vulnerability of our societies to flood. Therefore, a high social demand to prevent and predict these natural disasters must be tacking to protect the population against floods. To achieve this objective, the provision of flood forecasting tools, operational and reliable, is primordial. But the flood forecasting still an exercise far from being evident. Firstly, because the forecast requirements (precision and time anticipation) are becoming more and more higher. And secondly, because the physical flood forecasting tools is limited by the relative knowledge of floods dynamics and many watershed intrinsic properties, which is generally a very complex natural system. In this context, this thesis presents the work done to produce rainfall-runoff flood forecasting models based on artificial neural networks (ANN) in the Eure watershed (and two sub-basins) up to a 48 hours horizon forecasting. Firstly, an analysis of the geographical and geological complexity of the Eure watershed will be conducted in order to determine the different factors that influencing the hydrological Eure watershed regime. Then, a methodological process to data analysis based on statistical tools, has allowed a synthesis on the hydrological nature of the watersheds studied (Eure, Iton and Avre) and brings the elements needed to the definition of the non-linear relations rainfall-runoff. This contribution has allowed the creation of a rainfall-runoff nonlinear model for flood forecasting based from ANN. The model creation required a multistage achievement through which we could determine the model parameters that allow a better understanding of the hydrological complexity and produce the information needed to simulate future flows. They resulted in an artificial neural networks model able to perform flood forecasting up to a 48 hours horizon forecasting. This process has been tested on three watersheds and the test results show a production of the reliable forecasts as well as an ability of generalization to other hydrosystems.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE.....	13
CHAPITRE I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DE LA PREVISION DES CRUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'EURE.....	17
I- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'EURE.....	18
1- Topographie.....	18
1-1- Évolution du relief du fond de vallée au niveau de la rivière de l'Eure.....	19
1-2- Évolution du relief du fond de vallée de la rivière de l'Iton.....	25
1-3- Évolution du relief du fond de vallée de la rivière de l'Avre.....	28
Conclusion.....	31
2- Climatologie.....	31
Conclusion.....	37
3- Contexte hydrogéologique.....	38
3-1- Géologie du bassin versant de l'Eure.....	38
3-2- Hydrogéologie.....	41
3-2-1- Principaux aquifères en lien avec l'écoulement de surface.....	41
3-2-2- Réseaux karstiques dans le bassin versant de l'Eure.....	43
Conclusion.....	44
II- OBJECTIFS DE LA PREVISION DES CRUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'EURE :	44
1- Enjeux du risque inondation dans le bassin versant de l'Eure.....	45
2- Prévision des crues: service « vigicrue » et projet PCBVE.....	51
CONCLUSION DU PREMIER CHAPITRE.....	55
CHAPITRE II. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES CHRONOLOGIQUES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS D'ETUDES	56
I- ACQUISITION DES DONNEES.....	57
1- Description des réseaux de mesures.....	57
1-1- Données pluviométriques.....	60
1-2- Données hydrométriques.....	60
1-3- Données piézométriques.....	61
2- Critique des données.....	62
2-1- Données pluviométriques.....	62
2-2- Base de données hydrométrique.....	64
2-3- Réseaux de mesures piézométriques.....	65
II- ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES CHRONOLOGIQUES	66
1- Pluviométrie mensuelle.....	66
1-1- Bassin versant de l'Eure.....	66
1-2- Bassin versant de l'Iton.....	66
1-3- Bassin versant de l'Avre.....	67
2- Pluviométries annuelles.....	69
2-2- Bassin versant de l'Eure.....	69
2-3- Bassin versant de l'Iton.....	69
2-4- Bassin versant de l'Avre.....	69
3- Débit mensuel.....	70
3-1- Station Louviers.....	70
3-2- Station Normanville.....	70
3-3- Station Muzy.....	71
4- Débit annuel.....	73
4-1- Station Louviers.....	73
4-2- Station Normanville.....	73
4-3- Station Muzy.....	73

5-	Piézométrie des bassins d'étude	74
5-1-	Piézométrie mensuelle.....	74
5-1-1-	Station Fains	74
5-1-2-	Station Normanville.....	75
5-1-3-	Station Ancienne gare.....	75
5-2-	Piézométrie annuelle	77
5-2-1-	Fains (Eure)	77
5-2-2-	Normanville (Iton).....	77
5-2-3-	Ancienne gare (Avre)	77
III-	FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET PARAMETRES D'INFLUENCE MAJEURE	78
1-	Bassin versant de l'Eure	79
1-1-	Relation pluie-débit	79
1-2-	Relation piézométrie-débit	80
1-3-	Relation nappe-pluie.....	81
2-	Bassin versant de l'Iton	82
2-1-	Relation pluie-débit	82
2-2-	Relation piézométrie-débit.....	83
2-3-	Relation nappe-pluie.....	84
3-	Bassin versant de l'Avre.....	85
3-1-	Relation pluie-débit	85
3-2-	Relation piézométrie-débit.....	85
3-3-	Relation nappe-pluie.....	86
IV-	MODELISATION FREQUENTIELLE DES DEBITS EXTREMES	87
1-	Traitement appliqué dans l'ajustement statistique des données.....	87
2-	Constitution de la base de données	88
3-	Choix du modèle fréquentiel	91
4-	Ajustement et exploitation du modèle fréquentiel	92
4-1-	Station Louviers (bassin versant de l'Eure).....	92
4-2-	Station Normanville (bassin versant de l'Iton).....	94
4-3-	Station de Muzy (bassin versant de l'Avre).....	96
	CONCLUSION DU DEUXIEME CHAPITRE	99
CHAPITRE III. METHODOLOGIE RNA ET PREMIERE APPLICATION : PREVISIONS DES CRUES AU NIVEAU DE LA STATION LOUVIERS		100
I-	RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS.....	101
1-	Principe général	101
2-	Inspiration biologique.....	102
3-	Neurone artificiel.....	102
3-1-	État du neurone artificiel	103
3-2-	Interconnexions neuronales	104
3-3-	Fonction d'activation.....	105
4-	Perceptron Multicouche.....	105
II-	APPLICATION DE LA METHODE DU RNA SUR LE BV DE L'EURE.....	107
1-	Méthodologie d'application.....	108
2-	Jeux de données de la modélisation RNA.....	113
3-	Critères de performances	114
3-1-	NASH.....	115
3-2-	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne « RMSE ».....	116
3-3-	Moyenne de l'erreur relative et absolue « MARE »	116
3-4-	Critère de persistance « Cp ».....	117
III-	CREATION DU MODELE RNA DE PREVISION DES CRUES : STATION HYDROMETRIQUE LOUVIERS.....	118
1-	Architecture optimale du RNA	118
1-1-	Sélection des variables informatives du système.....	118
1-1-1-	Variable en pluies	119
1-1-2-	Entrées en débits.....	121

1-1-3-	Vecteurs d'entrée en pluie-débit	123
1-2-	Deuxième sélection des variables informatives du système	126
1-2-1-	Variable en pluies	128
1-2-2-	Entrées en débits	129
1-2-3-	Vecteurs d'entrée en pluie-débit	131
2-	Calage des modèles RNA de prévision des crues	135
3-	Évaluation des résultats des modèles RNA vis-à-vis les niveaux d'alerte.....	140
4-	Deuxième validation avec les crues de 1999-2000.....	142
5-	Limites des modèles RNA	146
	CONCLUSION DU TROISIEME CHAPITRE.....	152
CHAPITRE IV. GENERALISATION DE LA METHODOLOGIE RNA : STATION NORMANVILLE ET MUZY		
		153
I-	ARCHITECTURE OPTIMALE RNA.....	154
1-	Cas du bassin versant de l'Iton : station Normanville	154
1-1-	Jeu de données du bassin versant de l'Iton.....	154
1-2-	Sélection des variables informatives	155
1-2-1-	Entrées en pluies	156
1-2-2-	Entrées en débits.....	157
1-2-3-	Entrées en pluie-débit	158
2-	Bassin versant de l'Avre : station de Muzy	162
2-1-	Jeu de données du bassin versant de l'Iton.....	163
2-2-	Structure optimale du RNA	164
II-	APPLICATION DU MODELE RNA : PREVISION DES CRUES	168
1-	Évaluation des résultats des modèles RNA de prévision des crues	168
1-1-	Cas de la station Normanville.....	168
1-2-	Cas de la station de Muzy.....	171
2-	Comparaison des résultats avec la station Louviers.....	174
	CONCLUSION DU QUATRIEME CHAPITRE	176
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	177
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	180
	GLOSSAIRE.....	190
	ANNEXES	193

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Localisation du bassin versant de l'Eure	15
---	----

Chapitre I

Figure A 1 Principaux ensembles topographiques étudiés	19
Figure A 2 Carte hypsométrique dans le bassin versant de l'Eure	21
Figure A 3 Carte des Pentas dans le bassin versant de l'Eure	22
Figure A 4 Profils en travers sur la rivière de l'Eure (Source : BDALTI IGN 2008).....	24
Figure A 5 Carte hypsométrique du bassin versant de l'Iton.....	26
Figure A 6 Profils en travers sur la rivière de l'Iton (Source: BD ALTI IGN 2008).....	27
Figure A 7 Carte hypsométrique du bassin versant de l'Avre	29
Figure A 8 Profils en travers sur la rivière de l'Avre (Source: BD ALTI IGN 2008)	30
Figure A 9 Répartition pluviométrique (1965-2008) : bassin versant de l'Eure.....	33
Figure A 10 Distribution interannuelle de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Eure (1965-2008)....	34
Figure A 11 Relation inter-saisonnière pluviométrie-température-évapotranspiration (1965-1995).....	35
Figure A 12 Nombre mensuel de jours de pluie dans le bassin versant de l'Eure (1993-2008)	35
Figure A 13 Répartition spatiale de la température moyenne du bassin versant de l'Eure (1965-1995).	36
Figure A 14 Distribution interannuelle de la température moyenne (1965-1995)	37
Figure A 15 Grands ensembles lithologiques caractéristiques du bassin versant de l'Eure (Source : BRGM, carte géologique de la France à 1/50000 n°215, modifié par Masson, 2002)	40
Figure A 16 Relation entre l'aquifère crayeux et l'écoulement de surface dans le bassin versant de l'Eure : exemple du piézomètre de Puits Ferme du Château (Graveron-Semerville) et la station Normanville (Iton).	42
Figure A 17 Occupation du sol et aléa d'inondation du bassin versant de l'Eure	46
Figure A 18 Méthodologie d'extraction des données statistiques d'enjeu dans le bassin versant de l'Eure.	47
Figure A 19 Répartition des différentes occupations du sol dans les zones en vigilance continue SPC SACN ...	48
Figure A 20 Répartition des différents types d'occupations du sol dans les zones inondables	49
Figure A 21 Secteurs touchés par les inondations de l'amont à l'aval	50
Figure A 22 Carte de la Seine aval-Côtiers Normands de vigilance crue le 24 décembre 2012 (Source : www.vigicrue.gouv.fr).....	54

Chapitre II

Figure B- 1 Localisation des différents types de stations dans le bassin versant de l'Eure	59
Figure B- 2 Évolution du nombre de pluviomètres	64
Figure B- 3 Exemple d'évaluation des chroniques hydrométriques (Banque Hydro).....	65
Figure B- 4 Pluviométrie moyenne mensuelle	68
Figure B- 5 Pluviométrie moyenne annuelle.....	70
Figure B- 6 Débit moyen mensuel	72
Figure B- 7 Débit moyen annuel	74
Figure B- 8 Profondeur moyenne mensuelle de la nappe.....	76
Figure B- 9 Profondeur moyenne annuelle	78
Figure B- 10 Évolution mensuelle et annuelle pluie-débit du bassin versant de l'Eure	80
Figure B- 11 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Eure	81
Figure B- 12 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-pluie du bassin versant de l'Eure	82
Figure B- 13 Évolution mensuelle et annuelle pluie-débit du bassin versant de l'Iton	83
Figure B- 14 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Iton	83
Figure B- 15 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-pluie du bassin versant de l'Iton	84
Figure B- 16 Évolution mensuelle et annuelle pluie-débit du bassin versant de l'Avre.....	85
Figure B- 17 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Avre.....	86
Figure B- 18 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-Pluie du bassin versant de l'Avre	87
Figure B- 19 Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour la station de Louviers.....	93
Figure B- 20 Comparaison graphique entre débit observé et débit calculé par Gumbel	94

Figure B- 21 Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour la station de Normanville	95
Figure B- 22 Comparaison graphique entre débit observé et débit calculé par Gumbel (station de Normanville)	96
Figure B- 23 Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour la station de Muzy	97
Figure B- 24 Comparaison graphique entre débit observé et débit calculé par Gumbel (station de Muzy)	98

Chapitre III

Figure C- 1 Neurone biologique / Neurone artificiel	103
Figure C- 2 Processus de calcul de l'état du neurone artificiel	104
Figure C- 3 RNA de type perceptrons multicouches (PMC ou MLP)	105
Figure C- 4 Exemple d'un RNA avec une couche d'entrée, trois couches cachées et une couche de sortie	106
Figure C- 5 Structure de la modélisation par les réseaux neurones artificiels	112
Figure C- 6 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie) : base de données de calage.	119
Figure C- 7 Architecture générale du RNA (vecteur d'entrée en pluie)	120
Figure C- 8 Évolution du modèle RNA avec RMSE selon le nombre de neurones d'entrée « pluie »	121
Figure C- 9 Différentes architectures RNA (entrées en débits)	122
Figure C- 10 Évolution de la performance du modèle RNA en fonction de nombre de neurones du débit en entrée	123
Figure C- 11 Différentes architectures RNA : vecteurs d'entrées en débit-pluie	124
Figure C- 12 Stabilité hydrologique avant la montée d'une crue (crue de mars 2001)	127
Figure C- 13 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie)	127
Figure C- 14 Architecture générale du RNA (vecteur d'entrée en pluie)	128
Figure C- 15 Évolution du RMSE en fonction de la dimension du vecteur d'entrée de pluie	129
Figure C- 16 Différentes architectures RNA (entrées en débits)	130
Figure C- 17 Évolution de la performance du modèle RNA en fonction de nombre de neurones du débit en entrée	131
Figure C- 18 Différentes architectures RNA : vecteurs d'entrées en débit-pluie	132
Figure C- 19 Architecture optimale du modèle RNA de prévision des crues (station Louviers)	135
Figure C- 20 Comparaison de l'évolution des critères de performances en fonction du temps de prévision pour les trois phases de modélisation RNA	137
Figure C- 21 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (événements entre jan-avril 2001 de la base de validation -10% aléatoire des données de calage)	139
Figure C- 22 Évaluation graphique des prévisions par niveaux d'alerte (phase de validation : 10% aléatoire de la base de calage)	141
Figure C- 23 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (crues 12-1999 et 01-2000)	144
Figure C- 24 Comparaison entre les deux validations des modèles RNA de prévision (station Louviers)	145
Figure C- 25 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (crue de Janvier 1995 de la base de validation : 10% aléatoire des données du 2° calage)	148
Figure C- 26 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (validation par la crue de mars-avril 2001)	150

Chapitre IV

Figure D- 1 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie)	156
Figure D- 2 Évolution de la RMSE : vecteurs d'entrée en pluies	157
Figure D- 3 Évolution des critères de performances MARE et RMSE : station Normanville	158
Figure D- 4 Architectures RNA (entrées en débit-pluie)	159
Figure D- 5 Architecture du modèle RNA de prévision des crues de la station Normanville	162
Figure D- 6 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie)	164
Figure D- 7 Architecture du modèle RNA de prévision des crues de la station Muzy	168
Figure D- 8 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (événements entre jan-avril 2001 de la base de validation -10% aléatoire des données de calage)	170
Figure D- 9 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (événements entre jan-avril 2001 de la base de validation -10% aléatoire des données de calage)	173
Figure D- 10 Comparaison de la fiabilité des modèles RNA de prévision des crues des stations Louviers, Normanville, Muzy	175
Figure D- 11 Comparaison des prévisions des crues extrêmes	175

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau A 1 Indicateurs topographiques du bassin versant de l'Eure et ses sous-bassins versants.....	18
Tableau A 2 Niveaux de vigilance crue (Source : SPC SACN 2008)	52

Chapitre II

Tableau B- 1 listes des pluviomètres et leurs principales caractéristiques	60
Tableau B- 2 liste des stations hydrométriques et leurs principales caractéristiques	61
Tableau B- 3 liste des piézomètres et leurs principales caractéristiques	62
Tableau B- 4 Description statistique de la pluviométrie maximale.....	68
Tableau B- 5 Description statistique des pluviométries interannuelles	70
Tableau B- 6 Description statistique des débits maximums interannuels	72
Tableau B- 7 Description statistique des débits maximums interannuels	74
Tableau B- 8 Description statistique des profondeurs minimales mensuelles.....	76
Tableau B- 9 Description statistique des profondeurs minimales interannuelles	78
Tableau B- 10 Échantillon des maxima annuels pour chaque station	90
Tableau B- 11 Paramètres de Gumbel.....	92
Tableau B- 12 Comparaison statistique entre les valeurs observées et celles calculées (station de Louviers).....	93
Tableau B- 13 Quantiles de débit selon les différentes périodes de retour (station de Louviers)	94
Tableau B- 14 Comparaison statistique entre valeurs observées et celles calculées (station de Normanville)	95
Tableau B- 15 Quantiles de débit selon les différentes périodes de retour (station de Normanville)	96
Tableau B- 16 Comparaison statistique entre valeurs observées et celles calculées (station de Normanville)	97
Tableau B- 17 Quantiles de débit selon les différentes périodes de retour (station de Normanville)	98

Chapitre III

Tableau C- 1 Analogie neurone biologique / neurone artificiel	103
Tableau C- 2 Description de la base de données de calage	113
Tableau C- 3 Description de la deuxième base de données de validation.....	114
Tableau C- 4 Évaluation des modèles RNA : vecteurs d'entrées en pluies	120
Tableau C- 5 Performance de la modélisation RNA : vecteurs d'entrée en débits (phase de la validation avec 10% aléatoire des données de calage)	122
Tableau C- 6 Évaluation des résultats des différentes combinaisons d'entrées débit-pluie (phase de la validation avec 10% aléatoire des données de calage).....	125
Tableau C- 7 Évaluation des modèles RNA : vecteurs d'entrées en pluies	129
Tableau C- 8 Performance de la modélisation RNA : vecteurs d'entrée en débits (phase de la validation avec 10% des données de calage).....	131
Tableau C- 9 Évaluation des résultats des différentes combinaisons d'entrées débit-pluie (phase de la validation avec 10% aléatoire des données de calage).....	134
Tableau C- 10 Critères de performances pour les différentes phases de modélisation RNA en fonction du temps de prévision	136
Tableau C- 11 Évaluation numérique des prévisions entre 3h et 48h selon les niveaux d'alertes (phase de validation : 10% aléatoire de la base de calage).....	142
Tableau C- 12 Paramètres statistique de la base de données (deuxième validation).....	142
Tableau C- 13 Évaluation des résultats	143
Tableau C- 14 Évaluation numérique des modélisations RNA selon les niveaux d'alerte : crues 12-1999 et 01-2000	146
Tableau C- 15 Évaluation numérique de la modélisation RNA (phase de validation : 10% aléatoire des données du 2° calage).....	146
Tableau C- 16 Évaluation numérique du modèle RNA par niveaux d'alertes (validation avec 10% des données du 2° calage).....	149

Tableau C- 17 Critère MARE de la modélisation RNA selon les niveaux d'alerte (validation avec la crue du mars-avril 2001)	151
---	-----

Chapitre IV

Tableau D- 1 Base de données de modélisation RNA	155
Tableau D- 2 Critères de performances des modélisations RNA (entrées en pluie) : validation avec 10% aléatoire de la base de calage).....	157
Tableau D- 3 Critères de performances des modélisations RNA avec entrées en débits (validation avec 10% aléatoire de la base de calage).....	158
Tableau D- 4 Critères de performance selon différentes combinaisons d'entrée débit-pluie au modèle RNA (validation avec 10% aléatoire des données de calage)	160
Tableau D- 5 Base de données de modélisation RNA	163
Tableau D- 6 Évaluation des modélisations RNA avec des vecteurs d'entrés en pluie (validation avec 10% aléatoire des données de calage)	165
Tableau D- 7 Évaluation des modélisations RNA avec des vecteurs d'entrés en débits (validation avec 10% aléatoire de la base de calage).....	165
Tableau D- 8 Critères de performance des résultats de la modélisation RNA Pluie-Débit (validation avec 10% des données de calage).....	167
Tableau D- 9 Évaluation des résultats de la modélisation RNA de prévision.....	169
Tableau D- 10 Critère MARE selon les niveaux d>alertes (validation avec 10% aléatoire des données de calage)	171
Tableau D- 11 Évaluation des résultats des modèles RNA de prévision des crues (Station Muzy).....	172
Tableau D- 12 MARE des prévisions RNA entre 3h et 48 h selon les niveaux d>alertes (validation avec 10% aléatoire des données de calage)	174

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La présence d'eau dans un milieu anthropisé s'accompagne souvent d'évènements touchant des activités humaines sensibles. Ces évènements se manifestent lors de phénomènes hydrologiques exceptionnels (crues, étiages, coulées boueuses...), en augmentation du fait des changements climatiques¹ ; ce qui pose des problèmes de plus en plus compliqués et difficiles à résoudre. L'une des catastrophes naturelles les plus communes dans le monde est l'inondation : elle causait environ 20 000 morts par an² à l'échelle globale. Les dégâts sont également importants en Europe et en France. En Europe, les inondations entre 1998 et 2007 sont à l'origine de quelque 700 morts, le déplacement d'un demi-million d'individus et 25 milliards d'euros de dégâts économiques (Berthet, 2010). Concernant la France, les zones inondables couvrent 13000 communes (1/3 des communes françaises) et touchent plus de 2 millions d'habitants. Pendant les dix dernières années en France, les inondations ont causé 72 décès et une moyenne de 250 millions d'euros de dégâts matériels, soit 80 % du budget attribué aux risques naturels (exemple : Deauville, Seine-Aval 5,3 millions d'euros de dégâts matériels et un mort en juin 2003)³. Devant l'ampleur du problème, une demande publique à prévenir et prévoir ces risques naturels a été déposée (Assemblée nationale, 2001). Cette demande s'est traduite par la transformation des Services d'Annonce des Crues (SAC) en Services de Prévision des Crues (SPC) en 2002⁴ et par la création du Service Central d'Hydrométéorologie d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) en 2003⁵.

De même, la lutte contre les inondations est motivée par les politiques publiques en Europe. Celle-ci a été traduite récemment par la directive 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil. Elles rappellent que "les inondations constituent une menace susceptible de provoquer des pertes de vies humaines et l'immigration des populations, de nuire à l'environnement, de compromettre gravement le développement économique et de saper les activités économiques de la Communauté"⁶.

¹ Selon Ducharne (2003), « Le changement le plus probable en Europe correspond cependant à une intensification des contrastes hydrologiques, avec des risques accrus d'inondations en hiver et de sécheresses en été. »

² [Http://www.prim.net](http://www.prim.net), site portail thématique : ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables dédié à la prévention des risques majeurs.

³ Rapport « Eaufrance » (2011).

⁴ Circulaire Bachelot, 2002.

⁵ JORF 2003.

⁶ Directive 2007, page 1.

Intérêt de la prévision

Depuis presque un demi-siècle, d'importantes ressources humaines et matérielles considérables ont été déployées afin de protéger la population contre les inondations (Tangara, 2005). De nombreux aménagements ont été réalisés pour protéger les zones à risque à travers les ouvrages de prévention contre les inondations (exemple des bassins de rétention et des barrages), les ouvrages de protection contre les inondations (exemple des digues linéaires) et les ouvrages de ressuyages des terres inondées (exemple des réseaux de fossés). Cependant, ils restent impuissants devant les crues exceptionnelles. Ils sont loin de pouvoir protéger les populations et les infrastructures humaines (Thielen, 2009). C'est ce que rappelle la commission d'enquête de l'Assemblée nationale en 2001 : « l'importance des masses d'eau concernées rend assez illusoire de vouloir lutter contre les inondations ». Les crues de grande période de retour représentent une limite énorme pour les systèmes de protection, par exemple le barrage de la Rouvière qui fut submergé lors d'une crue importante en septembre 2002 (Marchandise, 2007). De fait, l'anticipation des crues demeure une action indispensable pour alerter la population et réduire les dégâts causés par les inondations (Andréassian, 2005). Aux états unis, Le « National Hydrologic Warning Council » (NHWC, 2002) a estimé une réduction directe des dégâts des crues de près de 2,68 milliards de dollars entre 1981 et 2000, grâce à l'intervention des services de prévision hydrologique du « National Weather Service ». Il estime qu'une réduction de 766 millions de dollars supplémentaires serait attendue de l'amélioration de ces services de prévision.

Pratique opérationnelle et première formulation des objectifs de la thèse

La prévision des crues demeure un exercice loin d'être évident. Elle se base sur des compétences humaines et des connaissances physiques des bassins versants à gérer. Elle introduit différentes techniques pour estimer les crues allant de la régression simple des débits jusqu'à une modélisation détaillée (physique) du bassin versant et de ses processus hydrologiques. Ces techniques sont limitées par la connaissance de la dynamique des crues (variations de temps de propagation de l'onde de crue dans les réseaux hydrographiques) ou encore par les différents types d'écoulements qui influencent les flux de surface (exemple : l'écoulement souterrain et sub-surfacique) (Marchandise, 2007). Parfois, leurs performances sont mises en doute et restent perfectibles (Marchandise, 2007 ; Moulin, 2007), surtout pour des bassins versants présentant un haut degré de complexité physique ou pour lesquels la connaissance scientifique est très limitée avec comme corollaire une application erronée de la modélisation physique d'où une mauvaise prévision. L'objectif principal de ce travail est

d'étudier le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Eure (Figure 1)⁷ dont le niveau de complexité pose problème (Masson, 2002) et de dégager des pistes pour réaliser un nouveau modèle de prévision des crues.

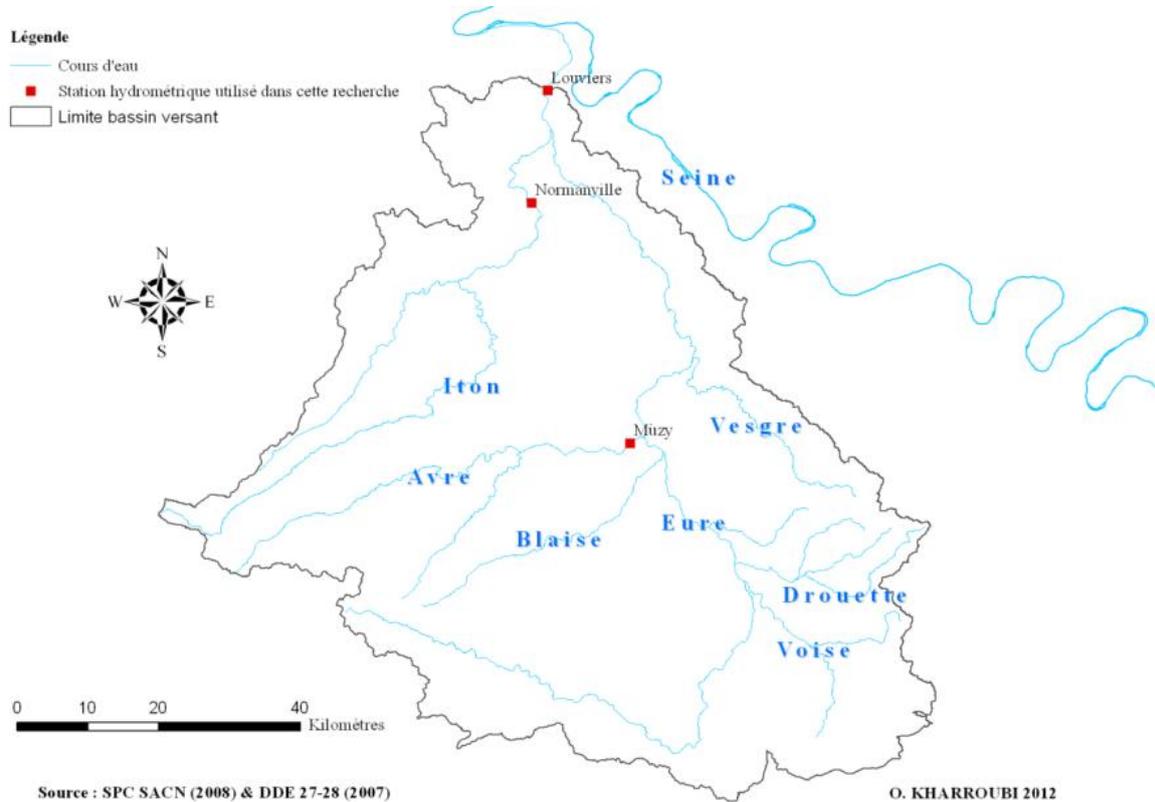


Figure 1 Localisation du bassin versant de l'Eure

Ce modèle doit impérativement répondre au cahier des charges suivant pour permettre son usage dans les services opérationnels :

- Il doit produire des prévisions de crues capables de tenir la comparaison avec les crues réellement observées.
- Il doit être robuste, c'est-à-dire fonctionner à partir des données communément mesurées par les services opérationnels et capable de calculer des prévisions même avec une lacune de données⁸.
- Il doit être rapide en temps de calcul afin de corriger en permanence la prévision et de produire d'alerte plus rapide.

⁷ Le bassin versant de l'Eure appartient à la rive gauche du bassin parisien. Il est bordé par quatre départements : au nord « Eure », à l'ouest « Orne », à l'est « Yvelines » et au sud « Eure-Et-Loir ». La rivière Eure draine une superficie totale de 5911 km² à la station Louviers (figure 1). Les affluents de l'Eure sont l'Iton, l'Avre, la Blaise et l'Eure-Amont⁷ sur la rive gauche et la Vesgres, la Voise et la Drouette sur la rive droite.

⁸ L'utilisation des données entachées de lacunes peut influencer négativement la modélisation hydrique donc les prévisions des crues.

Pour ce faire, nous avons pris le parti d'expérimenter la mise en œuvre de ce modèle sur la base de Réseaux Neurones Artificiels (RNA).

Dans ce contexte, ce mémoire présente les travaux effectués pour réaliser des modèles RNA de prévisions des crues au niveau des stations de Louviers sur l'Eure, de Normanville sur l'Iton et de Muzy sur l'Avre (Figure 1), pour un horizon de prévision pouvant atteindre 48h.

Le premier chapitre est consacré à la description du cadre physique, à l'introduction des enjeux de la prévision des crues dans le bassin versant de l'Eure ainsi qu'au projet de recherche « **Prévision des Crues dans le Bassin Versant de l'Eure (PCBVE)** ». Cette description du cadre physique du bassin versant de l'Eure comprend une définition topographique, climatologique, géologique et hydrogéologique. Elle fournit les bases de la connaissance nécessaire à la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin en général, des extrêmes et des crues en particulier. Après cette représentation du bassin d'étude, une analyse des enjeux de l'inondation dans le bassin versant de l'Eure sera réalisée avec comme objectif d'identifier le risque d'inondation dans ce bassin.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse critique et au traitement de la base de données hydrométrique utilisée, s'appuyant sur une analyse statistique de ces données et une étude du suivi hydrologique et ses extrêmes au niveau des bassins versants de l'Eure, l'Avre et l'Iton. Ces différentes analyses permettent une étude de la variabilité temporelle des différents paramètres Hydro climatiques ainsi qu'une identification des interrelations entre ces paramètres. Elles permettent aussi une quantification du risque d'inondation nécessaire au calage de la modélisation RNA pour les différentes entités hydrologiques.

Le troisième chapitre concerne la création du modèle RNA et son application pour une prévision des crues entre 6 et 48h à la station Louviers (Figure 1). Il présente les techniques de RNA appliquées dans ce travail. Ensuite, il présente la méthodologie de travail et les techniques d'évaluation de la modélisation RNA. Et enfin, il explicite la création du modèle RNA de prévision, son application et expose les résultats ainsi que leurs évaluations numériques et graphiques. Les résultats obtenus montreront l'intérêt de cette nouvelle méthodologie pour faire face aux inondations, ainsi que les limites de la technique RNA.

Le quatrième chapitre sera consacré à la généralisation de la méthodologie RNA, proposée dans ce travail, sur les stations Normanville (rivière Iton) et Muzy (rivière Avre) avec comme objectif de vérifier la fiabilité et la capacité de généralisation de cette méthodologie pour des prévisions des crues sur d'autres bassins versants.

**CHAPITRE I. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE DE LA
PRÉVISION DES CRUES DANS LE BASSIN VERSANT
DE L'ÈURE**

Dans ce chapitre, il s'agit d'apporter les éléments indispensables à la compréhension du fonctionnement hydrologique et des enjeux liés à la prévision des crues dans le bassin versant de l'Eure et ces principaux affluents (Iton et Avre). Un premier thème présente donc le contexte géographique du bassin versant de l'Eure à travers ces composantes topographique, climatologique, géologique et hydrogéologique. Le deuxième thème de ce chapitre est de mettre en perspective l'enjeu de la prévision des crues dans le bassin versant de l'Eure.

I- Contexte géographique du bassin versant de l'Eure

1- Topographie

Pour cette composante géographique, nous allons nous intéresser aux dimensions (surface et relief) et à l'organisation topographique du bassin versant de l'Eure et de ces principaux affluents (Iton et Avre).

La topographie du bassin versant de l'Eure est composée de sept sous-ensembles qui correspondent aux principaux affluents de rive droite et de rive gauche (tableau A1). Les affluents de la rive gauche de l'Eure sont les plus développés avec des superficies drainées plus importantes. Ce déséquilibre hydrographique engendre des apports hydrologiques plus importants pour la rive gauche, et donc une contribution majeure dans le fonctionnement hydrologique du bassin Eure. Dans ce travail de recherche, les sous bassins de l'Iton et de l'Avre, qui sont les plus vastes avec des superficies de 1200 km² et 971,5 km², ont été choisis pour leur contribution à l'hydrologie du bassin versant de l'Eure (figure A1).

Bassin versant	Eure	Eure-Amont	Iton	Avre	Blaise	Drouette	Vesgre	Voise
Surface (km ²)	6007	564	1200	971,5	478	274	336,7	444
Périmètre (km)	640	145	388	250	165	79	129	108
Compacité KG	2,31	1,71	3,14	2,25	2,11	1,34	1,97	1,44
Altitude minimale (m)	3	132	45	78	94	101	101	101
Altitude maximale (m)	314	286	314	311	294	194	194	194
Amplitude (m)	311	154	269	233	200	93	93	93

Tableau A 1 Indicateurs topographiques du bassin versant de l'Eure et ses sous-bassins versants



Figure A 1 Principaux ensembles topographiques étudiés

1-1- Évolution du relief du fond de vallée au niveau de la rivière de l'Eure

La répartition spatiale des altitudes détermine une orientation générale SSE-NNO pour l'écoulement dans le bassin versant de l'Eure (figure A2-a). Cependant, les sous bassins ne suivent pas cette orientation générale en raison de nombreux accidents topographiques. Ces derniers sont particulièrement influents dans le Perche, l'Ouche et le Thymerais (principale source des cours de l'Iton, de l'Avre et de l'Eure-Amont) ou de l'Hurepoix (principale source des cours de la Drouette et la Vesgre). Par exemple, dans les hauteurs du Perche, la direction de l'écoulement de l'Eure-amont suit une direction NO-SE jusqu'à la Beauce avant de reprendre l'orientation générale SSE-NNO. L'orientation NE-SO de la Drouette-amont sur le plateau de l'Hurepoix est un autre exemple de l'influence des accidents topographiques sur l'orientation de l'écoulement de surface des affluents de l'Eure. Ces accidents topographiques divisent globalement le bassin versant de l'Eure en trois entités topographiques : à l'ouest le Perche et l'Ouche, à l'est les plateaux de Madrie et de l'Hurepoix et au centre les plateaux entre la Beauce et le plateau du Neubourg.

La première entité topographique a les altitudes les plus fortes du bassin versant de l'Eure (jusqu'à 310 m). Cependant les pentes sont moyennes (3 à 6 degrés, figure A3-a) indiquant une zone des collines et des plateaux traversés par des vallées peu profondes, excepté à l'amont, à proximité, des accidents topographiques du Perche et de Thymerais. Ce secteur géographique est à l'origine des trois principaux contributeurs hydrologiques du bassin versant (l'Eure-amont, l'Iton et l'Avre). Depuis ce secteur, les trois vallées principales du bassin versant de l'Eure suivent des orientations divergentes : vers le SE pour l'Eure-amont, vers le NNE pour l'Iton et vers ENE pour l'Avre.

La deuxième entité topographique se compose des plateaux de l'Hurepoix et de Madrie qui constituent la zone amont des sous bassins de rive droite de l'Eure (la Voise, la Drouette et la Vesgre). Les altitudes n'y dépassent pas les 200 m (figure A2-a) avec des pentes généralement faibles, inférieures à 6 degrés (figure A3-a). Ce secteur présente toutefois des vallées encaissées en particulier pour la Drouette, dont la topographie est plus complexe.

La troisième entité topographique comporte les plateaux de faibles altitudes (entre 100 et 150 m), situés dans la zone centrale du bassin versant de l'Eure. Les vallées y sont encaissées et présentent une orientation générale SSE-NNO. Cependant, l'Eure et l'Iton sont également affectés par de brusques changements de direction : entre la confluence de l'Avre et la Vesgre, pour l'Eure ; dans la partie aval pour l'Iton. Cette entité topographique se caractérise par des pentes faibles (inférieures à 6 degrés), excepté pour les versants des vallées principales (Eure-moyenne, Eure-aval et Iton-aval) où les pentes peuvent atteindre 13 degrés (figure A3-a). Ces plateaux ont des altitudes relatives importantes par rapport à celles des fonds de vallées dont la différence peut atteindre plus d'une centaine de mètres à l'aval (confluence Eure-Seine) (figure A2). Cette troisième entité topographique occupe la majeure partie du bassin versant de l'Eure avec des altitudes comprises entre 12 et 150 m.

L'analyse générale de la topographie du bassin versant de l'Eure caractérise un relief typique de plateaux à vallées encaissées, cependant, les orientations et les changements de direction des vallées témoignent d'une organisation topographique plus complexe. Une analyse des profils en travers des niveaux des vallées guidant l'écoulement dans les sous bassins versant de l'Iton, l'Avre et de la ligne de partage principale de l'Eure, permet de mieux identifier l'évolution du relief d'amont en aval de l'axe de l'écoulement et des environs. Cette identification a été réalisée à partir des profils en travers (figure A2-a), eux-mêmes réalisés pour chaque sous-bassin versant de l'amont vers l'aval à partir du modèle numérique du terrain (MNT).

Légende

Classe d'altitude

Classe d'altitude

12 - 20

20 - 40

40 - 60

60 - 80

80 - 100

100 - 120

120 - 140

140 - 150

150 - 160

160 - 180

180 - 200

200 - 220

220 - 240

240 - 260

260 - 280

280 - 300

300 - 310

— Isohypse

□ Limite du bassin versant

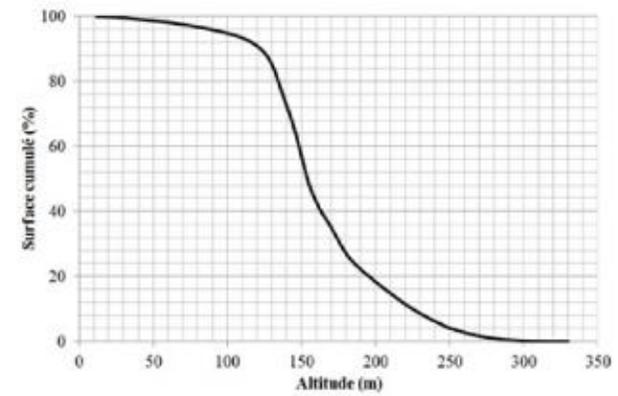
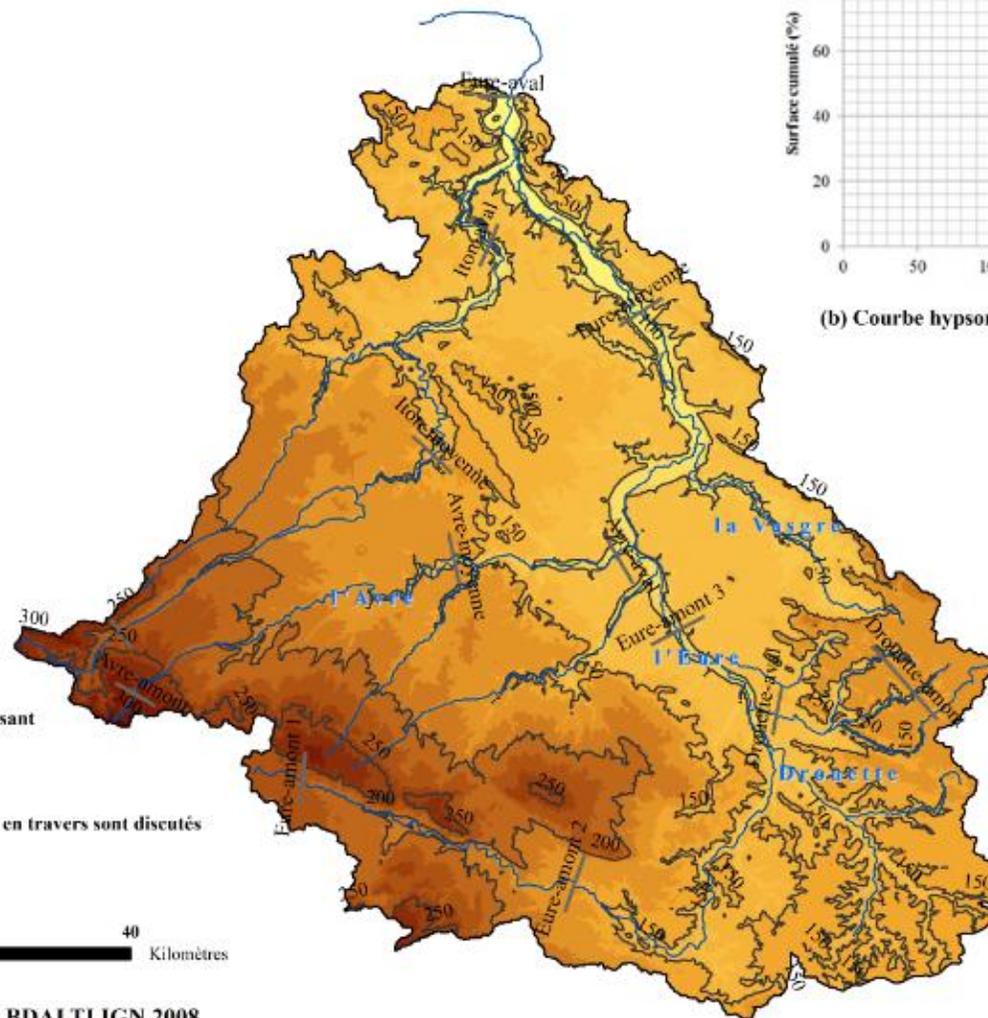
— Profil en travers

— Cours d'eau

NB : les résultats des profils en travers sont discutés plus loin dans le text.

0 10 20 40 Kilomètres

(a) Répartition des altitudes



(b) Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Eure



Source : SPC SACN et BDALTI IGN 2008

O. KHARROUBI 2012

Figure A 2 Carte hypsométrique dans le bassin versant de l'Eure

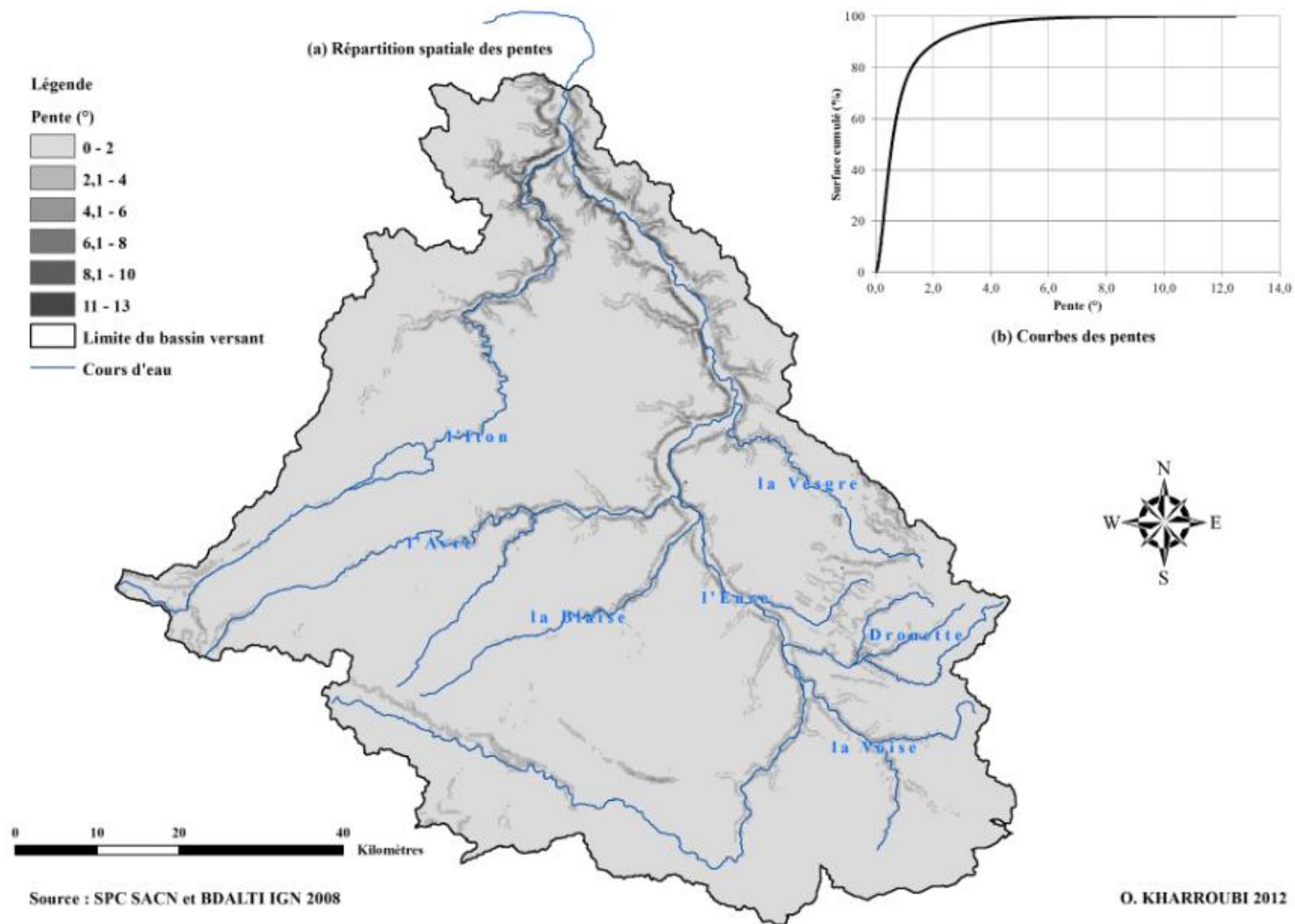


Figure A 3 Carte des Pentés dans le bassin versant de l'Eure

Le sous bassin versant de l'Eure-amont est une zone de divergence topographique et hydrologique par rapport à l'orientation générale dans le bassin versant de l'Eure. Il a une forme allongée vers le SE avec une compacité $K=1,71$ (tableau A 1), et présente les altitudes relatives les plus élevées par rapport aux autres sous-entités du bassin versant de l'Eure (entre 132 et 286 m). Cette forme allongée du bassin de l'Eure amont (figure A 4) est renforcée par l'orientation (vers le SSO) des escarpements et buttes topographiques au contact du Perche. Vers Saint-Luperce, le relief évolue avec la présence de plateaux ouverts incisés par des vallées peu larges et peu profondes, guidant alors les écoulements de l'Eure-amont vers la Beauce chartraine (sud du bassin versant de l'Eure). Le sous bassin de l'Eure amont rejoint l'Eure moyenne après une brutale réorientation vers le Nord (figure A4), juste avant Chartres.

L'Eure-moyenne s'inscrit dans une topographie de plateaux d'altitude moyenne 130 à 110 m (figure A4) avec des vallées encaissées (40 à 80 m d'incision) dont la largeur varie de 500 à 1500 m (figure A4). L'évolution de la largeur de la vallée démontre la montée en puissance du fonctionnement hydrologique du bassin versant dans le secteur de l'Eure moyenne notamment avec les apports des nombreux affluents de rive gauche (Blaise et l'Avre) et de rive droite (Voise, Drouette, Vesgre, figure A2). C'est le secteur de concentration hydrologique (ruissellement et apports hydrogéologiques) et la première zone de stockage des crues.

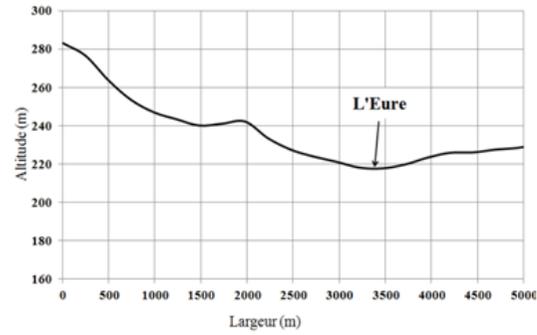
L'Eure aval s'inscrit aussi dans une topographie de plateaux (entre 90 et 120 m d'altitude moyenne) traversée par des vallées d'une profondeur de l'ordre de 80 m dont la largeur peut atteindre 1000 m. Dans le secteur de l'Eure aval, l'amplitude du fond de vallée n'est pas affectée par les apports hydrologiques de l'Iton. L'emprise des zones inondables dans le transect topographique de l'Eure est donc presque inchangée avec de larges zones d'expansion de crues similaires en surface à celles de l'Eure moyenne.

Légende

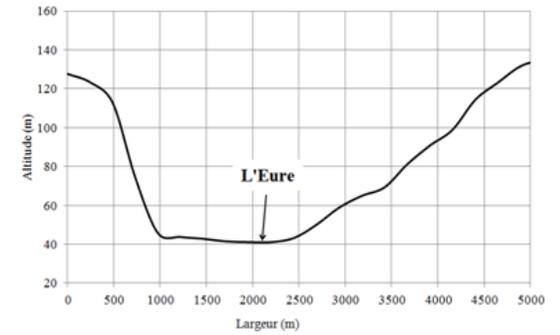
- Profil en travers
- Cours d'eau
- Limite du bassin versant Eure



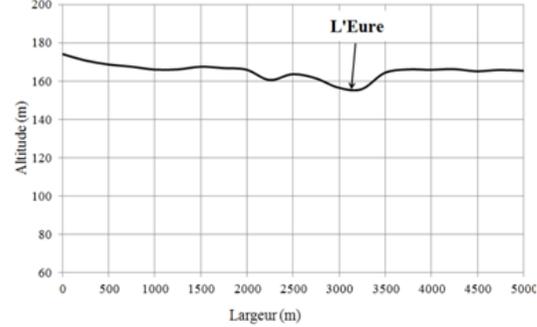
Eure-amont (Neuilly-sur-Eure)



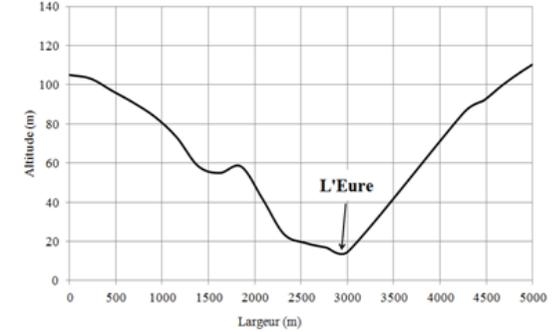
Eure-moyenne (Pacy-sur-Eure)



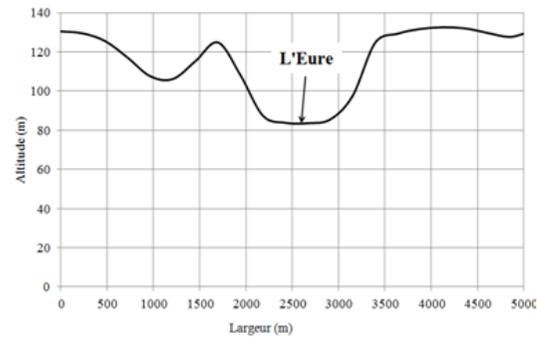
Eure-amont (Saint-Luberce)



Eure-aval (Louviers)



Eure-Moyenne (Charpont)



Eure-aval (Louviers-centre-ville)

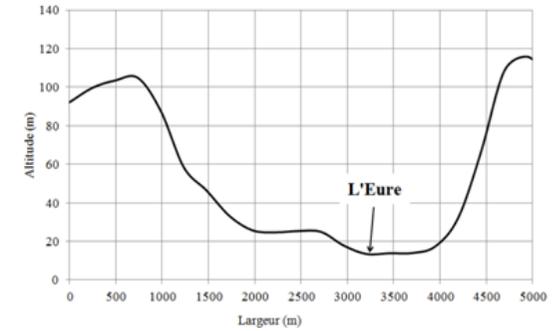


Figure A 4 Profils en travers sur la rivière de l'Eure (Source : BDALTI IGN 2008)

1-2- Évolution du relief du fond de vallée de la rivière de l'Iton

Le sous bassin versant de l'Iton constitue l'entité géographique la plus vaste (tableau A1) bassin Eure. Il prend source dans les hauteurs du Perche (département de l'Orne en $X = 460\,944,3$ m et $Y = 2\,410\,108,9$ m). La rivière Iton draine une superficie de 1200 km^2 vers la confluence Iton-Eure (1038 km^2 jusqu'à la station Normanville, sa dernière station hydrométrique). Une superficie qui peut lui confier un rôle important dans le fonctionnement hydrologique du bassin de l'Eure.

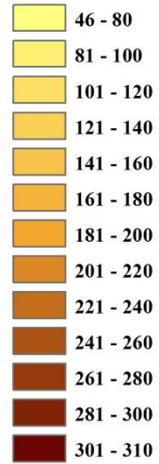
Le sous bassin versant de l'Iton a une organisation topographique et hydrologique divergente par rapport à l'orientation générale dans le bassin versant de l'Eure. Il a une forme allongée vers le SO et présente l'altitude la plus élevée par rapport aux autres sous-bassins de l'Eure (314 m, tableau A1). Le bassin de l'Iton prend source dans les hauteurs du Perche où nous avons des escarpements orientés vers le SSO (figure A5) et des vallées allongées (une profondeur de l'ordre de 20 m figure A6). Jusqu'à Damville, le relief perd de son énergie et laisse place à des vallées de faibles profondeurs (15 m) et de faibles largeurs (inférieur à 500 m) à travers les plateaux centraux de l'Iton-moyenne. Ces vallées guident alors l'écoulement vers l'Iton-aval en effectuant deux changements brutaux d'orientation (NNE puis NO, figure A6). Ce secteur situé à l'aval de Damville correspond à la partie amont du Sec-Iton⁹ ou la vallée s'encaisse très rapidement dans la topographie de plateau en s'appuyant sur les contraintes structurales sous-jacentes (Masson, 2002).

L'Iton-aval s'inscrit dans une topographie de plateaux d'altitude moyenne 120 à 140 m (figure A6) avec des vallées encaissées (de l'ordre de 80 m d'incision) dont la largeur est de l'ordre de 1000 m (figure A6). L'évolution de la largeur de la vallée prouve la montée en puissance du fonctionnement hydrologique du bassin versant dans le secteur de l'Iton-aval notamment avec les apports hydrogéologiques du réseau karstiques au niveau du Sec-Iton. L'Iton-aval, juste avant la confluence Eure-Iton, est un secteur de concentration hydrologique (ruissellement et apports hydrogéologiques) et la principale zone de stockage des crues dans le bassin versant de l'Iton.

⁹ Le Sec-Iton est un tronçon de l'Iton qui se sèche par effet d'infiltration dans la nappe crayeuse à travers les karsts. Cette partie va être détaillée plus loin dans ce manuscrit.

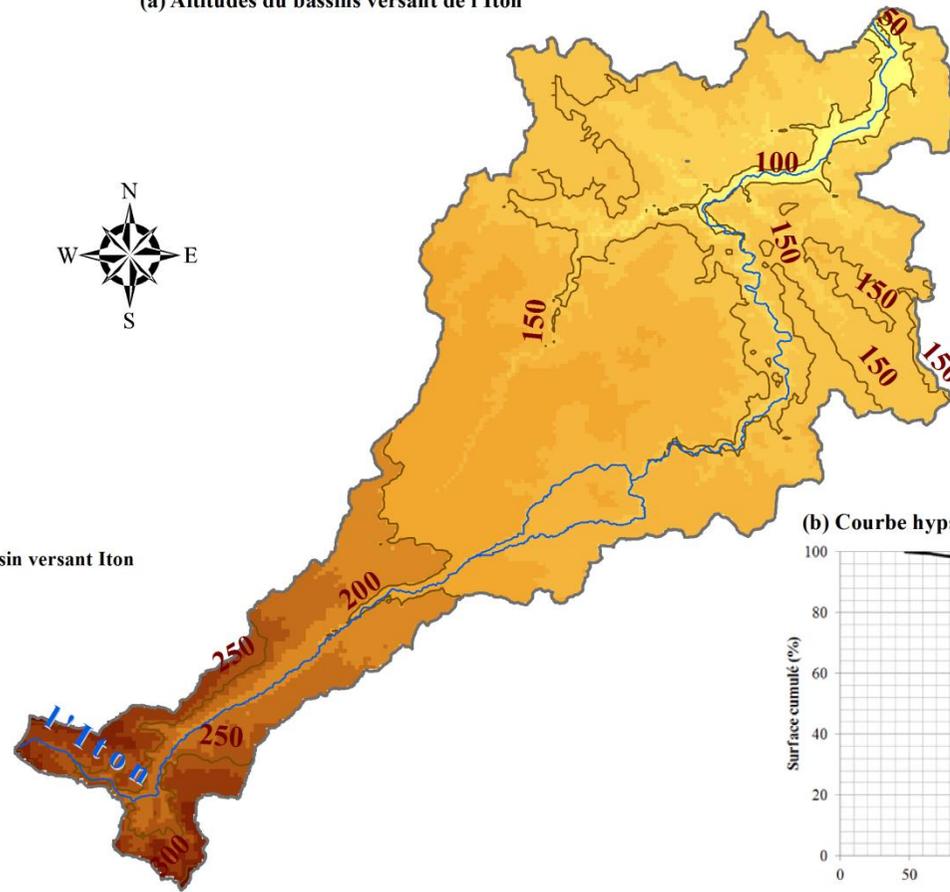
Légende

Classe d'altitude (m)

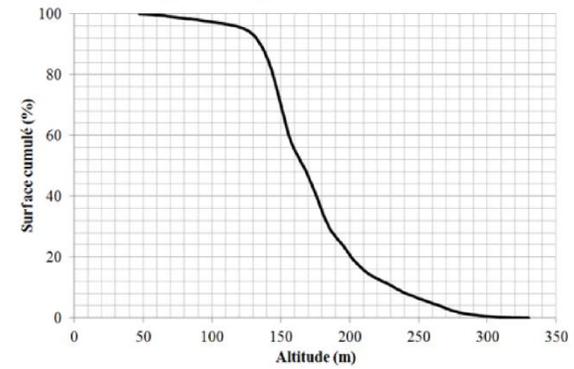


— Isohypse
□ Limite du bassin versant Iton
— Cours d'eau

(a) Altitudes du bassins versant de l'Iton



(b) Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Iton



Source: SPC SACN et BDALTI 2008

O. KHARROUBI 2012

Figure A 5 Carte hypsométrique du bassin versant de l'Iton

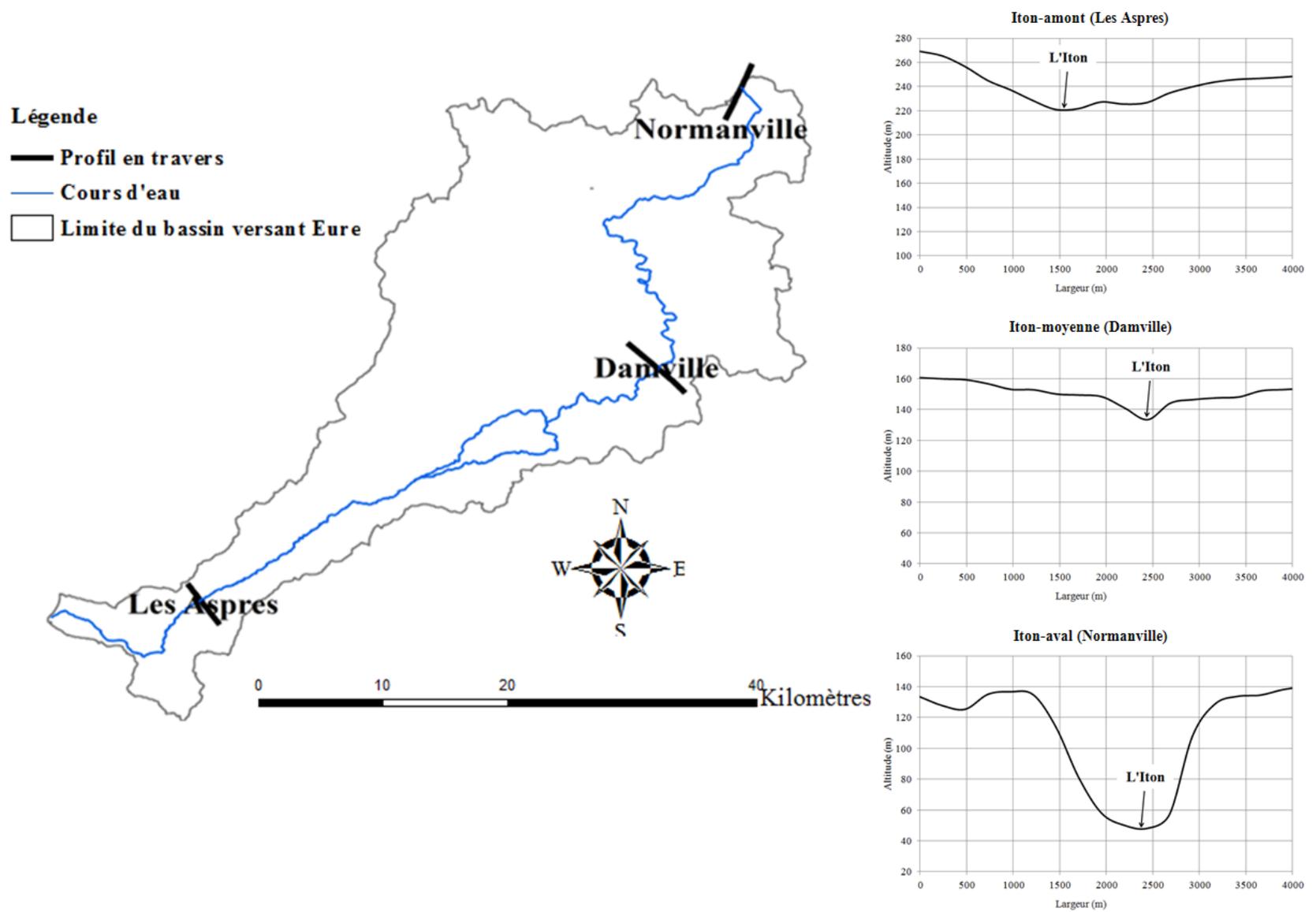


Figure A 6 Profils en travers sur la rivière de l'Iton (Source: BD ALTI IGN 2008)

1-3- Évolution du relief du fond de vallée de la rivière de l'Avre

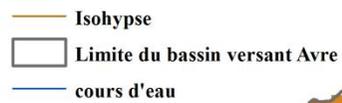
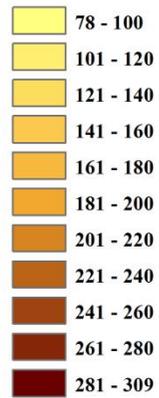
Le sous bassin versant de l'Avre draine la partie centrale du bassin versant de l'Eure. Cette position caractéristique dans les vallées Eure définit, avec d'autres paramètres, son apport aux différents types d'écoulement dans les vallées centrales. L'Avre s'écoule des hauteurs de Perche, d'où il prend sa source ($X = 471\,525,7$ m et $Y = 2\,401\,588,9$ m), jusqu'au centre du bassin versant de l'Eure (entre les deux communes Montreuil et Saint-Georges-Motel). Il constitue le deuxième sous bassin versant en termes de superficie drainée (971,5 km²).

Le sous bassin de l'Avre est une zone de divergence topographique et hydrologique par rapport à l'orientation générale dans le bassin versant de l'Eure. Il a une forme allongée vers le SO (figure A7). Cette forme allongée du bassin est renforcée par la présence des hauts plateaux (250 à 290 m) traversés par des vallées de 30 m de profondeur avec une largeur au fond inférieur à 250 m (figure A8). Vers Acon, le relief évolue et perd au niveau de la hauteur des plateaux (170 à 180 m) en gardant quasiment la forme amont des vallées qui guident les écoulements (40 m de profondeur et des largeurs inférieures à 250 m) de l'Avre-amont vers l'Avre-moyenne suivant une direction ENE (figure A7).

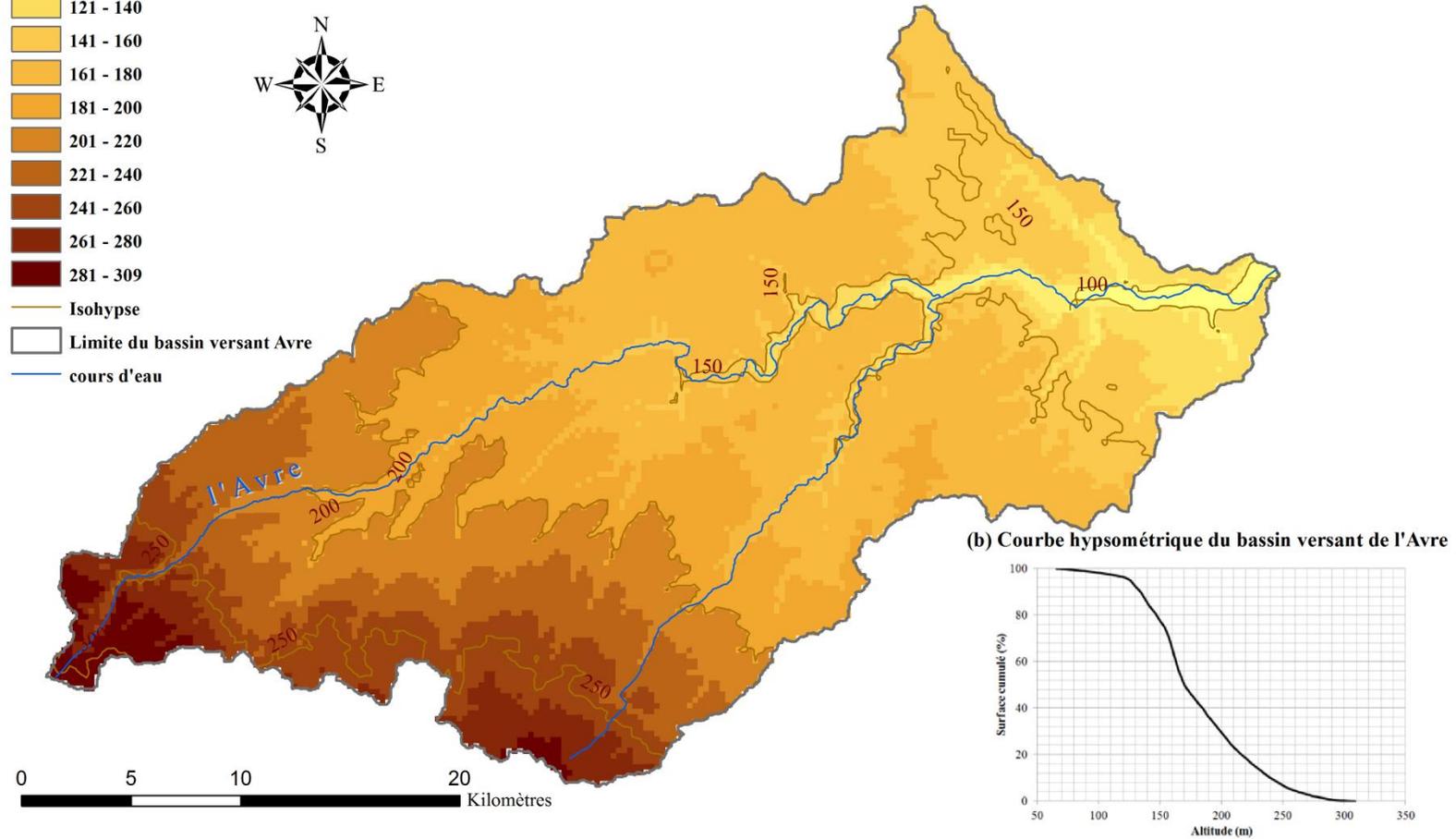
L'Avre-aval a une topographie de plateaux d'altitude moyenne 100 à 130 m avec des vallées encaissées (40 m d'incision) dont la largeur peut atteindre 1000 m (figure A8). L'élargissement de la vallée en aval prouve l'accroissement du fonctionnement hydrologique du bassin versant dans le secteur de l'Avre-aval notamment avec les apports du cours d'eau de sa rive droite (la Meuvette). C'est le secteur de concentration hydrologique des ruissellements et la première zone de stockage des crues de l'Avre.

Légende

Classe d'altitude (m)



(a) Altitudes du bassins versant de l'Avre



Source: SPC SACN et BDALTI 2008

O. KHARROUBI 2012

Figure A 7 Carte hypsométrique du bassin versant de l'Avre

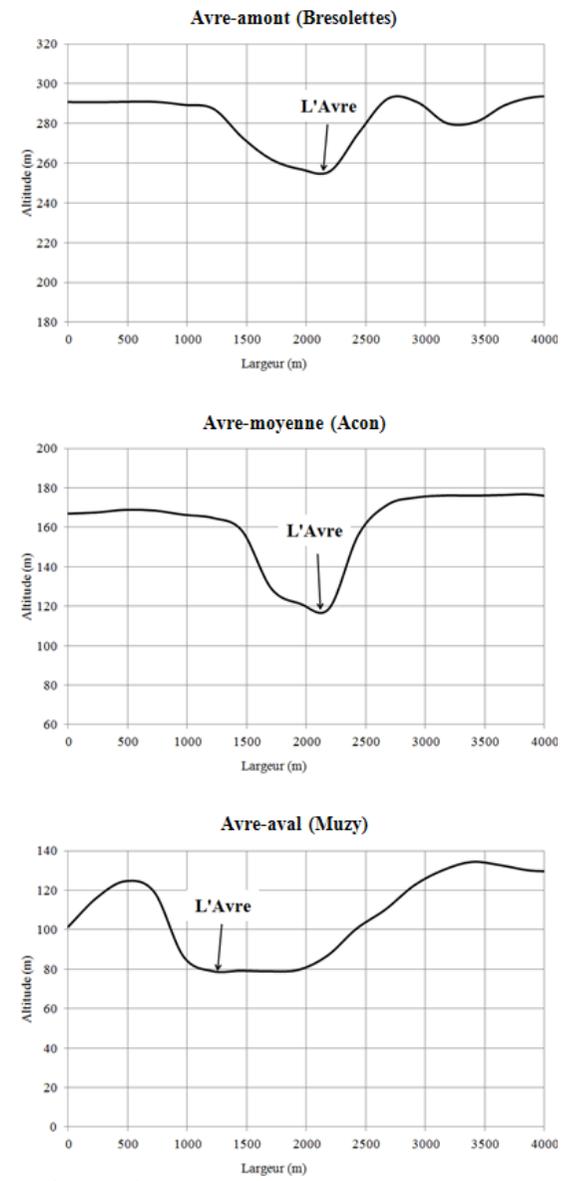
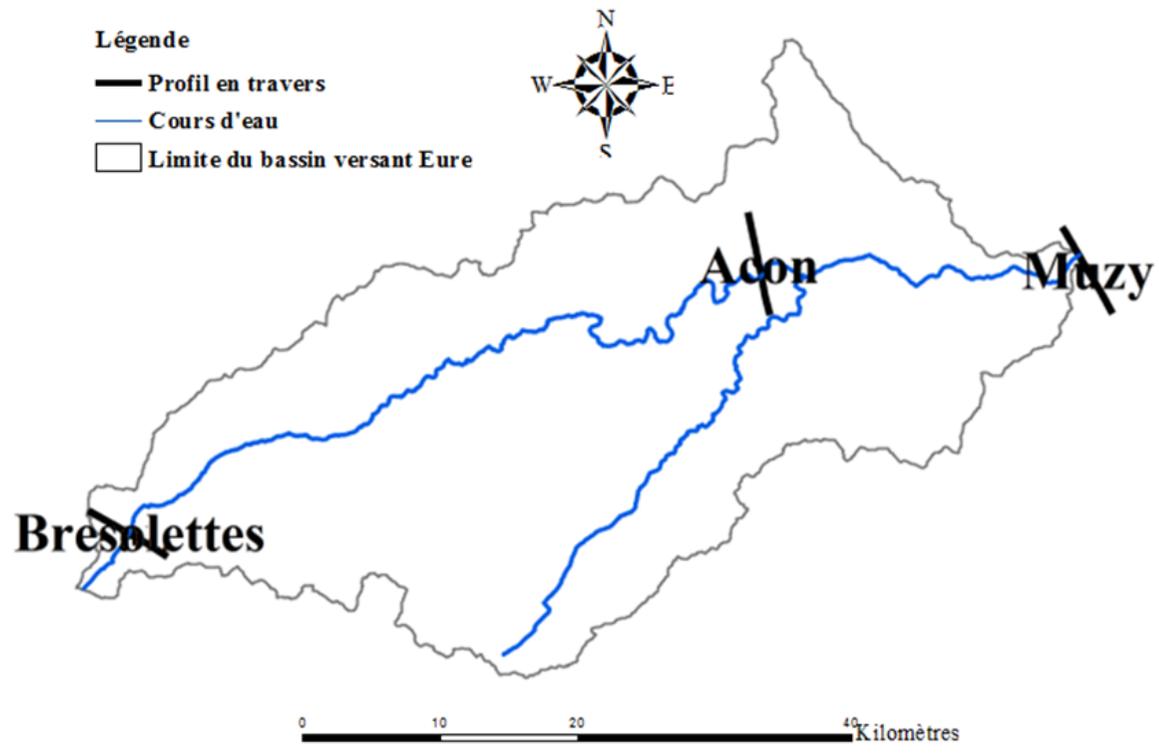


Figure A 8 Profils en travers sur la rivière de l'Avre (Source: BD ALTI IGN 2008)

Conclusion

Cette description topographique a permis de comprendre l'organisation et le découpage des grands ensembles hydrographiques du bassin versant de l'Eure et plus particulièrement les secteurs étudiés : Eure, Iton et Avre pour leurs secteurs amont, moyen et aval. Il existe bien une correspondance entre chacun de ces secteurs topographiques et l'amplitude des zones inondables dans les fonds de vallées. Elles sont étroites et peu développées dans tous les secteurs amont (Eure Amont, Iton et Avre), se développent dans le secteur de l'Eure moyenne en raison de la convergence des affluents pour lesquels les zones inondables ne se développent que dans les secteurs aval (Iton, Avre ...) ¹⁰ et autres affluents non étudiés ici. Ce sont ces secteurs de vallée à large fond plat qui constituent les principales zones d'enjeux en matière de prévision et prévention du risque inondation.

2- Climatologie

La localisation du bassin versant de l'Eure l'expose à un climat océanique tempéré, d'hiver pluvieux et doux, et d'été frais et relativement humide. Cela affecte la contribution climatologique aux apports hydrologiques, le fonctionnement de l'hydrosystème Eure et le comportement des crues.

La répartition de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'Eure indique une homogénéité nette des cumuls annuels (figure A9-b). La majorité de la superficie du bassin reçoit 600 à 700 mm par an (figure A9-a). Les valeurs varient entre 516 mm et 768 mm respectivement pour les pluviomètres Laons et Courtomer. La répartition spatiale de la pluviométrie annuelle moyenne (figure A9-b) indique une distribution suivant la répartition topographique du bassin. Trois parties sont distinguées :

- la partie la plus pluvieuse se trouve dans les zones occidentales de l'Ouche, du Perche et du Thymerais et correspond aux têtes de bassin versant de la rive gauche de l'Eure ;

- une partie centrale située dans l'axe médian du bassin versant de l'Eure principalement en rive gauche (Eure moyenne, Iton et Avre moyenne et aval, Blaise aval) qui est celle qui présente la plus faible pluviosité ;

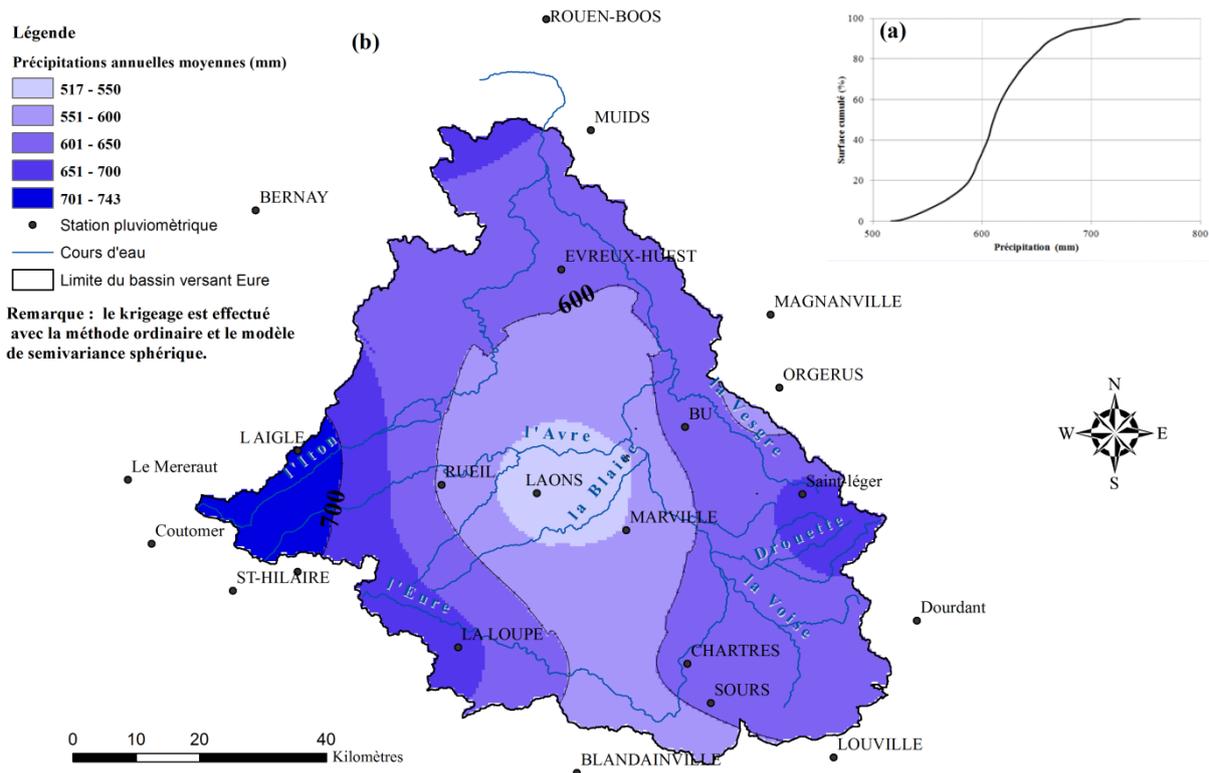
- une dernière partie orientale située en rive droite de l'Eure où nous retrouvons une pluviosité plus forte que dans la partie centrale et contribue dans les têtes de bassin à l'alimentation des affluents de rive droite (Voise, Drouette, Vesgre).

¹⁰ D'autres affluents de l'Eure, non étudiés dans ce travail, présentent des fonds de vallées étroites et peu développées dans les secteurs amont et des secteurs aval où nous avons un développement des zones inondables.

Avec une telle sectorisation pluviométrique, la première partie est peut être considérée comme une zone de ruissellement importante par rapport aux autres zones du bassin versant de l'Eure. Cette partie collecte le plus d'apports pluviométriques et intervient le plus dans l'hydrologie de surface du terrain d'étude. Tandis que les autres parties facilitent les procédures d'infiltrations, avec une pluviométrie moyenne à faible, qui sont soutenues par une topographie des plateaux ralentissant l'écoulement de surface en faveur de l'alimentation des nappes souterraines. Par ailleurs, le bassin versant de l'Eure est classé comme un bassin versant à faible apport pluviométrique (Pagney, 1988). La moyenne pluviométrique interannuelle calculée sur les 24 stations Météo-France en service sur la période 1965-2008 est faible : 641 mm¹¹ (figure A10). Cette lame d'eau est non seulement l'un des plus faibles apports pluviométriques du bassin versant de la Seine Aval,¹² mais également du territoire métropolitain. Pour la suite de ce travail, dans la modélisation RNA, la moyenne pluviométrique arithmétique sera utilisée, car elle correspond à la valeur moyenne pluviométrique spatialisée par krigeage⁸.

¹¹ Les 641 mm qui correspondent à la moyenne arithmétique des 24 stations pluviométriques est une valeur très proche à la moyenne pluviométrique calculée sur les données du krigeage de la figure A10 qui est de 642 mm.

¹² Le bassin versant de l'Eure est classé parmi les bassins qui ont un faible apport pluviométrique par rapport aux bassins versant de la Haute-Normandie (par exemple : 850 à 1050 mm pour le bassin versant de l'Andelle et 750 et 800 mm pour le bassin versant de la Risle) et aussi par rapport aux autres bassins métropolitains (par exemple : 1122 mm à Brest et plus que 1200 mm dans les Pyrénées (Pagney, 1988 ; Brunet, 1995 ; Egis-eau, 2009)



Source: SPC SACN & METEO FRANCE

O. KHARROUBI 2012

Figure A 9 Répartition pluviométrique (1965-2008) : bassin versant de l'Eure.

Cette pluviosité est toutefois affectée de très fortes variations interannuelles (figure A10) avec des valeurs supérieures à 800 mm (années hydrologiques 65-66, 74-75, 93-94 et 2000-2001) et des valeurs inférieures à 400 mm (75-76). En dehors de ces extrêmes, les apports moyens annuels présentent une grande variabilité. Les écarts à la moyenne peuvent atteindre -37,1 % pour une année sèche et +32 % pour une année humide. Nous observons ainsi des phases pluriannuelles sèches ou humides. Ces dernières, quand elles sont marquées par des extrêmes pluviométriques, correspondent aux périodes d'observations des principaux événements de crues dans le bassin versant de l'Eure.

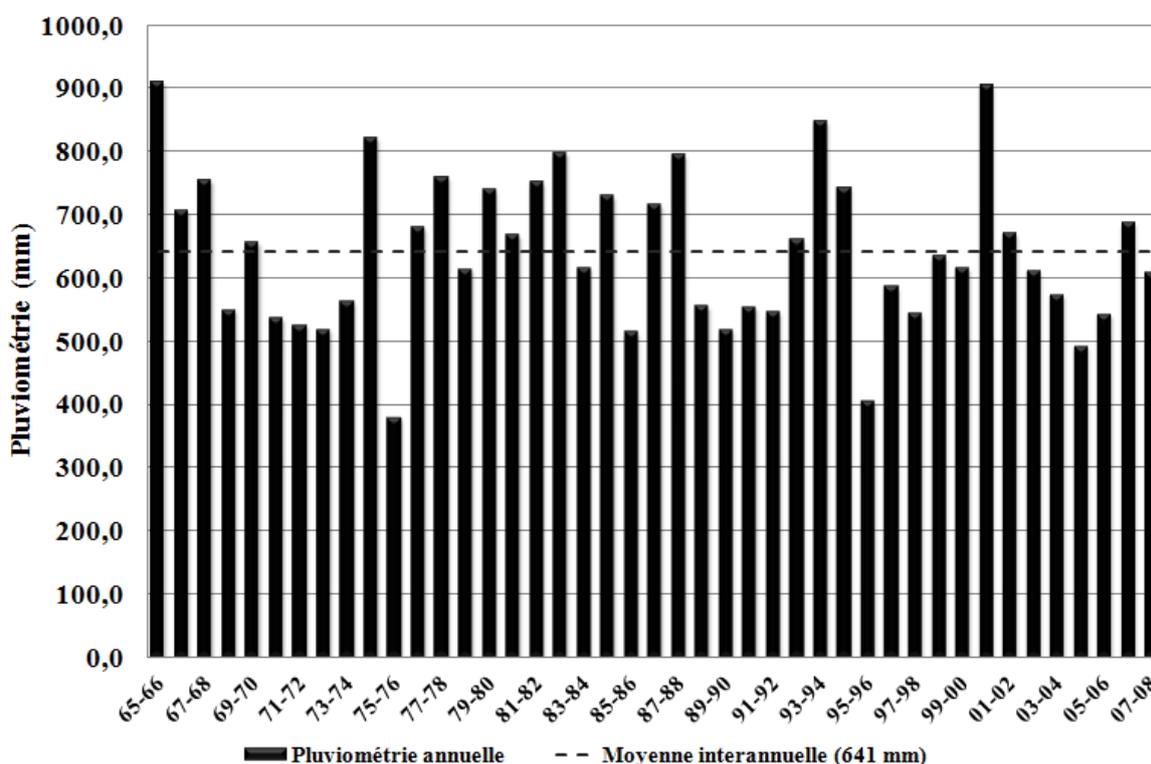


Figure A 10 Distribution interannuelle de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Eure (1965-2008)

La moyenne mensuelle des précipitations, qui est de 53,4 mm calculée sur la période 1965-2008), permet de comparer la variabilité saisonnière des pluies (figure A11). Nous observons des écarts à la moyenne mensuelle très faibles sur la période d'observation (de -17,8 % à +22,8 %) avec le mois le plus sec en juin et le plus humide en décembre. Cet écart indique une répartition homogène des précipitations au cours de l'année hydrologique donc un apport pluviométrique assez constant pour le bassin versant de l'Eure. Cette stabilité des apports est encore plus flagrante sur les données moyennes quotidiennes (figure A12). La pluviométrie du bassin versant de l'Eure est donc caractéristique de l'influence océanique, régulièrement influencée par le passage des masses d'air humide maritime (Beltrando, 2011). Les épisodes pluvieux les plus importants correspondent aux longues averses hivernales et aux fortes averses orageuses estivales bien que le nombre de jours de pluie soit assez constant d'un mois à l'autre (16 jours sont la moyenne des jours de pluie pendant le mois de décembre entre 1993-2008, figure A12). Durant l'hiver hydrologique, les précipitations sont liées à de longues périodes de dépressions propices aux cumuls de pluies déclenchant les crues majeures du bassin versant de l'Eure. De plus, le régime des températures renforce cette relation pluie débits extrêmes. En effet, la principale variation climatique saisonnière du bassin versant de l'Eure correspond à la variabilité des températures (figure A11) et donc de l'évapotranspiration.

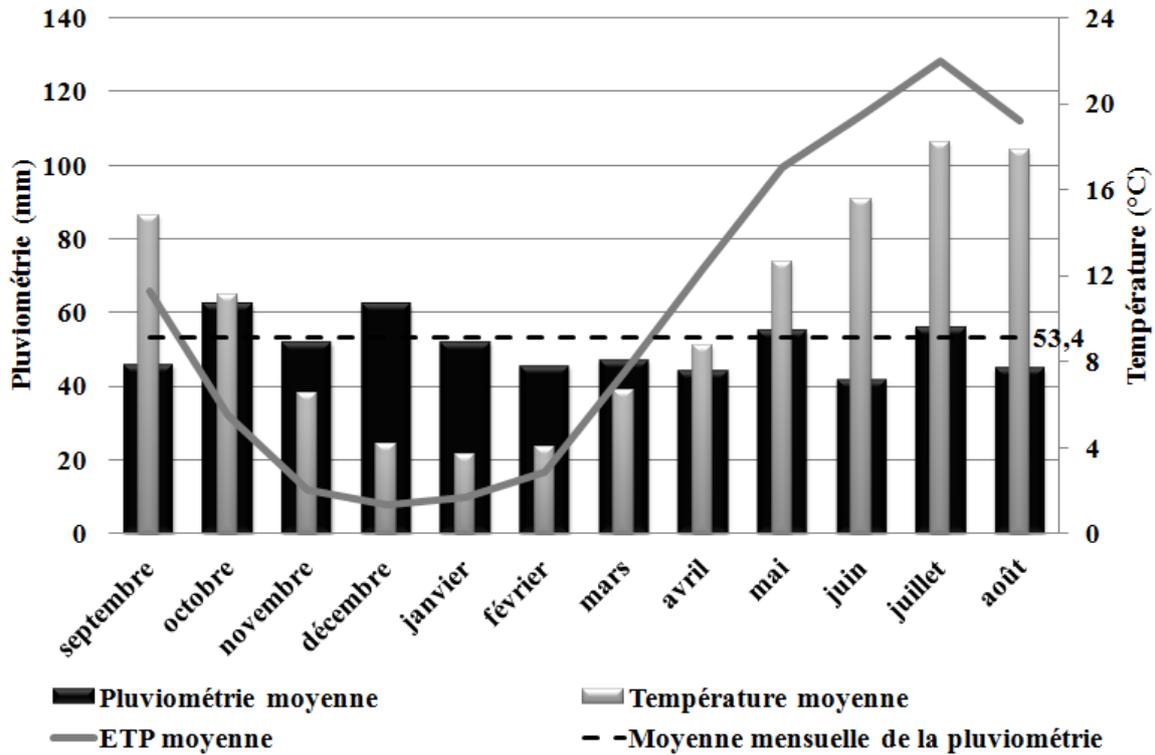


Figure A 11 Relation inter-saisonnière pluviométrie-température-évapotranspiration (1965-1995)

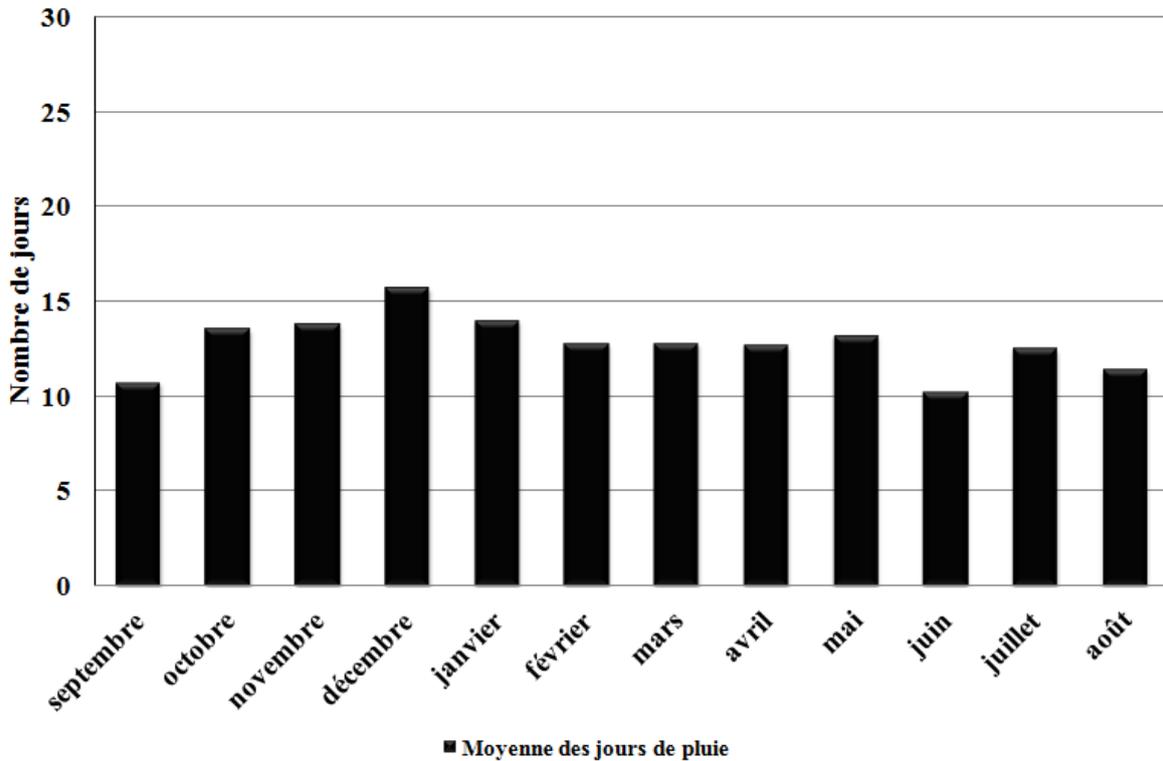
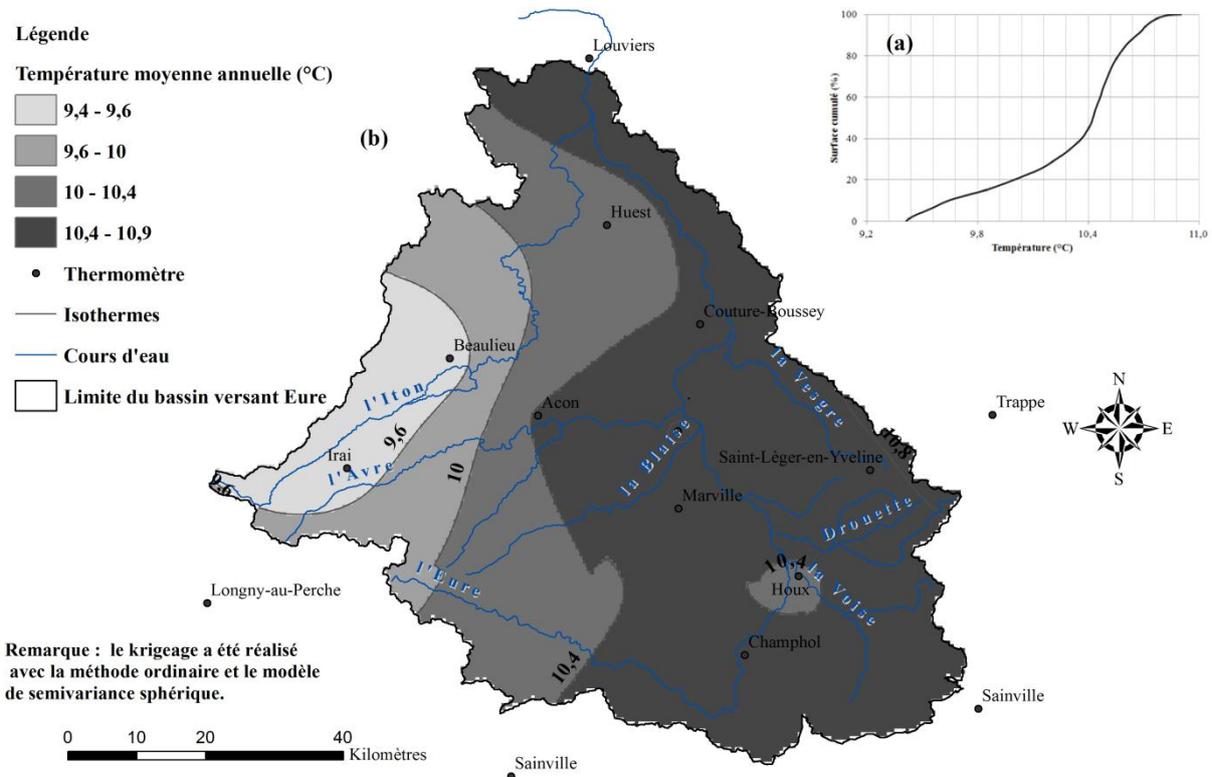


Figure A 12 Nombre mensuel de jours de pluie dans le bassin versant de l'Eure (1993-2008)

Le contexte climatique du bassin versant de l'Eure est donc de type pluvio-évaporal sous influence océanique (Masson, 2002). Dans ce bassin, c'est la variabilité de la température, donc de l'ETP, qui influence directement le régime hydrologique. En effet l'ETP

dépasse fréquemment les 400 mm/an au centre du bassin versant de l'Eure¹³ (exemple de la station Dreux qui a enregistré une moyenne de 757,8 mm d'ETP entre 1969-1995, Données Météo France, Masson, 2002). Elle contribue à la régulation et à la saisonnalité des débits. Ainsi, les périodes hivernales avec peu d'ETP, des pluies régulières et une recharge des nappes¹⁴ sont propices à l'occurrence des crues.

La distribution spatiale des températures moyennes annuelles suit globalement la répartition topographique du bassin versant (figure A13-b). Les zones les plus fraîches se localisent principalement à l'ouest du bassin (Ouche, Perche et Thymerais). Les zones des températures les plus élevées sont localisées au centre et à l'est du bassin versant (Drouais et Beauce). L'amplitude des températures est faible, environ 1,4 °C.



Source: SPC SACN & METEO FRANCE

O. KHARROUBI 2012

Figure A 13 Répartition spatiale de la température moyenne du bassin versant de l'Eure (1965-1995).

La moyenne interannuelle des températures calculée sur les 17 stations du réseau Météo-France sur la période 1965-1995 est de 10,3 °C (figure A14). Elle est caractéristique d'un climat sous influence océanique. Cette valeur varie très peu sur la période d'observation utilisée (figure A14). Les écarts varient entre -1 °C pour 78-79 jusqu'à atteindre +1, 5 °C pour 94-95. La relation température/pluviométrie dans le bassin versant de l'Eure semble aléatoire.

¹³Zaniolo, 2008

¹⁴ Les différents types des nappes sont détaillés dans I-3-2-.

Les années les plus froides (78-79 et 86-87) ont une pluviométrie moyenne dépassant les 600 mm et les 700 mm successivement ; tandis que 85-86 est une année froide avec une sécheresse hydrologique (apport pluviométrique égal à 500 mm).

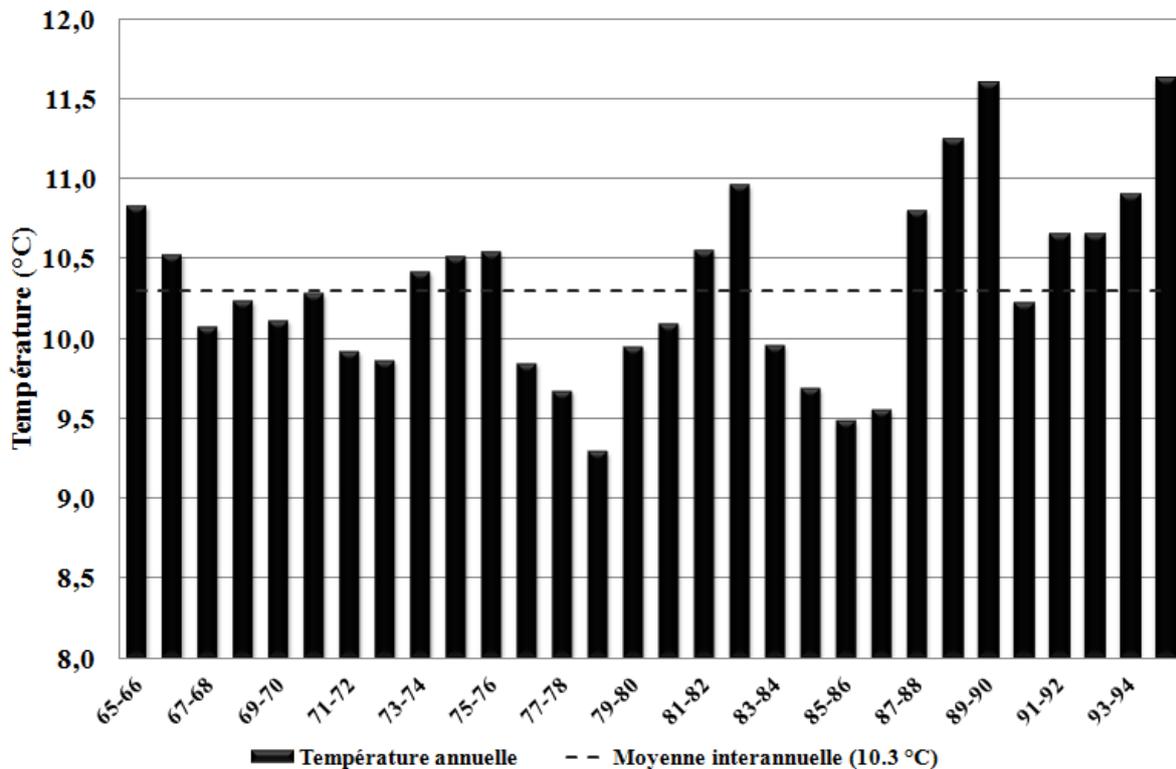


Figure A 14 Distribution interannuelle de la température moyenne (1965-1995)

Le rôle principal des températures sur le bilan hydrologique réside dans la variation saisonnière (figure A11). L’amplitude thermique atteint 14 °C (4 °C en hiver et 18 °C en été). Cette variation saisonnière influence les variations de débits à travers l’augmentation de l’ETP. Elle est assez basse entre octobre et mars, qui favorise nettement la disponibilité de l’eau. D’avril à septembre, l’augmentation des moyennes mensuelles provoque un accroissement de l’ETP dont la valeur peut dépasser les 120 mm pour le mois de juillet¹⁵. Elle est donc deux fois plus importante que la pluviométrie moyenne mensuelle, ce qui explique le fort déficit pluviométrique et les faibles débits observés dans les rivières du bassin versant de l’Eure durant la période estivale.

Conclusion

L’analyse de la climatologie du bassin versant de l’Eure démontre une forte dépendance de l’hydrologie du bassin versant de l’Eure vis-à-vis de la régulation thermique

¹⁵ Valeur moyenne calculée d’après les données ETP Météo France sur la période 1969-1995 et d’après les stations de Breteuil, Evreux-Huest, Champhol, Dreux et Senonches.

des apports pluviométriques. Le bassin versant de l'Eure dispose donc d'un contrôle pluvio-thermal. Cela explique une période d'abondance hydrologique en hiver, période préférentielle pour les crues, et de pénurie hydrologique en été, période avec des étiages parfois sévères. Cependant, un autre type de contrôle hydrologique participe également à la disponibilité en eau dans le bassin versant de l'Eure : l'hydrogéologie.

3- Contexte hydrogéologique

L'hydrogéologie du bassin versant de l'Eure est organisée en fonction de la succession géologique des principaux réservoirs hydrogéologiques. Cette organisation spatiale des aquifères est relativement homogène à l'échelle du bassin versant (Masson, 2002). Elle intervient dans l'écoulement souterrain, la recharge des nappes aussi sur l'écoulement de surface. La connaissance de la géologie de sous sol permet une description de la perméabilité des roches et donc savoir si les précipitations auront plutôt tendance à ruisseler ou s'infiltrer. Elle intervient globalement au niveau des montées de crues et leurs volumes, mais aussi le soutien apporté aux débits d'étiages.

3-1- Géologie du bassin versant de l'Eure

L'exploitation de la carte géologique au 1/1 000 000^e numérisée, des cartes 1/50 000^e de la France métropolitaine et de leurs différentes notices¹⁶ permet de connaître la plupart des formations géologiques de notre zone d'étude. Le bassin versant de l'Eure est principalement constitué par des strates mésozoïques en rive gauche et par une superposition de strates cénozoïques/mésozoïques en rive droite¹⁷, l'ensemble étant recouvert par des formations superficielles tertiaires et quaternaires.

Les formations Mésozoïques sont principalement constituées par les formations de crétacé supérieur (Masson, 2002) avec quelques rares strates (12 m) de jurassique (sables et grès de l'Ormoie) dans le sud-ouest du bassin versant. Dans le bassin versant de l'Eure les principales strates géologiques sont celles du Cénomaniens, du Turonien et du Sénonien. Elles sont constituées par des formations crayeuses à silex avec passages argileux, marneux ou sableux, dont des épaisseurs relatives de 30 m pour les formations cénomaniennes

¹⁶ Cartes géologiques en ligne : <http://infoterre.brgm.fr/>; les notices explicatives des cartes géologiques : Ménillet (1998) - L'Aigle (214) ; Lebret (1996) – Verneuil (215) ; Ménillet (1994) – Dreux (216) ; Ménillet (1971) – Nogent-le-Roi (217) ; Afchain (1975) – Rambouillet (218) ; Moguedet (1998) – Mortagne-sur-Perche (252) ; Moguedet (2000) – La Loupe (253) ; Gigot (1990) – Courville-sur-Eure (254) ; Ménillet (1971) – Chartres (255) ; Kuntz (1982) – Breteuil-sur-Iton (179) ; Kuntz (1977) - Saint-André-de l'Eure (180) ; Pomerol (1977) – Évreux (150).

¹⁷ Carte géologique de la France métropolitaine 1/1 000 000

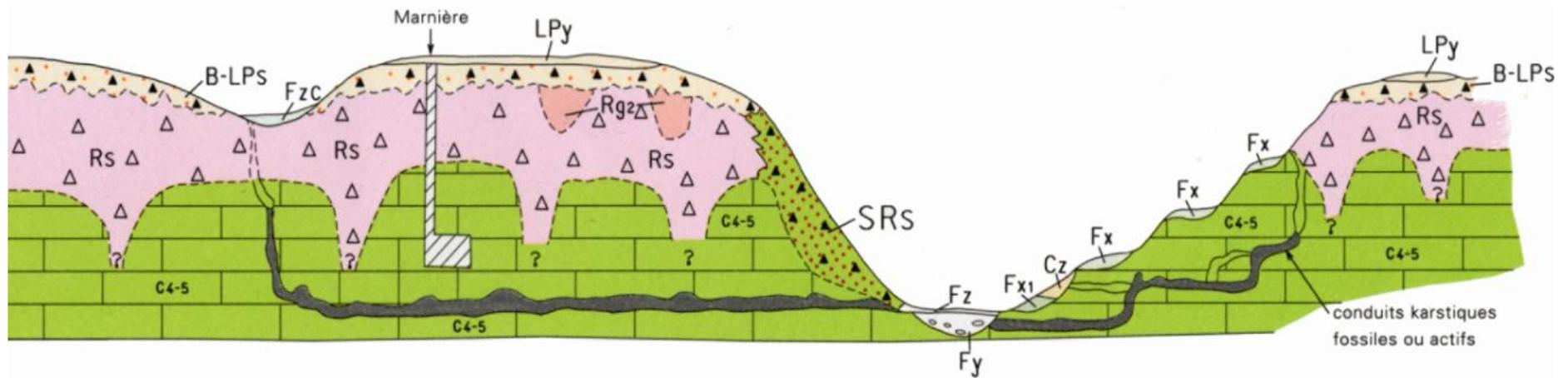
(Moguedet, 2000 ; Ménéillet, 1971), de 22 m pour les formations turoniennes (Kuntz, 1977 ; Pomerol, 1977) et de 30 m pour les formations sénoniennes.

Les formations cénozoïques se divisent en couches géologiques en place (rive droite du bassin versant de l'Eure) et en formations superficielles (principalement l'argile à silex). Pour les premières, il s'agit principalement des strates Eocène, Oligocène, Miocène et Pliocène. Cette succession de strates cénozoïques est d'une amplitude d'environ 100 m. Ces strates présentent globalement des faciès à base de sables (sables de Lozère argileux, sables de l'Orléanais et argile sableuse) d'une amplitude entre 10 et 25 m, de calcaires (calcaires de Beauce, calcaires d'Étampes, calcaire de Morancez, calcaire de Beauce, calcaires à caillasses et calcaires à Corbules) d'une amplitude moyenne de 15 m et de grès (grès de Fontainebleau et grès verts) avec des épaisseurs variantes entre 10 m et 70 m (Moguedet, 2000 ; Ménéillet, 1971 ; Kuntz, 1977 ; Pomerol, 1977). Les formations superficielles du Cénozoïque sont principalement représentées par l'argile à silex issue de la décalcification des terrains du secondaire (Quesnel, 1997). Elle recouvre tous les terrains en rive gauche avec une épaisseur de 20 m à 83 m (Quesnel, 1997). Elles sont localement recouvertes par des formations résiduelles tertiaires (sables de Lozère par exemple) ou quaternaires (limons des plateaux et loess) (Dewolf, 1981 ; Dewolf, 1983). Cette couche d'argile à silex, quand elle a été remaniée par les processus périglaciaires du quaternaire, prend alors le nom de biefs à silex.

Les faciès résistants des formations mésozoïques et cénozoïques (calcaires et craie principalement) présentent une fissuration et une fracturation importante en lien avec les accidents du socle sous-jacent et de l'activité tectonique de l'ouest du bassin de Paris (Masson, 2002 ; Ménéillet, 1998 ; Lebret, 1996 ; Kuntz, 1982 ; Pomerol, 1977).

Les formations quaternaires fossilisent l'ensemble des terrains mésozoïques et cénozoïques du bassin versant de l'Eure. Elles sont localisées sur les plateaux au-dessus des argiles à silex (limons à silex, limons argilocalcaires, grison¹⁸), sur les versants (manteau colluvial) et dans les fonds de vallée (glacis colluvion alluviale et alluvions) (figure A15). Comme dans la région parisienne, les faciès à base de limons sont minces et discontinus, ils peuvent atteindre 1 à 2 m en général et très exceptionnellement 5 m (Kuntz, 1977). Cependant, les colluvions et les alluvions sont assez épaisses par rapport aux limons avec des épaisseurs qui peuvent atteindre 10 m.

¹⁸ Pour les colluvions, ces faciès se situent généralement dans les vallées de l'Eure. Elles doivent leurs origines de la dynamique Quaternaire et leur mise en place est liée à des processus de ruissellement et d'érosion hydrique. Concernant les Grisons, ces formations présentent des faciès de transition entre le Tertiaire et le Quaternaire. Ce sont des sédiments riches en oxyde de fer et ils se caractérisent par une forte résistance.



Légende	
Fz : alluvions silto-argileuses (Holocène).	LPy : Loess (Pléistocène supérieur probable).
Fy : alluvions grossières (Wecheslien).	B-LPs : Limons à silex (Pléistocène).
Fx : alluvions grossières (pléistocène).	Rs : Formation résiduelle à silex, "argile à silex", (Tertiaire).
Fx1 : alluvions grossières (pléistocène moyen).	SRS : Formation à silex solfluée sur craie (Pléistocène).
Fzc : Colluvions silto-argileuses des vallées sèches (Holocène).	Rg2 : Formation résiduelle tertiaire sableuse (Oligocène probable).
Cz : Colluvion de bas de versant (Holocène probable).	C4-5 : Craie à silex, blanche à jaunâtre (Coniacien-Santonien indifférencié).

Figure A 15 Grands ensembles lithologiques caractéristiques du bassin versant de l'Eure (Source : BRGM, carte géologique de la France à 1/50000 n°215, modifié par Masson, 2002)

La structuration géologique influence très largement le cycle de l'eau du bassin versant de l'Eure en contraignant les transferts hydrologiques (infiltration, ruissellement) entre la surface et les réservoirs hydrogéologiques de la série sénonienne et des aquifères développés dans les terrains tertiaires.

3-2- Hydrogéologie

Les conditions géologiques ont rendu assez complexe la connaissance hydrogéologique du bassin parisien ainsi que ces sous-composantes (Mégny, 1976) et plus précisément le bassin versant de l'Eure. Une hydrogéologie intervenant directement dans le fonctionnement hydrologique en régularisant les ruissellements de surface à travers les taux d'infiltrations, en soutenant ou non les cours d'eau à travers l'échange des flux hydriques aquifères-rivières par l'intermédiaire des formations quaternaires au niveau des fonds des vallées, et aussi les échanges des flux entre les rivières par l'intermédiaire de la nappe crayeuse et les réseaux karstiques très développés dans le sous-sol du nord-ouest de l'Eure.

3-2-1- Principaux aquifères en lien avec l'écoulement de surface

L'aquifère crayeux constitue le principal aquifère dans le bassin versant de l'Eure. Il est développé dans la série cénomanienne et constitue le principal réservoir hydrogéologique de la zone d'étude pour l'écoulement de surface et pour les différents usages anthropiques de l'eau (Equilbey, 2004). Cet aquifère se comporte comme une nappe libre. Les autres types d'aquifère sont constitués par les réservoirs des calcaires et des sables de l'Éocène, qui sont localisés sur les plateaux de Madrie, constituant une superposition de nappes libres dont les exutoires alimentent la partie amont des affluents de rive droite. Un dernier type d'aquifère est celui des sables verts de l'Albien qui est situé sous la série cénomanienne. Il affleure dans le sud-ouest du bassin versant de l'Eure (Iton, Eure-amont) et le centre (Avre-aval), où il fonctionne comme une nappe libre, son comportement devenant captif plus en aval des têtes de bassin de rive gauche.

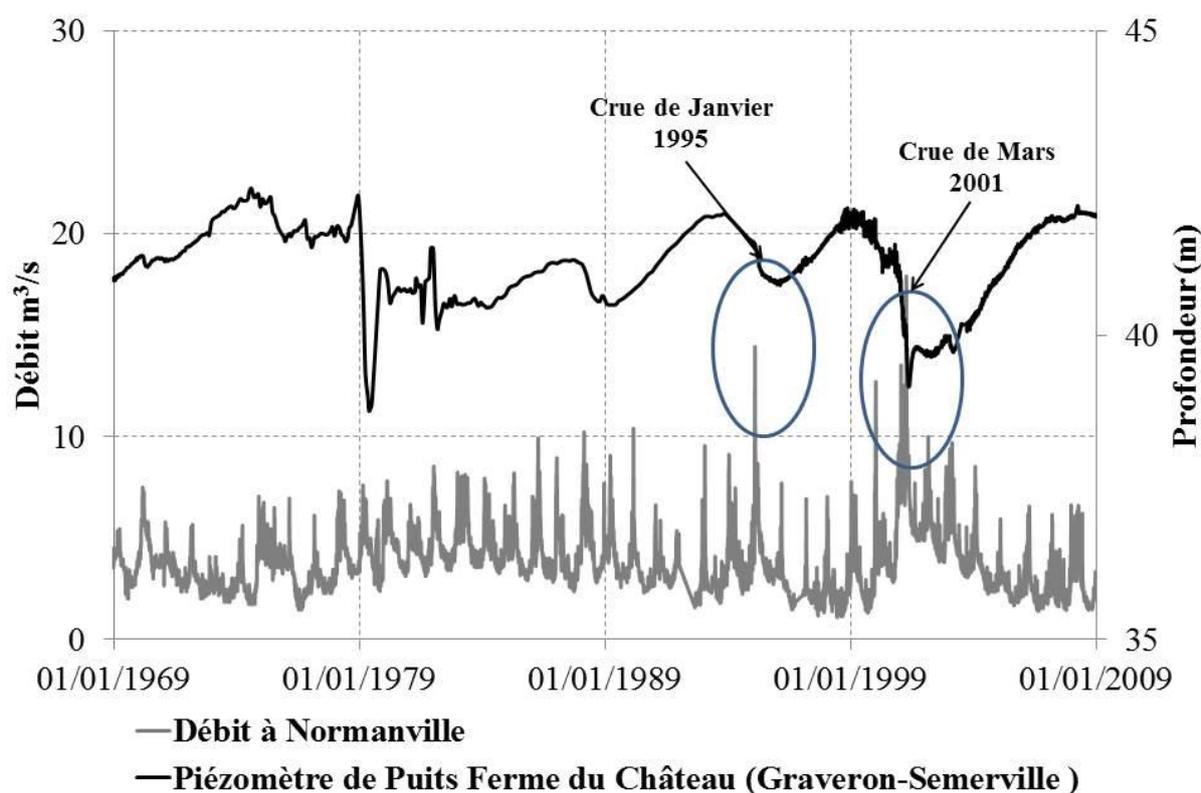


Figure A 16 Relation entre l'aquifère crayeux et l'écoulement de surface dans le bassin versant de l'Eure : exemple du piézomètre de Puits Ferme du Château (Graveron-Semerville) et la station Normanville (Iton).

L'aquifère crayeux est affecté par plusieurs accidents structuraux qui imposent des orientations préférentielles au drainage hydrogéologique. La flexure au niveau de la vallée de l'Eure et des accidents structuraux d'orientations NO-SE au Neubourg et à Saint-André-de-l'Eure sont responsables de l'approfondissement du réservoir souterrain crayeux vers le cours d'eau de l'Eure (Equilbey, 2004). Au niveau de l'Eure moyenne et de l'Eure aval, les assises crayeuses sont affectées par plusieurs ondulations anticlinales et synclinales qui se prolongent vers le nord sous la confluence Eure-Seine. Les accidents structuraux ainsi que les fissurations de la craie sont des secteurs préférentiels pour le drainage des nappes libres du bassin versant de l'Eure. Ils correspondent également aux principales zones d'écoulement de surface (réseau hydrographique) où ils jouent un rôle important dans la genèse des crues au niveau du bassin versant de l'Eure (Figure A16). Ils sont également caractérisés par une circulation rapide des eaux souterraines en raison de l'augmentation de la fissuration et de la fracturation de la craie qui s'ajoute à la porosité naturelle de la craie. Dans l'aquifère crayeux, la circulation hydrogéologique varie de 1 à 10 m/an pour une perméabilité de l'ordre de 10^{-6} m/s (Equilbey, 2004). Dans les zones de fracturation et de fissuration, l'eau circule avec des vitesses plus rapides (plusieurs dizaines à centaines m/an (Equilbey, 2004). Globalement, l'aquifère

crayeux a un bon rendement hydrogéologique (stockage et circulation), mais la couverture d'altération tertiaire et quaternaire (formations à silex) sur les plateaux limite sa recharge par infiltration.

Par contre, la fracturation et la fissuration du calcaire sont à l'origine de nombreux points d'entrée pour les eaux superficielles sur les plateaux : les bétoires (Moguedet, 2000). Ce sont des points d'alimentation importants pour la recharge de l'aquifère crayeux bien que ces bétoires soient le plus souvent partiellement colmatées par les formations résiduelles à silex (Quesnel, 1997 ; Laignel, 1997). La combinaison de bétoires et du réseau de porosité fracturation/fissuration des strates cénomaniennes a également structuré plus localement d'autres formes de circulation hydrogéologiques de type karstique.

3-2-2- Réseaux karstiques dans le bassin versant de l'Eure

Le bassin versant de l'Eure se caractérise par la présence d'un karst fossilisé par les formations en argiles à silex recouvrant de nombreuses strates en craie. Ce système karstique est mal connu et son influence dans les processus hydrogéologiques est peu documenté en raison des difficultés d'analyse de son fonctionnement (Rodet, 1992) sauf pour quelques secteurs très localisés : le Sec-Iton, Normanville/Cailly-sur-Eure et les pertes de l'Avre (David, 2009 ; Equilbey, 2004 ; Lebret, 1996 ; G. Kuntz 1982 ; Ferrey, 1894). Les manifestations karstiques apparaissent en contexte de plateau, de versant et de fond de vallée sous la forme de bétoires, de dolines et autres puits de dissolution des couches crayeuses (Thomas, 1995). Ce sont des ouvertures pluridécimétriques (fissuration, pertes), métriques (pertes, bétoires) à décimétriques (dolines) qui sont considérées comme les principales sources d'alimentation de la nappe crayeuse sur les plateaux. Leur fonctionnement dans la craie est marqué par des phases de réactivation, d'effondrement et de soutirage karstique qui modifient de manière aléatoire les vitesses de circulation de l'eau dans la craie (Masson, 2002). Sur les plateaux, les fortes précipitations ruissellent sur les argiles à silex et alimentent la nappe de la craie et le karst par les bétoires. Dans les fonds de vallée, ces phénomènes karstiques se manifestent essentiellement par une disparition (totale ou partielle) de l'écoulement de surface au profit des nappes de craie sous-jacente (Sec Iton, Avre, Meuvette, Gervaine, Rouloir amont ...). Elles perturbent aussi l'écoulement de l'Iton et l'Eure avec des flux souterrains. En effet, dès le 19^e siècle, E. Ferray a effectué des traçages hydrochimiques (fluorescéine) pour localiser et quantifier les transferts karstiques (Iton, Avre, Risle). Sur le bassin de l'Iton, ces tests ont permis d'identifier une liaison souterraine entre la vallée de l'Iton (commune de Normanville), l'Eure (les résurgences de Cailly-Sur-Eure).

L'importance des réseaux karstiques dans l'hydrologie de surface du bassin versant de l'Eure est estimée à partir de la forte capacité des sources et des résurgences : Bonneville-sur-Iton (1250 l/s), Gaudreville-la-Rivière et Glisolles (1050 l/s) à l'aval de Sec-Iton ; Hondouville (1180 l/s), de Cailly-sur-Eure (500 l/s) sur l'Eure moyenne (Equilbey, 2004).

Cependant, les volumes courants des flux karstiques restent globalement mal connus en raison du caractère aléatoire de l'activité du réseau karstique, de son colmatage par les argiles tertiaires et de l'absence suivie continue de son hydrogéologie. L'influence mal connue du karst est pourtant avérée dans les événements hydrologiques extrêmes (crues et étiages).

Conclusion

Le contexte hydrogéologique du bassin versant de l'Eure associe donc une hydrogéologie classique d'aquifère crayeux s'accompagnant d'un comportement localement karstique très influent sur la relation écoulements de surface-écoulements souterrains. Dans ce travail de recherche, en raison de la connexion entre l'hydrogéologie, parfois karstique, et les écoulements de surfaces, les données de débits utilisées pour la modélisation par RNA incluent déjà cette influence du contexte hydrogéologique.

II- Objectifs de la prévision des crues dans le bassin versant de l'Eure :

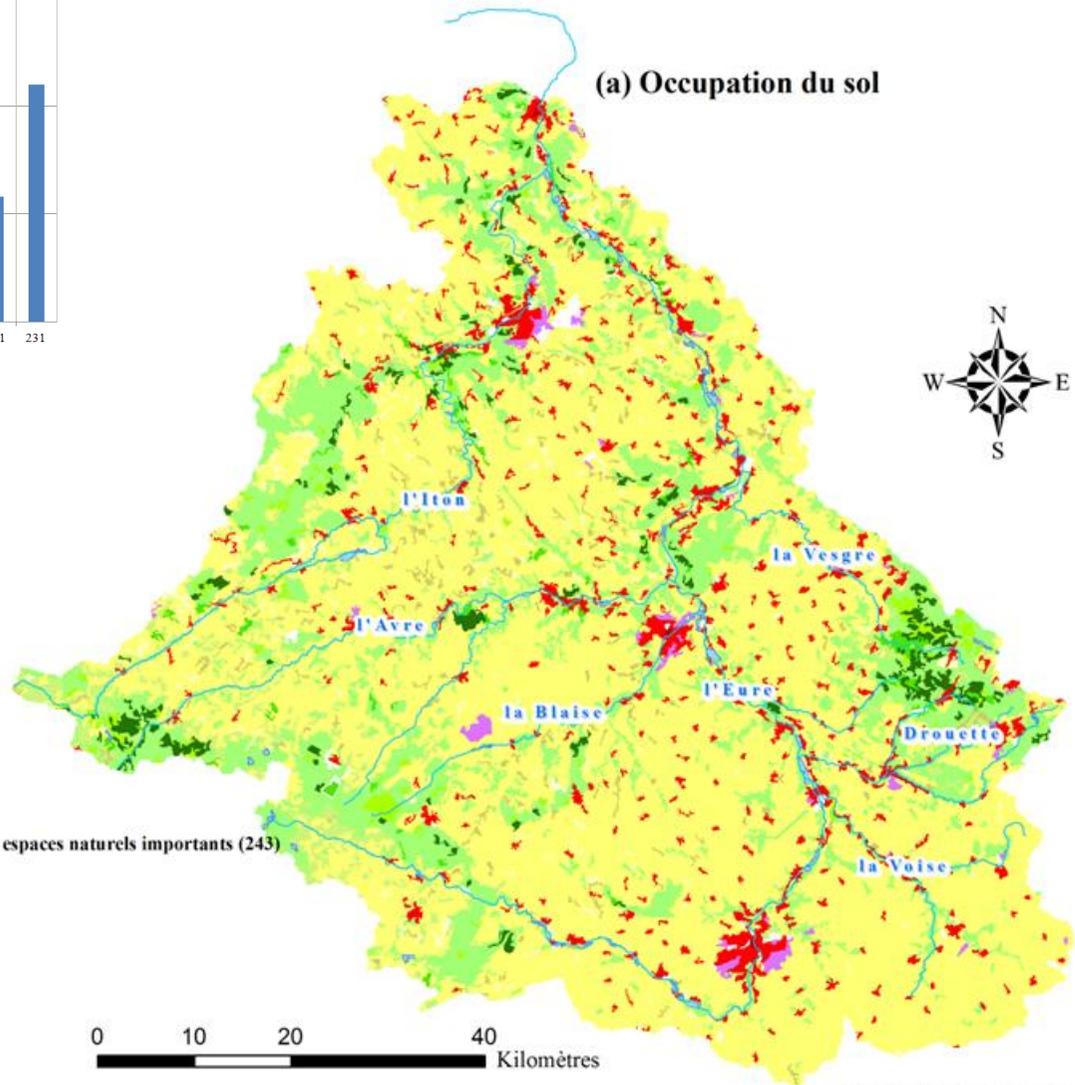
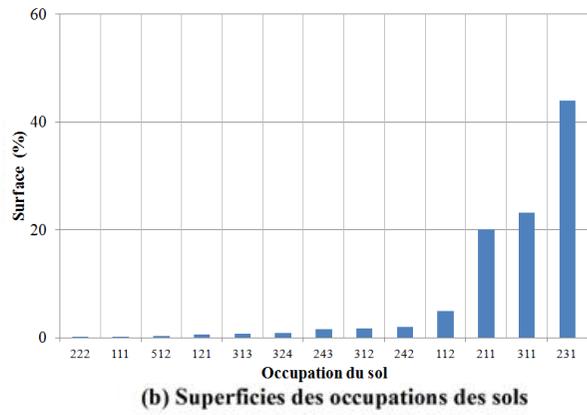
Il y a deux objectifs à la prévision des crues dans le bassin versant de l'Eure. Le premier consiste à proposer un système d'alerte qui permette la mise en sécurité des biens et des personnes. Le second, plus règlementaire, consiste à doter les services hydrométriques d'un outil de modélisation des extrêmes hydrologiques. Ces deux objectifs sont mis en œuvre par le SPC SACN pour les rivières Eure, Iton, Avre, les autres cours d'eau ne disposant pas d'enjeux socioéconomiques ou de surveillance hydrométrique appropriée. Le premier objectif est principalement celui de la maîtrise du risque de crue. Ce risque, perçu dans notre travail selon la définition de Metzger (2011), est centré sur la notion d'enjeu¹⁹. Le second objectif renvoie à la notion de service public et de mise à disposition d'outils de prévision et de prévention du risque hydrologique afin de remplir le premier objectif.

¹⁹ Selon ces auteurs, le risque est un rapport des aléas aux enjeux dans un milieu géographique. Son étude passe donc par l'étude de l'aléa, probabilité d'occurrence et d'intensité d'un phénomène dommageable, et de l'enjeu, estimation des pertes potentielles d'un territoire. Cette question de « ce que nous pouvons perdre » est obligatoire dans une étude de risque sinon il n'y a pas de risque (Metzger, 2011).

1- Enjeux du risque inondation dans le bassin versant de l'Eure

La spatialisation des enjeux socioéconomiques dépend de l'occupation du sol dans les zones exposées à l'aléa hydrologique. Dans le bassin versant de l'Eure, l'occupation du sol est globalement très structurée (figure A17), avec une prédominance agricole sur les plateaux, forestière sur les versants et urbaine dans les fonds de vallée. De fait, la majorité de la surface (94,37 %) est occupée par des territoires agricoles, des forêts et des surfaces en eau. Les espaces artificialisés se concentrent quant à eux dans les fonds de vallées (5,63 % de la superficie du bassin versant) pour une population totale de 723 946 habitants. Les 133 communes en zone de vigilance crue représentent une superficie totale PHEC de 180 km² sur l'ensemble du bassin versant de l'Eure. Ces communes et ces surfaces ne correspondent pas à la totalité des zones concernées par l'aléa inondation, mais seulement celles pour lesquelles le risque est identifié par le SPC SACN²⁰.

²⁰ En s'appuyant sur les dossiers de catastrophe naturelle et les données de PHEC disponibles.



Légende

Occupation du sol (code CLC)

- Tissu urbain continu (111)
- Tissu urbain discontinu (112)
- Zones industrielles et commerciales (121)
- Terres arables hors périmètres d'irrigation (211)
- Vergers et petits fruits (222)
- Prairies (231)
- systèmes culturaux et parcellaires complexes (242)
- surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants (243)
- Forêts de feuillus (311)
- Forêts de conifères (312)
- Forêts mélangées (313)
- Forêts et végétations arbustive en mutation (324)
- Plans d'eau (512)
- Cours d'eau

Source : SPC SACN (2008) & Union européenne-SOeS, Corine Land Cover (2006)

O. KHARROUBI 2012

Figure A 17 Occupation du sol et aléa d'inondation du bassin versant de l'Eure

À partir des trois couches suivantes : occupation du sol, communes en zone de vigilance et limite des PHEC, il est possible d'estimer sous SIG (figure A18) les enjeux du risque inondation dans le bassin versant de l'Eure. La superposition de la carte des plus hautes eaux connues depuis le 20^e siècle et la carte d'occupation du sol actuelle nous limite les zones soumises à risque de débordement dans le bassin versant de l'Eure.

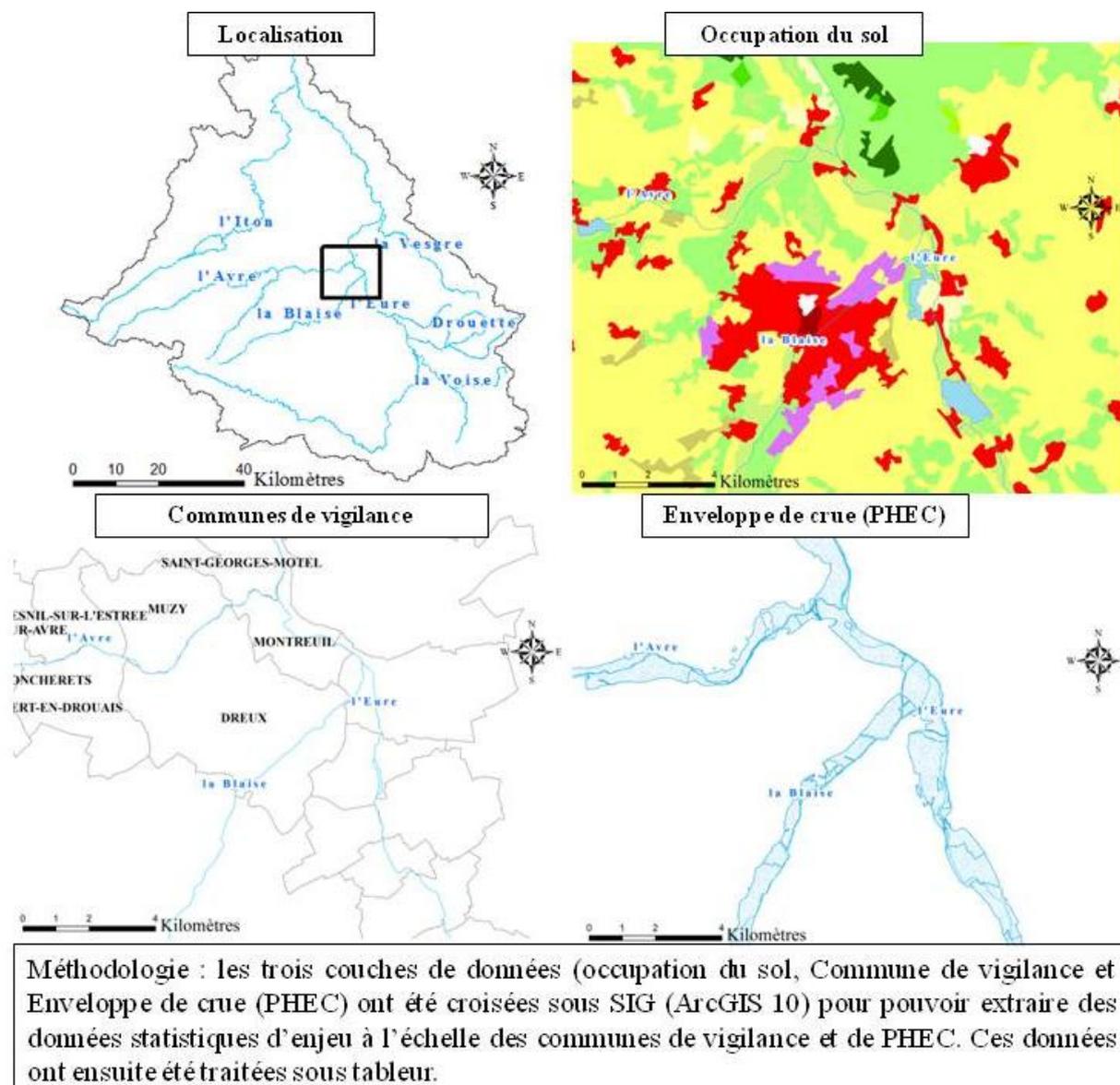


Figure A 18 Méthodologie d'extraction des données statistiques d'enjeu dans le bassin versant de l'Eure.

Les communes de vigilance SPC SACN concentrent 1403 km² du bassin versant de l'Eure soit 23,3 % du bassin versant de l'Eure. Ces communes exposées à l'aléa inondation concentrent donc une partie importante de la population du bassin versant (324 700 habitants soit 44,9 % de la PSDC du BV de l'Eure²¹). Les communes les plus peuplées (Évreux,

²¹ <http://www.recensement.insee.fr>

Chartre, Dreux²²) appartiennent à ces zones en vigilance continue. Les zones industrielles et commerciales en vigilance SPC SACN s'étalent sur 14,65 km² (1 % de la superficie) (figure A18). Les autres enjeux identifiés correspondent aux vergers, les parcelles de fruits et les systèmes culturaux. Ces derniers représentent 5 % de la surface riveraine totale en vigilance continue par SPC SACN. Le reste de la surface est dominée par les terres arables (753,5 km²) et les prairies (98 km²) avec 61 % des terrains totaux en vigilance continue. Tandis que les zones urbaines constituent juste 10 % du total de la zone en vigilance.

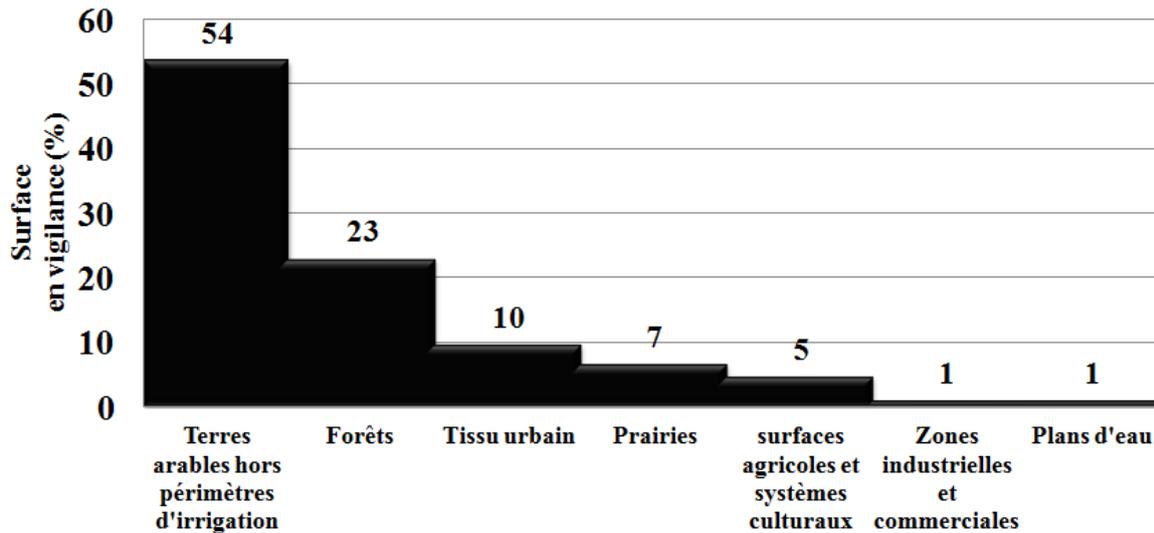


Figure A 19 Répartition des différentes occupations du sol dans les zones en vigilance continue SPC SACN

Les zones de PHEC présentent une superficie totale de 180 km² soit 12,8 % de la zone en vigilance SPC SACN. Les superficies les plus touchées par les inondations sont les terres arables et les prairies avec 62 % par rapport à la totalité de la zone inondable. Elles cumulent une superficie de 111,4 km². Les zones les plus touchées par les inondations historiques sont les zones de l'Eure-amont et l'Eure moyenne avec 115 km², dont 14 km² de tissu urbain (0,13 km² de tissu urbain continu) et 9 km² des milieux agricoles (figure A21-b). Cependant, l'Eure-aval présente 6,7 km² inondable en totales dont 2,2 km² comme zone urbaine. Les zones inondables dans les vallées de l'Iton et l'Avre sont essentiellement urbaines (1,6 km² et 2,4 km² respectivement) et des terrains arables (3,7 km² et 4,1 km²). Les zones urbaines, industrielles et commerciales touchées par les inondations constituent 16,5 % de la surface totale inondable (0,23 % en tissu urbain continu) (figure A20). Ces zones inondables sont estimées à une population de 52000 habitants²³ surtout que la plupart des villes importantes sont riveraines.

²² Avec respectivement 53 260, 40 420 et 31 610 ; d'après INSEE (2013).

²³ L'estimation de la population en zone de PHEC est basée sur le pourcentage des zones urbaines inondables par rapport aux zones urbaines en vigilance SPC SACN.

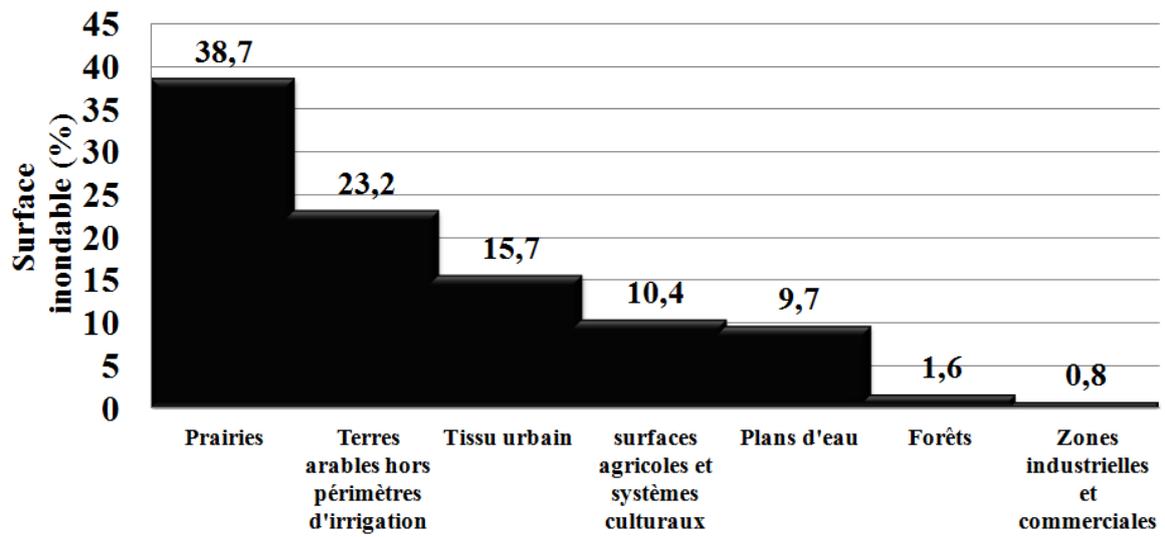
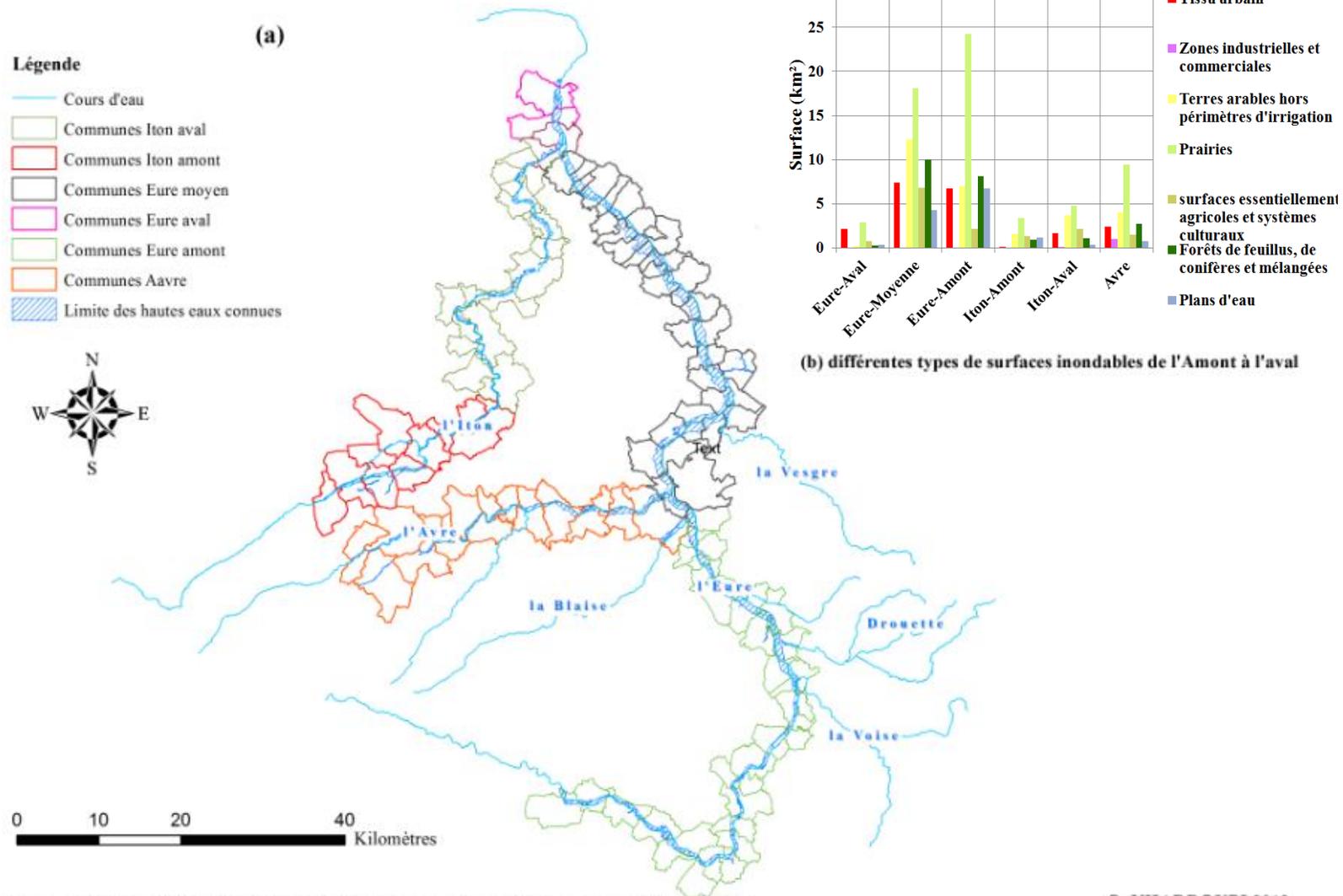


Figure A 20 Répartition des différents types d'occupations du sol dans les zones inondables



Source : SPC SACN (2008), DDE 27-28 (2007) & Union européenne-SOeS, Corine Land Cover (2006)

O. KHARROUBI 2012

Figure A 21 Secteurs touchés par les inondations de l'amont à l'aval

2- Prévision des crues: service « vigicrue » et projet PCBVE

La prévision des crues dans les principaux cours d'eau du bassin versant de l'Eure est obligatoire depuis la mise en place du système SCHAPI-SPC en 2003. La création de modèles numériques fiables est donc nécessaire pour la prévision des crues et l'alerte aux autorités publiques et aux services de protection civile afin de protéger les zones d'enjeu.

Cette prévision des crues est organisée en France par le SCHAPI (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations) et les SPC (Service de prévision des crues). Le SCHAPI est un service technique de l'État qui a plusieurs missions²⁴ et dont la création en 2003 est une action de l'État en lien direct avec les dysfonctionnements observés dans la prévision et l'alerte de la crue du Gard de septembre 2002²⁵. La création du SCHAPI a pour principal objectif de :

- renforcer le lien entre la prévision météorologique gérée par Météo-France et la prévision hydrologique gérée jusqu'alors par les DIREN (direction régionale de l'environnement) et les SAC (service d'annonce des crues).
- développer la prévision des crues et des inondations.
- assurer un soutien méthodologique aux SPC.

La réforme du système d'annonce des crues s'est organisée sur la période 2003-2007²⁶ avec la mise en route des SPC et de la procédure de vigilance crues en 2006. Le SCHAPI publie également une carte nationale et quotidienne de vigilance inondations sur le site « Vigicrue »²⁷ (figure A22) et participe au développement des logiciels de prévision des crues et des inondations mis à disposition des SPC. Cette carte fonctionne avec les mêmes principes que celle de « vigilance météorologique » de Météo France²⁸. Elle publie en continu l'état de vigilance d'environ 20 000 km²⁹ de tronçons hydrologiques prioritaires. Le choix de ces tronçons se base sur deux critères :

- les enjeux significatifs d'inondation au débordement des cours d'eau,
- la possibilité de réaliser des prévisions et de les transmettre dans des délais utiles aux services en charge de la sécurité civile.

²⁴ Tanguy, 2005

²⁵ Vinet, 2007

²⁶ JORF 2003, 2004, 2005 a-b-c

²⁷ www.vigicrue.gouv.fr

²⁸ <http://france.meteofrance.com/vigilance/Accueil>

²⁹ Toukourou, 2010

	Nature du risque	Conséquence
Vert	Situation normale, pas de risque de crues,	Pas de vigilance particulière.
Jaune	Risque de crues n'entraînant pas de dommages significatifs, mais nécessitant une vigilance particulière dans le cas d'activités saisonnières et/ou exposées.	Vigilance particulière pour les activités exposées.
Orange	Risque de crues importantes. Situation de crues, prévisible ou constatée, génératrice de débordements susceptibles d'avoir un impact significatif sur les personnes et les biens. Phénomène inhabituel.	Situation de crise potentielle.
Rouge	Risque de crues exceptionnelles ou majeures. Situation de crues, prévisible ou constatée, avec des conséquences importantes pour la sécurité des personnes et des biens. Phénomène rare et catastrophique.	Mise en oeuvre d'un dispositif de crise.

Tableau A 2 Niveaux de vigilance crue (Source : SPC SACN 2008)

La surveillance des tronçons hydrologiques vigicrue est effectuée par les SPC 365 jours par an et 24 heures par jours. Elle consiste à évaluer le franchissement de différents seuils d'alerte (tableaux A 2) en fonction des débits et des hauteurs mesurés par les stations hydrométriques du réseau automatique. La carte « vigicrue » contient aussi des informations supplémentaires pour chaque point de mesure (niveau d'eau, débit, évolution en fonction du temps...). Elle est actualisée quotidiennement deux fois par jour en condition hydrologique normale et plusieurs fois en cas d'évènements extrêmes. C'est donc un service stratégique en matière de prévention, d'information, de protection et de lutte contre les crues à destination des services de sécurité civile.

Les SPC sont des services déconcentrés, déployés dans les principales régions hydrologiques en France. Ils occupent une position intermédiaire entre d'une part le SCHAPI et d'autre part les services étatiques et les collectivités en charge de la gestion de crise hydrologique. Les SPC disposent également de compétences interdépartementales en matière de surveillance, de prévision et d'alerte hydrologique. Par rapport aux anciens SAC, les moyens des SPC sont renforcés (amélioration du réseau de mesure, mise à disposition des données à temps réels et d'outils informatiques de prévision hydrométéorologique) et leurs périmètres opérationnels correspondent aux limites de bassins versants.

Dans ce contexte fonctionne le SPC Seine aval-Côtiers Normands dans le bassin versant de l'Eure. Ce service contrôle en continu l'évaluation hydrométrique au niveau des stations de l'Eure et ces affluents, et suivant la situation hydrométéorologique, il annonce le

niveau de risque dans notre zone d'étude. Le fait d'annoncé en continu les niveaux de risques accentue les incertitudes dans les prévisions surtout que la modélisation hydrologique de l'Eure dépend de plusieurs paramètres physiques que hydrométéorologique temporels. Par contre, la collecte en continu des données consomme du temps et gonfle les charges financières³⁰. La durée de production hydrologique des prévisions s'accroît avec l'utilisation de plusieurs paramètres et diminue alors le temps de réflexion ainsi que le temps d'action des services de sécurité. Le SPC SACN se base, dans leurs prévisions quotidiennes à l'Eure, sur les données débitmétriques, limnimétriques et pluviométriques horaires en temps réel. Devant ces contraintes opérationnelles, le SPC SACN a proposé le projet de recherche « PCBVE » en collaboration avec la société d'ingénierie et consulting « IXSANE » et l'Université de Lille1 à travers le laboratoire « TVES » afin de créer un outil de prévision des crues. Cet outil sera utilisé avec les autres outils du SPC SACN dans le but de comparer et d'améliorer les prévisions et de réduire le niveau d'incertitude sur l'information hydrologique produite afin de bien déclencher l'alerte à destination des populations et des services de sécurité civile. Ce projet a pour but de généraliser les résultats de ce travail de recherche et de créer un modèle de prévision des crues pour les bassins versant de l'Eure, l'Iton et l'Avre. Ce modèle sera basé sur les techniques des réseaux neurones artificiels et produiront des résultats de prévision performante entre des horizons de prévision de 6 et 48 h. Cet outil doit produire des résultats avec de petites durées de calculs.

³⁰ Cas de la prévision hydrologique de la Seine au niveau de Rouen : le modèle consomme plusieurs mises à jour par an seulement de l'information topographique.

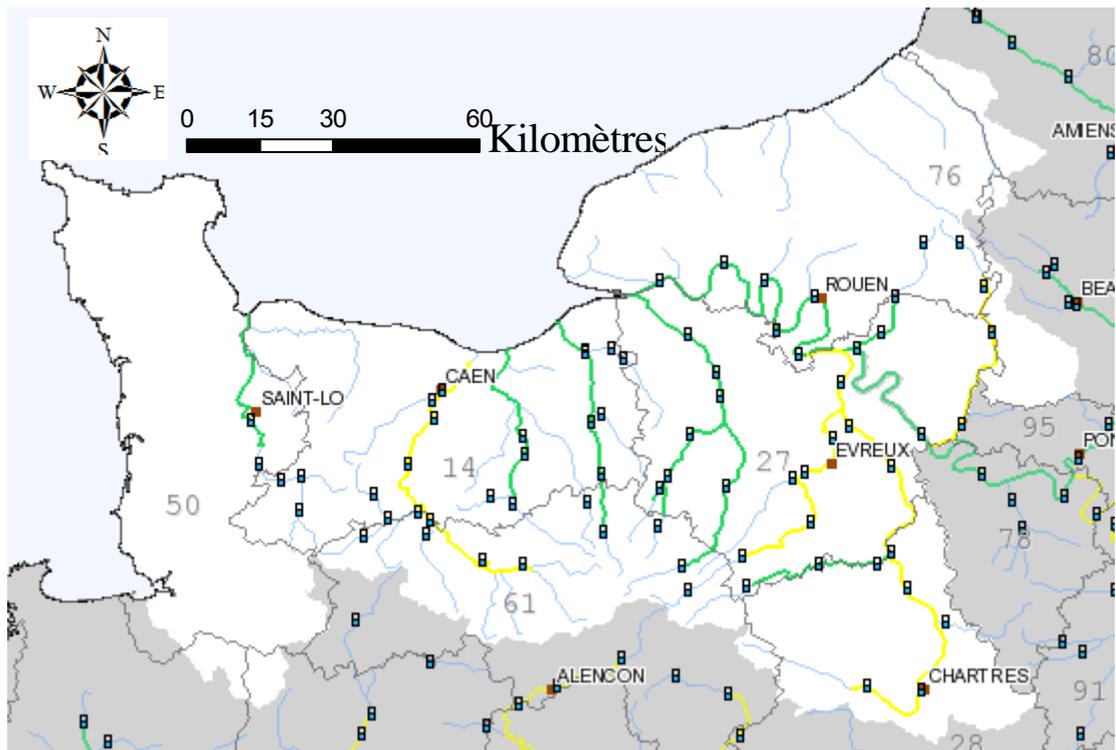


Figure A 22 Carte de la Seine aval-Côtièrs Normands de vigilance crue le 24 décembre 2012 (Source : www.vigicrue.gouv.fr)

Conclusion du premier chapitre

Cette première partie a permis de décrire le contexte géographique du bassin versant de l'Eure et des deux affluents principaux (Iton et Avre) étudiés dans cette recherche. Elle permet de mieux comprendre le comportement de l'hydrosystème Eure vis-à-vis des extrêmes hydrologiques. En effet, l'Eure est un bassin versant de plateaux crayeux à fonctionnement pluvio-évaporal avec un comportement hydrogéologique singulier, en particulier pour les échanges de type karstique. Les écoulements concentrés de surface, correspondent à un drainage naturel et gravitaire des nappes de la craie. Il y a donc une très forte influence de l'hydrogéologie sur le débit des cours d'eau par l'alimentation de l'écoulement de base.

Dans ce contexte physique, la répartition des enjeux laisse apparaître une forte concentration dans les secteurs de l'Eure moyenne à l'Eure Aval et dans les secteurs aval des vallées des principaux affluents avec 52 000 habitants, 28,2 km² de zones urbaines et 1,4 km² de zones industrielles et commerciales dans les zones de PHEC. Ces enjeux justifient la mise en œuvre d'une prévision des crues pour l'alerte et le suivi de la période de crise hydrologique afin d'organiser l'aide d'urgence et les services de secours.

Cependant, la mise en œuvre d'une prévision hydrologique passe par une analyse statistique fine des données hydrologiques : pluies, débits, piézométrie. Cette analyse, réalisée dans la deuxième partie de ce travail de recherche, permettra de qualifier la qualité des données disponibles et de quantifier le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Eure.

**CHAPITRE II. ANALYSE STATISTIQUE DES
DONNÉES CHRONOLOGIQUES ET
FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS
D'ÉTUDES**

Après avoir défini le contexte physique du bassin versant de l'Eure, nous abordons le domaine d'acquisition des données au cours duquel une étape de critique et de traitement statistique a été effectuée afin d'étudier la variabilité temporelle des différents paramètres hydro-climatologiques dans les bassins versants de l'Eure, l'Iton et l'Avre. Ces zones tempérées ont souvent des données quasi-continues avec des événements aléatoires. Elles se caractérisent par des fluctuations importantes entre années déficitaires et années humides. Cela rend délicat l'analyse statistique ainsi que l'analyse du fonctionnement hydrologique et ses extrêmes. Une délicatesse d'analyse hydrologique qui s'ajoute à la complexité enregistrée au niveau de la relation hydrologie-hydrogéologie. Afin de bien cerner l'hydrodynamisme des trois entités hydrologiques, nous allons analyser la variabilité temporelle des différents types de données abordés et étudier leurs fonctionnements hydrologiques ainsi que ses extrêmes.

I- Acquisition des données

Dans le bassin versant de l'Eure, plusieurs réseaux de surveillance hydroclimatologique ont été installés depuis le début du XXe siècle pour l'annonce de crue. Ces réseaux ont connu une évolution régulière, globalement trois générations principales ont été installées. Le premier réseau correspond à une lecture directe des variations journalières hydro-climatologiques par un observateur (installation d'une échelle sur les rivières et de collecteur gradué des pluies). Le deuxième réseau de mesure hydro-climatologique, installé à partir de 1965, correspond à une mesure automatique des pluies et des hauteurs dans les cours d'eau sans la présence d'un observateur. Et une troisième génération de réseau de mesure hydro-climatologique correspond à une modernisation et une fiabilisation de quelques stations du précédent réseau de mesure afin de les rendre interrogeables en temps réel. Dans ce travail de recherche, nous allons nous concentrer sur le système des mesures télétransmises (troisième génération) qui concerne les données pluviométriques, hydrométriques et piézométriques.

1- Description des réseaux de mesures

Les réseaux de mesures télétransmises correspondent à une modernisation et une fiabilisation de l'ancien système de mesure (deuxième génération). En effet, ce dernier concerne le réseau de mesure hydrométrique qui a été installé à partir de 1965, géré par le BRGM et la DIREN (Services des eaux et milieux aquatiques : SEMA) et compte seize stations (figure B-1). Contrairement aux échelles limnimétriques des SAC (système d'annonce des crues), ce réseau de surveillance hydrologique mesure les hauteurs d'eau sans la présence d'un observateur. Ces hauteurs sont d'abord relevées sur un limnigraphe, puis

sous format numérique dans les années 1990, et sont converties en débits³¹ grâce à une courbe de tarage établie par les SEMA des DIREN Haute Normandie et Centre. Par contre, les nouvelles stations modernisées télétransmettent leurs relevés à des services centralisés. Elles sont interrogeables en temps réel et fournissent des données à pas de temps horaire. Elles représentent une réelle avancée technique et pratique en matière de surveillance des cours d'eau par rapport aux autres types de réseaux.

Les différents systèmes d'observation hydrométriques partagent le même type de mesure, la hauteur d'eau ainsi que le débit, mais seul le dernier réseau est aujourd'hui utilisé pour l'alerte et le suivi des crues dans le bassin versant de l'Eure en raison de sa fiabilité et de son accès aux données hydrométriques en temps « quasi réel ». Concernant la pluviométrie et la piézométrie, leurs enregistrements sont effectués à travers des stations de mesure similaires (figure B-1). Le SPC SACN dispose d'un accès en temps « quasi réel » au réseau de mesures pluviométriques et hydrométriques.

³¹ Dix stations ont une mesure débitmétrique (voir tableau B-2)

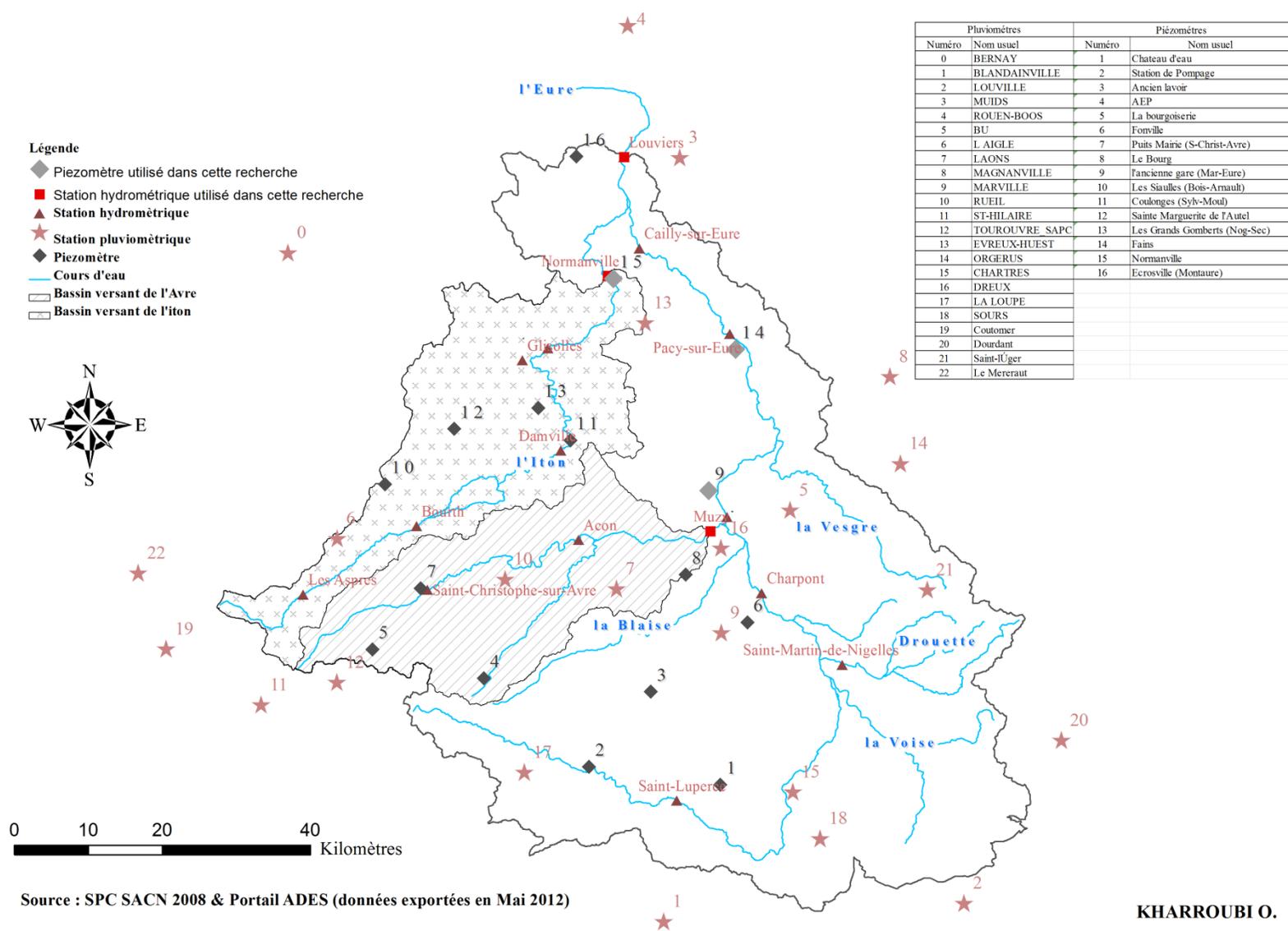


Figure B- 1 Localisation des différents types de stations dans le bassin versant de l'Eure

1-1- Données pluviométriques

Notre base de données pluviométrique comporte des enregistrements horaires de 23 stations pluviométriques qui sont réparties d'une façon homogène par rapport à la superficie du bassin versant de l'Eure (figure B-1). Ces stations ont différentes dates de mise en service et ainsi différentes périodes de couverture (tableau B-1). Elles ont un système de télémessure et sont interrogeables en temps réel. L'ensemble des données pluviométriques a été mis à notre disposition par le réseau Météo France à travers le SPC SACN de Rouen.

Station	Disponibilité des données	Département	Altitude (m)	Coordonnée (Lambert II)	
				X (km)	Y (km)
Marville	1991-2010	Eure-et-Loir (28)	151	528,6	2406,4
Rouen-Boos	1993-2008	Seine-Maritime (76)	151	516	2487,9
Chartres	1993-2010	Eure-et-Loir (28)	155	538,1	2385
Evreux-Huest	1993-2010	Eure (27)	138	518,4	2448
Dourdan	1993-2010	Essonne (91)	116	574,6	2392
Saint-Léger	1993-2010	Yvelines (78)	176	556,5	2412,2
Sours	1994-2010	Eure-et-Loir (28)	149	542	2378,8
Blandainville	1995-2010	Eure-et-Loir (28)	163	520,9	2367,7
Louville	1995-2010	Eure-et-Loir (28)	145	561,4	2370,2
Magnanville	1995-2010	Yvelines (78)	102	551,4	2440,8
Orgerus	1995-2010	Yvelines (78)	102	552,8	2429,2
Dreux	1996-2010	Eure-et-Loir (28)	133	528,6	2417,8
La Loupe	1996-2010	Eure-et-Loir (28)	200	502,1	2387,7
Bu	1996-2010	Eure-et-Loir (28)	132	538	2422,9
Courtomer	1997-2010	Orne (61)	223	453,7	2404,2
L'Aigle	1997-2010	Orne (61)	232	476,8	2419,1
Saint-Hilaire	2003-2010	Orne (61)	242	466,5	2396,8
Muids	2004-2008	Eure (27)	31	523	2470,1
Bernay	2004-2010	Eure (27)	166	470,1	2457,4
Laons	2006-2010	Eure-et-Loir (28)	171	514,3	2412,7
Le Merlerault	2007-2010	Orne (61)	236	449,9	2414,5
Tourouvre	2007-2010	Orne (61)	217	476,7	2399,8

Tableau B- 1 listes des pluviomètres et leurs principales caractéristiques

1-2- Données hydrométriques

La collecte des données hydrométriques au niveau du bassin versant de l'Eure a été effectuée par le SPC SACN et à partir de la Banque Hydro. La base de données contient des enregistrements en hauteur et en débit pour la plupart des stations (tableau B-2). Ces enregistrements, en fréquence horaire, sont collectés à partir de 16 stations implantées tout au long des cours d'eau principaux du bassin versant de l'Eure (figure B-1). Ils ont des systèmes de télémessure horaires installés essentiellement au niveau des principales villes du bassin

(Louviers, Normanville, Cailly-Sur-Eure,...) et ayant des périodes d'enregistrement différentes. Ces systèmes sont interrogeables en temps réel par les différents SPC.

Station	Cours d'eau	SBV (km ²)	CS	Altitude (m)	Disponibilité des données	Coordonnées (Lambert II)		Type de données
						X (km)	Y (km)	
Acon	Avre	495	H9202010	120	1972-2010	509,4	2418,9	H+Q
Muzy	Avre	880	H9222010	81	1971-2010	527,2	2420	H+Q
Saint-Christophe-sur-Avre	Avre	109	H9202020	177	2004-2010	489	2412,2	H+Q
Saint-Martin-de-Nigelles	Drouette	231	H9113001		1988-2010	545	2402,1	H+Q
Cailly-sur-Eure	Eure	4598	H9331010	21	1968-2010	517,6	2458	H+Q
Charpont	Eure	2050	H9121010	81	1984-2010	534,1	2411,7	H+Q
Louviers	Eure	5935	H9501010	11	1984-2010	515,5	2470,2	H+Q
Pacy-sur-Eure	Eure	4200	H9321010	41	1999-2010	529,9	2446,5	H
Saint-Georges-Motel	Eure	3580	H9301010	70	1999-2009	529,5	2421,9	H
Saint-Luperce	Eure	330	H9021010	154	1964-2010	522,7	2383,9	H+Q
Bourth	Iton	159	H9402040	183	2000-2010	487,5	2420,7	H+Q
Damville	Iton	352	H9402060	130	2004-2010	507	2430,9	H
La Bonneville sur Iton	Iton	787	H9402070	81	2003-2009	505,3	2444,6	H
Les Aspres	Iton	67,9	H9402050	216	2004-2010	472,2	2411,5	H
Normanville	Iton	1031	H9402030	46	1967-2010	513,3	2454,3	H+Q
Glisolles	Iton	236	H9403510	126	2003-2009	501,8	2442,9	H

Tableau B- 2 liste des stations hydrométriques et leurs principales caractéristiques

Avec **SBV** : superficie du bassin versant de l'Eure ; **CS** : code de la station ; **H** : hauteur et **Q** est le débit.

1-3- Données piézométriques

Les données piézométriques ont été collectées à travers le Portail ADES³². La base de données piézométrique se compose d'enregistrements journaliers de la profondeur moyenne de la nappe. Ces enregistrements sont effectués par 16 stations piézométriques de la région d'étude sur de longues périodes d'observations (tableau B-3). Ils sont consultables en temps

³² <http://www.ades.eaufrance.fr/>

réel à travers des systèmes de télémesure installés au niveau les différents piézomètres. Ces stations sont localisées principalement sur les vallées du bassin versant de l'Eure (figure B-1).

CS	Nom	Coordonnées (Lambert II)		Disponibilité des données
		X (km)	Y (km)	
02533X2003/PCAEP	AEP	496,6	2400,3	1994-2012
02542X0035/P	Ancien lavoir	519,1	2398,5	1994-2012
02548X0005/PFAEP	Château d'eau	528,5	2386,1	1994-2012
01801X0010/S1	Coulonges (Sylv-Moul)	508,3	2432,2	1985-2012
01245X0010/S1	Ecrosville (Montaure)	509,1	2470,3	1980-2012
01508X0133/S1	Fains	530,6	2444,5	1985-2012
02168X0001/PFAEP	Fonville	532,2	2407,8	1994-2012
02155X1040/F	La bourgoiserie	481,5	2404,2	1999-2008
01807X0051/S1	l'ancienne gare (Mar-Eure)	526,9	2425,5	1985-2012
02163X0015/P	Le Bourg	523,8	2414,2	1994-2012
01794X0035/S1	Les Grands Gomberts (Nog-Sec)	503,9	2436,6	1985-2012
01795X0011/S1	Les Siauxles (Bois-Arnault)	483,2	2426,3	1980-2012
01501X0002/F	Normanville	514,1	2453,9	1988-2012
02152X0051/P	Puits Mairie (S-Christ-Avre)	488,1	2412,4	2007-2012
01792X0020/PZ2	Sainte Marguerite de l'Autel	492,6	2433,7	2003-2012
02545X0048/FAEP	Station de Pompage	510,9	2388,5	1994-2012

Tableau B- 3 liste des piézomètres et leurs principales caractéristiques

2- Critique des données

2-1- Données pluviométriques

Le bassin versant de l'Eure est un bassin drainant une surface très étendue (5911 km² jusqu'à la station Louviers). L'une de ses caractéristiques est la variabilité climatologique spatiale (Masson, 2002). Actuellement, cette variabilité est bien couverte avec une dispersion homogène des stations pluviométriques. Cependant, entre 1992 et 2008, le nombre de ces stations change en continu (figure B-2). Ce changement peut provoquer une non-fiabilité du système de mesure vis-à-vis de la variabilité pluviométrique ainsi qu'une augmentation probable d'erreurs de mesures. Le réseau de mesure pluviométrique dans le bassin versant de l'Eure présente plusieurs limites pour la modélisation pluie-débit horaire :

- Les erreurs de mesure liées à la station pluviométrique qui sont dues essentiellement aux grandeurs d'influence (vent, température), aux caractéristiques et à l'état du cône de réception (chauffage, dégradation du revêtement du cône), à l'implantation du

capteur, à la résolution temporelle (temps que mettra l'auget à se remplir) et au défaut de maintenance.

- Les incertitudes issues du traitement des données avant la publication des mesures horaires.
- Le manque de données pluviométriques à pas de temps horaire qui couvrent les évènements hydrologiques avant 1991 dans le bassin versant de l'Eure.
- Le manque des pluviomètres horaires interrogeables en temps réel dans les zones à pluviométrie abondante pendant les crues extrêmes entre 1991 et 2008³³ (figure B-2).
- La présence des lacunes et des discontinuités dans les séries chronologiques pluviométriques³⁴.

Une des premières étapes de notre travail a consisté à combler les lacunes contenues dans les séries de mesures pluviométriques. Cette reconstitution des valeurs manquantes a été basée sur les données de la station voisine ayant la meilleure corrélation et en service pendant cette période. Et pour reconstruire ces valeurs, nous avons eu recours à une moyenne pondérée (Musy et Laglaine, 1992).

Cependant, ce réseau pluviométrique présente ces avantages :

- L'accès à des données à pas de temps horaire, télétransmises en temps « quasi réel » pour quelques stations (tableau B-1) qui facilite les étapes de la modélisation et de la prévision des crues en temps réel.
- Des outils numériques augmentent la fiabilité des enregistrements par rapport aux autres outils classiques.
- La disponibilité des enregistrements pluviométriques pendant les évènements hydrologiques prégnants³⁵.

³³ En effet, en 1991, il y avait une seule station « Marville » qui fait la télémesure horaire pour tout le bassin versant de l'Eure et qui est localisée au centre dans les vallées de la Blaise. À partir de 1993, le nombre de stations de télémesure horaire a augmenté pour atteindre sept unités. Pourtant, elles demeurent insuffisantes au niveau des sous bassins versant de l'Iton et de l'Eure-Amont où on a une pluviométrie abondante.

³⁴ Ces lacunes et ces discontinuités sont enregistrées la plupart du temps durant les périodes d'étiage et de sécheresse. Par contre, les stations de Dourdant et Dreux ont enregistré successivement 2 et 5 ans de dysfonctionnement entre 1997-1999 pour la première et entre 1999 et 2004 pour la deuxième).

³⁵ Nous notons une continuité de mesure horaire surtout durant les périodes pluvieuses concordant à des crues enregistrées dans les bases de données hydrométriques.

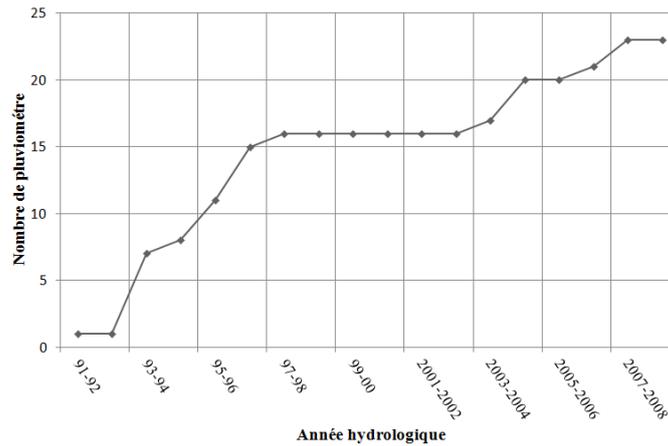


Figure B- 2 Évolution du nombre de pluviomètres

2-2- Base de données hydrométrique

La base de données hydrométrique mise à disposition par le service de prévision de crue SPC SACN est satisfaisante par rapport à la base de données pluviométrique. Cependant, les réseaux DIREN et SPC SACN mesurent également une hauteur d'eau qui est ensuite convertie en débit par une courbe de tarage. Ce type de mesure hydrométrique, en plus les erreurs inévitables de mesure, présente également plusieurs biais :

- Les erreurs d'hauteurs d'eau elle-même.
- Les erreurs de conversion des hauteurs en débits à travers une courbe de tarage elle-même entachée d'incertitude.
- Un phénomène d'hystérésis entre la phase de crue et de décrue qui implique une conversion des hauteurs en débits entachée d'incertitude.
- Un nombre de stations débitmétriques limité à dix au maximum en activité simultanée sur le bassin versant de l'Eure.
- Les données du réseau SPC SACN ne disposent pas de chroniques hydrométriques couvrant les principales crues du XXe siècle en particulier les crues de 1966.
- La qualité des débits archivés dans la Banque Hydro présente une variabilité interannuelle et entre chacune des stations du réseau (figure B-3). La grille d'évaluation qualitative des données propose ainsi des débits validés, mais considérés comme peu fiables, provisoires, invalidés (peu fréquent) et validés avec une bonne fiabilité.

Ce réseau présente cependant des avantages comme:

- L'accès à des données hydrométriques à pas de temps horaire, télétransmises en temps « quasi réel ».
- Une relation pluie-débit modélisable.
- Des outils numériques et une littérature scientifique abondante sur les traitements de ce type de données.

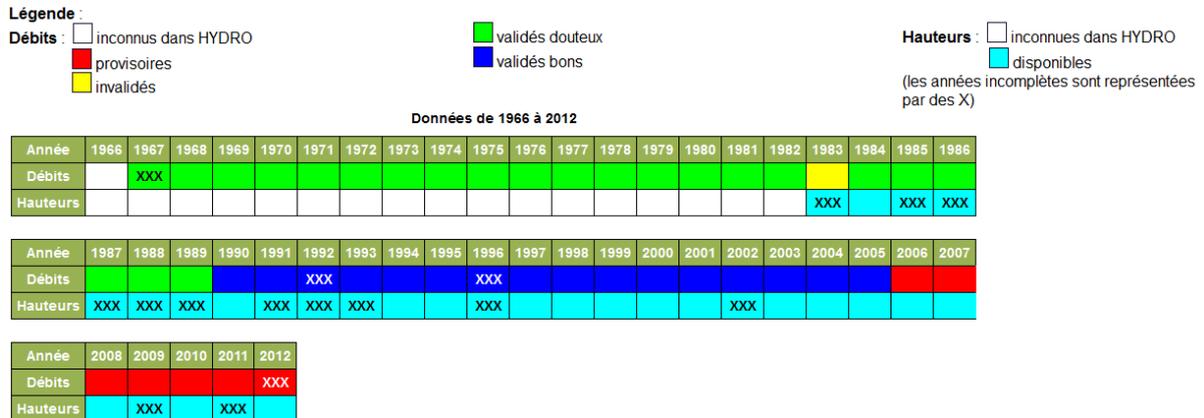


Figure B- 3 Exemple d'évaluation des chroniques hydrométriques (Banque Hydro)

Globalement, la qualité de la base de données hydrométrique récupérée est satisfaisante par rapport à la base de données pluviométrique. Elle présente une continuité des séries chronologiques pendant les différentes périodes d'enregistrements. Par contre pour la station Muzy, elle a été endommagée par une crue violente en janvier 1995 (Zaniolo, 2003), raison pour laquelle cette station a cessé de fonctionner pendant 3 ans. Cet incident a causé un déficit de données durant cette période et surtout un manque d'informations concernant un des plus importants évènements survenus dans l'histoire de l'Avre. De ce fait, nous avons ignoré les évènements manquants pour l'Avre, car leurs recréations numériques peuvent provoquer (comme toute modélisation numérique) l'existence d'erreurs dans les données corrigées. Ces erreurs peuvent perturber les procédures de la modélisation des crues au niveau de cette station avec un apprentissage parasité.

2-3- Réseaux de mesures piézométriques

La base de données piézométrique a été mise à disposition à travers le portail internet ADES³⁶. Les données peuvent avoir différents niveaux de validité (correct, non qualifié, etc.). En faite les données brutes sont traitées afin d'avoir des données élaborées et contrôlées à partir de synthèse. Plusieurs séries chroniques de profondeurs de la nappe présentent des

³⁶ <http://www.ades.eaufrance.fr>

données non-qualifiées même pendant le passage d'un évènement hydrologique (c'est le cas de la station Ecrosville pendant l'évènement de janvier 1995). Également, ces séries contiennent plusieurs lacunes. En effet, quelques périodes d'interruption et quelques jours sans observations ont été remarqués pendant certaines années et mois. La détermination des valeurs manquantes a été effectuée à partir des valeurs de la station la plus proche et qui présente le meilleur coefficient de corrélation surtout que la variation temporelle de la nappe est faible par rapport à une échelle journalière ou mensuelle.

II- Analyse statistique des données chronologiques

L'analyse statistique des séries de données pluviométriques est indispensable pour comprendre la variabilité temporelle de ces séries chronologiques sur la zone d'étude. Dans ce travail, l'homogénéité de la distribution spatiale des stations de mesure pluviométrique nous conduit à utiliser la pluviométrie moyenne sur les différentes zones d'étude pour estimer les apports pluviométriques au sein des bassins versants (Eure, Avre et Iton). La disponibilité et la qualité des enregistrements pluviométriques nous imposent une concentration sur la période 1993-2008.

1- Pluviométrie mensuelle

1-1- Bassin versant de l'Eure

La distribution des pluies moyennes mensuelles montre en général que les pluies atteignent leurs maximums pendant le mois de décembre avec 65 mm (figure B-4). Ce mois enregistre des valeurs extrêmes avec 25 % des maximums sont supérieures à 71,6 mm et pouvant atteindre 145,6 mm (tableau B-4). Par contre, la valeur mensuelle moyenne minimale est enregistrée pendant le mois de juin avec 42 mm. Généralement, en analysant la répartition mensuelle des valeurs moyennes, la pluviométrie est présente tout au long de l'année avec de faibles fluctuations entre 65 mm en décembre et 42 mm en juin. Cependant, l'activité orageuse accompagnée des pluies estivales abondantes n'est pas négligeable, elle se manifeste en mois de juillet avec une pluviométrie moyenne mensuelle de 62 mm (ce mois a la plus importante pluviométrie mensuelle entre 1993-2008 avec 158,2 mm et 25 % des extrêmes varient entre 75,1 et 158,2 mm).

1-2- Bassin versant de l'Iton

L'évolution de la pluviométrie mensuelle moyenne interannuelle au niveau du bassin versant de l'Iton indique que l'apport pluviométrique est continu tout au long de l'année avec une variation minimale entre le mois le plus pluvieux (décembre avec 74 mm) et le mois le

plus sec (aout avec 43 mm) (figure B-4). Le mois le plus arrosé a observé la pluviométrie mensuelle la plus importante entre 1993-2008 (183,9 mm) (tableau B-4). Les différentes distributions de la pluviométrie mensuelle moyenne des différentes entités climatologiques montrent que le bassin versant de l'Iton est le plus arrosée des sous-parties de l'Eure, principalement pendant les périodes hivernales. Cette distribution n'ignore pas la présence d'activités orageuses particulièrement durant le mois de juillet. Le bassin versant a 25 % des enregistrements mensuels supérieurs à 66,3 mm et qui peuvent atteindre 169,3 mm.

1-3- Bassin versant de l'Avre

La figure B-4 montre une distribution inter-mensuelle irrégulière de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Avre. Cette irrégularité a une faible fluctuation tout au long de l'année hydrologique entre un maximum en décembre avec 64,1 mm et un minimum en aout avec 38 mm. La valeur mensuelle maximale est enregistrée pendant le mois de décembre avec 142,1 mm (25 % des enregistrements varient entre 74,4 et 142,1 mm) (tableau B-4). Les périodes orageuses sont enregistrées avec une forte pluviométrie atteignant les 132,5 mm (25 % des valeurs maximales observées pendant juillet sont supérieures à 67,2 mm). Ces activités orageuses sont expliquées par la forte évapotranspiration notée dans le centre du bassin versant de l'Eure.

	BV Eure					BV Iton					BV Avre				
	Moy	Max	Min	3e Quar	ET	Moy	Max	Min	3e Quar	ET	Moy	Max	Min	3e Quar	ET
Septembre	45,7	122,8	5,6	82,6	41,6	44,9	121,3	7,1	64,5	34,1	46,5	107,4	7,3	74,6	32,1
Octobre	59,4	109,8	28,8	71,5	25,8	67,6	141,5	18,4	91,0	38,5	63,5	128,4	17,8	70,0	30,1
Novembre	46,9	82,2	13,0	61,4	21,3	58,1	123,5	9,4	71,6	30,2	52,4	101,0	17,1	59,2	25,3
Décembre	64,1	145,6	26,3	71,6	27,8	73,6	183,9	33,1	87,0	36,8	64,7	142,1	27,9	74,4	27,1
Janvier	52,4	117,4	9,4	63,4	30,0	59,2	107,5	6,2	79,9	30,4	51,8	96,4	7,7	69,5	26,9
Février	43,8	89,6	4,4	54,6	24,7	49,6	96,9	6,8	65,6	26,0	46,1	85,4	5,3	59,5	23,9
Mars	46,0	114,4	6,6	64,5	30,8	49,9	116,7	5,6	67,8	31,5	47,2	126,1	7,5	64,8	31,7
Avril	42,9	90,7	11,8	58,6	24,6	52,4	110,4	13,0	72,2	32,2	45,6	104,5	10,5	59,6	29,5
Mai	54,9	81,0	17,2	66,1	16,0	49,9	116,7	5,6	67,8	31,5	55,8	81,5	18,9	68,3	16,5
Juin	40,5	99,9	6,8	48,6	27,6	45,2	129,4	5,2	51,4	32,7	41,7	112,6	8,3	49,2	27,7
Juillet	57,4	158,2	13,8	75,1	35,8	63,5	169,3	9,8	66,3	39,8	62,0	132,5	28,0	67,2	33,0
Août	38,0	86,2	12,7	48,0	21,7	43,0	76,2	11,0	64,4	22,8	49,4	77,9	20,8	63,2	18,6

Tableau B- 4 Description statistique de la pluviométrie maximale mensuelle

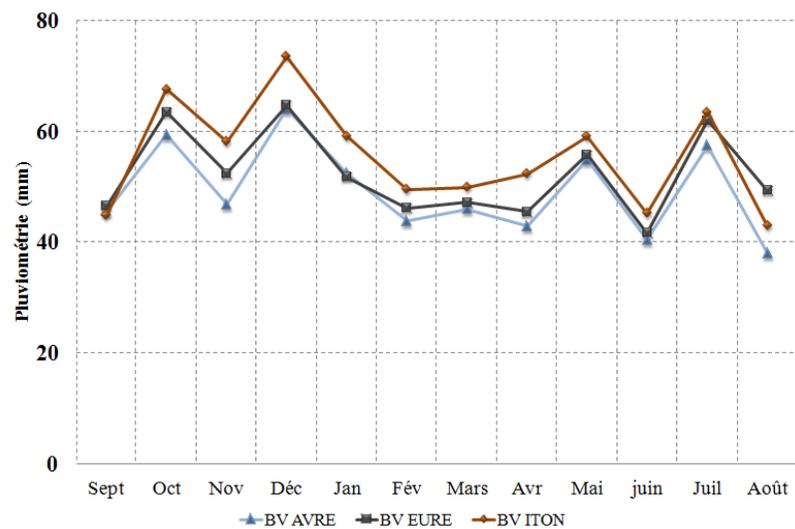


Figure B- 4 Pluviométrie moyenne mensuelle

2- Pluviométries annuelles

2-2- Bassin versant de l'Eure

La distribution interannuelle de la pluviométrie moyenne dans le bassin versant de l'Eure se caractérise par une alternance des années pluvieuses et sèches (figure B-5). L'année hydrologique la plus humide est 2000-2001 (903,8 mm) alors que celle la plus sèche est 1995-1996 avec 403 mm. Le bassin versant de l'Eure a enregistré 25 % des apports annuels entre 682,4 mm et 903,8 mm. La variation interannuelle pendant la période d'enregistrement 1993-2008, comparée par les autres bassins d'études Iton et Avre, est moyenne entre les bassins versant de l'Avre et l'Iton avec un écart type de 117,2 mm (tableau B-5).

2-3- Bassin versant de l'Iton

L'analyse des modules annuels et interannuels de la pluviométrie du bassin versant de l'Iton montre une évolution temporelle des précipitations avec des années humides interrompues par des années sèches (figure B-5). Ce bassin versant est le plus arrosé avec une moyenne interannuelle (659,7 mm) supérieure à celle de l'Avre et de l'Eure (tableau B-5). Entre 1993 et 2008, il a reçu la quantité de pluie la plus importante en 1999-2000 avec 940,1 mm et il a enregistré les apports les plus extrêmes avec 25 % des enregistrements supérieurs à 710,3 mm. 1995-1996 était l'année la plus sèche de toute la période d'enregistrement avec 270,4 mm. La variation interannuelle des modules annuels de la pluviométrie par rapport à la moyenne (659,7 mm) est importante par rapport aux autres bassins d'étude avec un écart type de 163,3 mm contre 117,2 mm pour l'Eure et 101,5 mm pour l'Avre.

2-4- Bassin versant de l'Avre

La distribution interannuelle de la pluviométrie moyenne annuelle est en alternance entre année humide et année sèche (figure B-5). Une irrégularité dans la distribution marquée par l'année la plus humide (1999-2000) avec 812,6 mm alors que l'année la plus sèche est enregistrée en 1995-1996 avec 436,6 mm de pluviométrie annuelle. Le bassin versant de l'Avre a une fluctuation interannuelle assez faible par rapport aux autres bassins d'études avec un écart type de 101,5 mm, ainsi il a tendance à se rapprocher le plus de sa moyenne interannuelle (tableau B-5). Il est le plus stable et le moins arrosé par rapport aux autres terrains d'études.

Bassin versant	Moyenne	Minimum	Maximum	Amplitude	3e Quartile	Écart-type
Eure	630,3	403,2	903,8	500,6	682,4	117,2
Avre	587,9	436,6	812,6	376,0	649,1	101,5
Iton	659,7	270,4	940,1	669,7	710,3	163,3

Tableau B- 5 Description statistique des pluviométries interannuelles

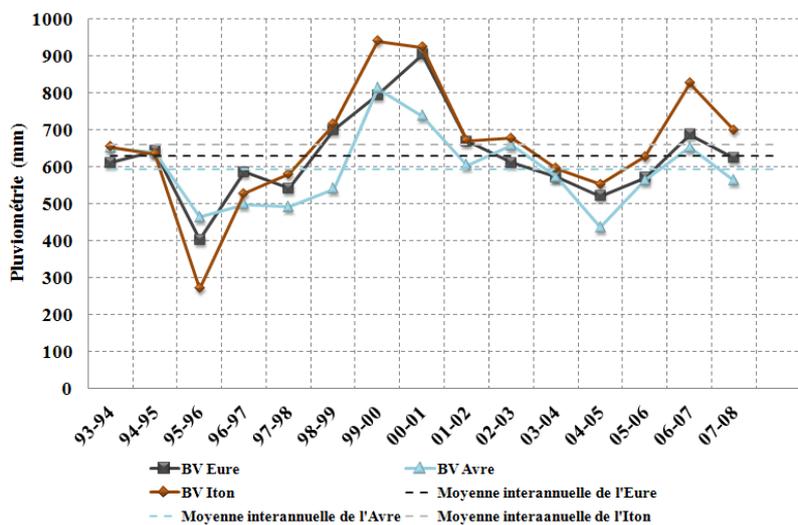


Figure B- 5 Pluviométrie moyenne annuelle

3- Débit mensuel

L'analyse statistique des données hydrométriques concerne les données de débit mensuel et annuel enregistré sur la période de 1993-2008 pour les stations Louviers (Eure), Normanville (Iton) et Muzy (Avre).

3-1- Station Louviers

Le régime d'écoulement dans le bassin versant de l'Eure est irrégulier. Les débits mensuels moyens varient entre $37,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en janvier et $18,9 \text{ m}^3/\text{s}$ en aout (figure B-6). Les débits maximaux les plus importants entre 1993-2008 sont observés durant le mois de janvier ($119 \text{ m}^3/\text{s}$), février ($118 \text{ m}^3/\text{s}$) et mars ($142 \text{ m}^3/\text{s}$) alors que ceux les moins importants sont enregistrés en juillet avec $13,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (tableau B-6). Les extrêmes de débit de Louviers sont observés entre janvier et mars avec 25 % des débits qui varient entre 52 et $142 \text{ m}^3/\text{s}$. Par contre, les périodes estivales sont marquées par des crues moyennes pouvant atteindre $53,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en juillet. Ces crues sont causées par les averses orageuses locales perturbant le régime hydrologique estival de l'Eure.

3-2- Station Normanville

Le maxima des débits mensuels moyens de la station Normanville est observé pendant le mois de janvier ($4,9 \text{ m}^3/\text{s}$) tandis que leur minimum est observé en aout ($2,5 \text{ m}^3/\text{s}$) (figure B-6). Cette évolution indique une progression moyenne du débit pendant les mois les

plus pluvieux : octobre, novembre et décembre. Pendant cette période, les nappes de craies et les formations karstiques ralentissent l'augmentation des débits jusqu'à leurs saturations pendant le mois de décembre. D'autre part, elles maintiennent, avec leurs états saturés, les écoulements entre janvier et avril (entre 4,9 m³/s et 4,6 m³/s) malgré la diminution des apports pluviométriques³⁷. Cette période de l'année est la plus marquée par des valeurs notables des crues (25 % des débits varient entre 7,6 m³/s et 17,9 m³/s) (tableau B-6).

3-3- Station Muzy

Les valeurs des débits mensuels moyennes enregistrées à la station Muzy notent un maximum en janvier avec 6,7 m³/s et un minimum en aout avec 2,35 m³/s. Elles ont une répartition saisonnière semblable à la répartition des stations Louviers et Normanville. Elles augmentent progressivement à partir de septembre pour atteindre leurs maxima en janvier. Dès mars, elles s'abaissent progressivement jusqu'à atteindre leurs minima en aout. Cette répartition explique la manifestation des crues extrêmes entre janvier et mars. 25 % de ces extrêmes varient entre 11,3 m³/s et 30,9 m³/s (tableau B-6).

³⁷ Cette partie sera détaillée par la suite dans le paragraphe III-2-

	BV Eure (station Louviers)					BV Iton (station Normandie)					BV Avre (station Muzy)				
	Moy	Max	Min	3e Quart	ET	Moy	Max	Min	3e Quar	ET	Moy	Max	Min	3e Quart	ET
Septembre	24,2	47,7	15,7	27,3	9,0	5,0	9,1	2,0	5,9	2,1	3,6	5,6	2,3	4,5	1,1
Octobre	32,0	53,9	17,5	43,3	12,7	4,7	8,7	2,2	5,0	1,7	4,7	7,2	2,0	6,6	2,0
Novembre	33,8	71,6	18,0	38,6	15,3	5,0	9,2	2,6	5,7	2,2	6,4	16,7	2,4	9,4	4,9
Décembre	47,3	90,8	23,4	56,3	20,9	6,7	12,8	2,2	7,9	2,8	10,5	19,9	2,6	14,3	5,8
Janvier	60,4	119,0	18,6	71,0	30,4	7,7	14,0	2,5	9,5	3,1	13,2	29,5	4,9	17,4	7,3
Février	53,2	118,0	23,6	57,8	24,2	7,1	12,7	2,9	7,9	2,5	11,6	25,5	3,7	14,4	6,0
Mars	52,0	142,0	18,1	52,0	29,0	7,4	17,9	3,9	7,6	3,2	11,3	30,9	2,5	11,3	8,1
Avril	41,0	116,0	16,4	44,9	23,2	6,2	12,5	2,8	7,8	2,5	8,1	17,6	2,5	9,5	4,4
Mai	32,1	63,9	18,0	35,7	12,9	5,6	9,4	2,4	6,3	1,8	5,9	14,4	3,0	6,6	3,2
Juin	26,2	39,4	16,9	30,1	6,6	4,7	7,4	3,1	5,9	1,5	4,2	6,0	1,9	5,4	1,5
Juillet	27,0	53,3	13,4	32,2	10,7	4,8	7,8	2,5	5,8	1,7	3,6	6,5	1,8	4,5	1,7
Aout	23,5	40,4	14,2	26,7	7,9	4,2	7,8	2,2	5,0	1,7	2,9	4,9	1,5	3,9	1,2

Tableau B- 6 Description statistique des débits maximums interannuels

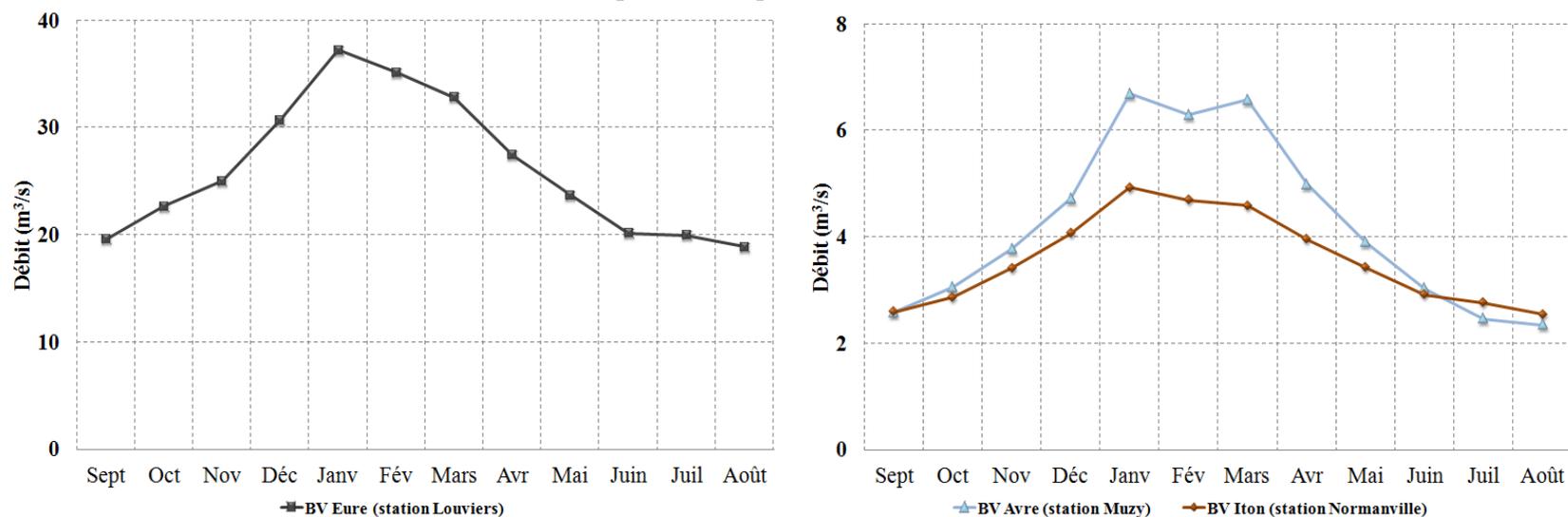


Figure B- 6 Débit moyen mensuel

4- Débit annuel

Nous allons nous intéresser à l'analyse de la répartition interannuelle des débits entre 1993 et 2008 pour les stations Louviers, Normanville et Muzy.

4-1- Station Louviers

Les enregistrements interannuels de débit moyen au niveau de la station de Louviers sont marqués par une évolution irrégulière entre les années hydrologiques 1993 et 2008 (figure B-7). Ils présentent une croissance des débits annuels moyens après des années de basses eaux jusqu'à atteindre un maximum interannuel en 2000-2001 ($50 \text{ m}^3/\text{s}$) puis commencer sa décroissance. Ils varient entre un maximum en 2000-2001 de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ et un minimum observé en 1996-1997 de $17 \text{ m}^3/\text{s}$. Les débits annuels maximums ont des valeurs annuelles entre 44 et $142 \text{ m}^3/\text{s}$ (tableau B-7). Un quart de ces observations annuelles varient entre 76 et $142 \text{ m}^3/\text{s}$.

4-2- Station Normanville

L'analyse des débits moyens annuels au niveau de la station Normanville montre une variation nette interannuelle au niveau de l'ampleur des crues (figure B-7). L'année où cette station a enregistré le plus d'étiage est en 1997-1998 avec $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Cependant, l'année hydrologique la plus mouvementée par les débits extrêmes est celle de 2000-2001 avec $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Les débits maxima annuels varient d'une année à une autre avec un maximum de $18 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2000-2001 et un minimum de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2004-2005 (tableau B-7). Cette variation est faible par rapport à la moyenne ($9 \text{ m}^3/\text{s}$). Elle a une tendance stable par rapport aux autres débits annuels de Louviers et Muzy avec un faible écart type interannuel ($3 \text{ m}^3/\text{s}$).

4-3- Station Muzy

Le régime hydrologique dans le bassin versant de l'Avre, selon les enregistrements annuels au niveau de la station Muzy, est irrégulier d'une année à une autre (figure B-7). En effet, les débits moyens annuels oscillent entre $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (2004-2005) et $8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (2000-2001). Concernant les débits maxima enregistrés annuellement, la plus élevée des crues est de $31 \text{ m}^3/\text{s}$ et la plus basse des maxima a été observée avec un débit de $9 \text{ m}^3/\text{s}$ (tableau B-7). Cette altération indique une tendance annuelle des crues dans les alentours d'une moyenne de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un écart type de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que nous avons 25 % des débits variant entre 19 et $31 \text{ m}^3/\text{s}$.

Station	Moyenne	Minimum	Maximum	3e Quartile	Écart type
Louviers	70	44	142	76	30
Normanville	9	7	18	10	3
Muzy	16	9	31	19	6

Tableau B- 7 Description statistique des débits maximums interannuels

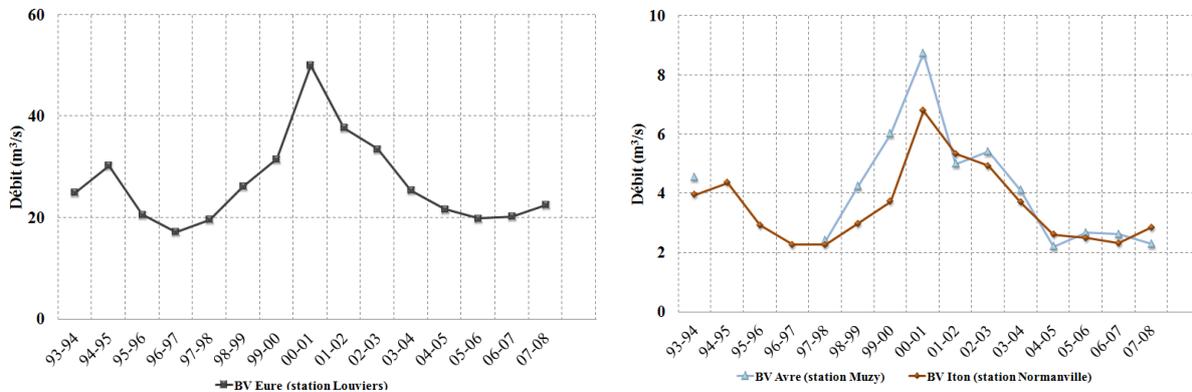


Figure B- 7 Débit moyen annuel

5- Piézométrie des bassins d'étude

L'analyse statistique des données piézométriques concerne les données enregistrées sur les puits du Fains, de l'Ancienne gare et du Normanville. Ces puits sont forés successivement sur les fonds des vallées des rivières et dans les alentours des stations hydrométriques de Louviers, Muzy et Normanville. Le choix de ces puits d'observations a été basé sur leurs positions aussi leurs qualités d'observation. Les données analysées sont mensuelles et annuelles.

5-1- Piézométrie mensuelle

5-1-1- Station Fains

Le régime d'écoulement souterrain dans le bassin versant de l'Eure est irrégulier (figure B-8). Les profondeurs mensuelles moyennes de la nappe par rapport à la surface du sol ont une variation saisonnière faible entre une valeur minimale en janvier de 1,43 m et une maximale en septembre et aout de 1,86 m. Cette variation marque des extrêmes de la remontée de la nappe enregistrés pendant le mois de janvier avec 25 % des enregistrements mensuels varient entre 0,53 et 1,26 m (tableau B-8).

Généralement, l'hydrodynamique de la nappe de craie de l'Eure entre 1993 et 2008 marque une légère croissance au niveau de sa remontée par rapport à la surface du sol et atteint un maximum en mois de janvier (même période de pic que les débits mensuelles moyennes de Louviers) puis elle diminue et perd de l'ampleur progressivement jusqu'au

atteindre des niveaux bas durant aout et septembre (mois des basses eaux enregistrées par la station hydrométrique de Louviers).

5-1-2- Station Normanville

La variation inter-saisonnière de la remontée de la nappe au niveau de l'Iton est instable (figure B-8). Les profondeurs mensuelles moyennes varient entre 5,87 et 6,61 m en janvier et septembre successivement. Les remontées extrêmes de la nappe de craie au fond de vallée de l'Iton se manifestent pendant le mois de mars avec 25 % des observations totales entre 1,16 et 5,58 m (tableau B-8). Au niveau de l'Iton, la nappe a le degré d'irrégularité le plus important par rapport aux autres bassins d'étude avec des écarts types entre 0,16 et 1,42 m. Ces irrégularités présentent sans doute l'influence de la présence fréquente de réseau karstique au niveau du bassin versant de l'Eure. Par contre, la nappe au niveau de l'Iton a le même type d'évolution que l'Eure et l'Avre. Elle se charge globalement par des apports pluviométriques en automne et en hiver pour atteindre leur saturation en janvier globalement (le pic de crue mensuelle au niveau de la station hydrométrique de Normanville) et après commence le déchargement et la décroissance jusqu'aux profondeurs les plus importantes de la nappe en septembre (l'un des mois de l'étiage de l'Iton à Normanville).

5-1-3- Station Ancienne gare

Au niveau de l'Avre, la nappe a une variation saisonnière faible de la profondeur (figure B-8). Elle présente une quasi-symétrie autour de janvier, février et mars. La profondeur mensuelle moyenne varie faiblement entre un maximum en aout de 6,51 m et un minimum en février de 6,21 m. Les extrêmes mensuels sont enregistrés pendant le mois de mars avec une remontée record de la nappe jusqu'à la profondeur 4,99 m pendant 1993-2008 (tableau B-8). L'évolution mensuelle moyenne de la nappe coïncide inversement avec l'évolution du débit sur l'Avre (station hydrométrique de Muzy). Lorsque nous avons une augmentation de la profondeur, le débit diminue et inversement.

	Piézomètre Fains (Eure)					Piézomètre Normanville (Iton)					Piézomètre de l'Ancienne gare (Avre)				
	Moy	Max	Min	1 ^{er} Quart	ET	Moy	Max	Min	1 ^{er} Quart	ET	Moy	Max	Min	1 ^{er} Quart	ET
Sept	1,83	2,00	1,61	1,78	0,11	6,58	6,78	6,30	6,46	0,16	6,44	6,98	5,89	6,28	0,33
Oct	1,71	1,98	1,40	1,59	0,18	6,55	6,79	6,08	6,47	0,24	6,41	6,95	5,88	6,13	0,34
Nov	1,63	1,93	1,17	1,58	0,21	6,30	6,77	4,35	6,34	0,70	6,42	6,95	5,80	6,27	0,35
Déc	1,54	1,92	0,87	1,48	0,24	6,09	6,76	3,65	6,27	0,97	6,36	6,80	5,51	6,23	0,41
Janv	1,31	1,76	0,53	1,26	0,40	5,51	6,74	3,73	4,79	1,02	6,18	6,76	5,43	5,81	0,43
Fév	1,37	1,67	0,60	1,30	0,30	5,68	6,50	2,95	5,12	1,02	6,16	6,71	5,31	5,67	0,47
Mars	1,45	1,67	0,54	1,45	0,29	5,65	6,72	1,16	5,58	1,42	6,14	6,73	4,99	5,91	0,57
Avr	1,51	1,73	0,77	1,41	0,24	5,99	6,72	2,40	5,86	1,09	6,20	6,76	5,00	5,94	0,50
Mai	1,66	1,87	1,34	1,62	0,15	6,33	6,77	4,47	6,28	0,58	6,26	6,83	5,39	5,95	0,42
Juin	1,74	1,91	1,55	1,67	0,12	6,41	6,78	5,28	6,34	0,37	6,36	6,85	5,70	6,10	0,37
Juil	1,81	1,98	1,57	1,77	0,12	6,47	6,80	6,11	6,36	0,22	6,40	6,85	5,73	6,12	0,35
Aout	1,83	2,01	1,60	1,78	0,12	6,54	6,80	6,22	6,43	0,19	6,48	6,98	5,77	6,09	0,40

Tableau B- 8 Description statistique des profondeurs minimales mensuelles

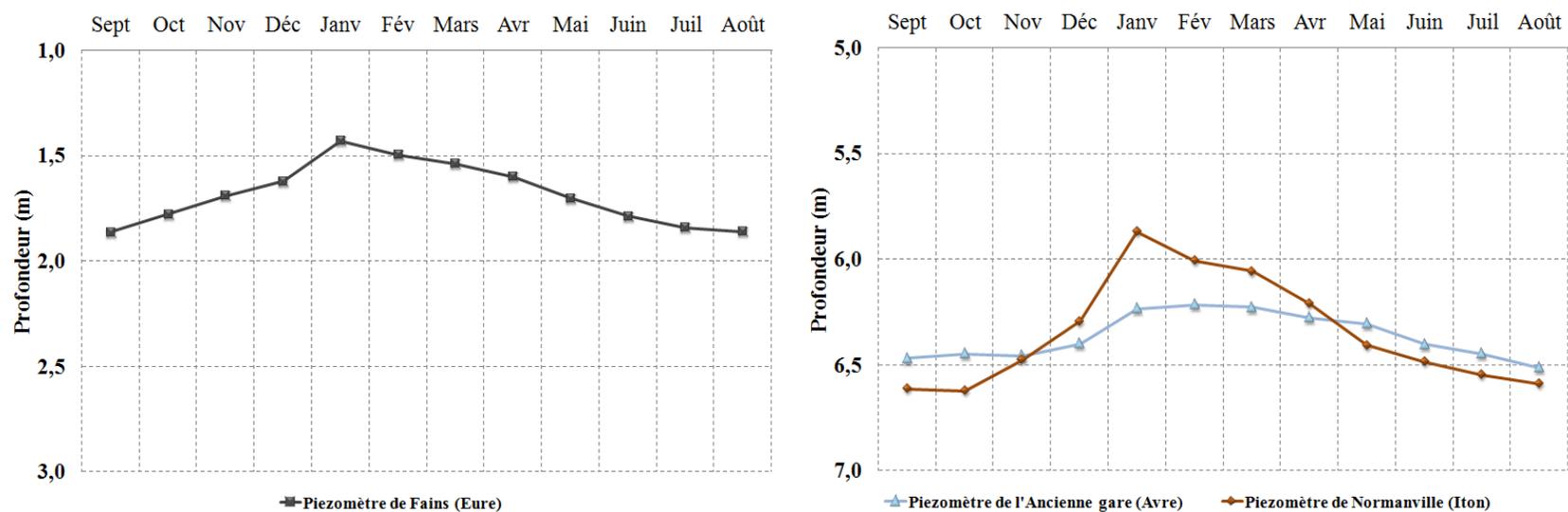


Figure B- 8 Profondeur moyenne mensuelle de la nappe

5-2- Piézométrie annuelle

Nous nous intéressons ici à l'analyse de la répartition interannuelle de la profondeur entre 1993 et 2008 pour les forages d'observation Fains, Ancienne gare et Normanville.

5-2-1- Fains (Eure)

La variation interannuelle des moyennes de niveaux maximums de la nappe annuelle indique une instabilité des variations de sa profondeur (figure B-9). Ces profondeurs annuelles varient entre une année hydrologique de saturation de nappe avec une valeur de 1,19 m en 2000-2001 et une année hydrologique de bas niveau avec un minimum de 1,82 m en 2005-2006. La progression de profondeur minimale de la nappe au fond de vallée de l'Eure indique une variation plus importante, par rapport à la moyenne interannuelle (1,23 m), qu'au niveau des piézomètres « Normanville » et « Ancienne gare » avec un écart type de 0,38 m (tableau B-9). Ces profondeurs oscillent entre 0,53 et 1,56 m.

5-2-2- Normanville (Iton)

L'analyse des moyennes des profondeurs minimales annuelles au fond de vallée de l'Iton à Normanville montre une variation nette des niveaux de la nappe (figure B-9). La profondeur piézométrique évolue irrégulièrement entre les années hydrologiques sèches et humides. Elle est minimale avec une profondeur de 4,41 m (2000-2001) et maximale avec une profondeur de 6,65 m (1997-1998). Les minima interannuels varient entre 1,16 et 6,34 m, une variation indiquant la haute complexité des réseaux karstiques dans cette zone.

5-2-3- Ancienne gare (Avre)

Les enregistrements annuels sur le piézomètre de l'Ancienne gare indiquent un régime instable de l'écoulement souterrain de l'Avre (figure B-9). En effet, les profondeurs oscillent entre 5,6 et 6,76 m en 2000-2001 et 2006-2007 successivement. Concernant les profondeurs minimales observées annuellement, la plus marquante est d'une valeur de 4,99 m et la plus grande des profondeurs est d'une valeur de 6,67 m (tableau B-9). L'écoulement souterrain de l'Avre est stable autour de sa moyenne (6,11 m de profondeur), par rapport aux autres piézomètres, avec un écart type faible de 0,51 m.

Piézomètre	Moy	Max	Min	1 ^{er} Quart	ET
Piézomètre de Fains (Eure)	1,23	1,56	0,53	1,21	0,38
Piézomètre de Normanville (Iton)	5,08	6,34	1,16	4,52	1,37
Piézomètre de l'Ancienne gare (Avre)	6,11	6,67	4,99	5,75	0,51

Tableau B- 9 Description statistique des profondeurs minimales interannuelles

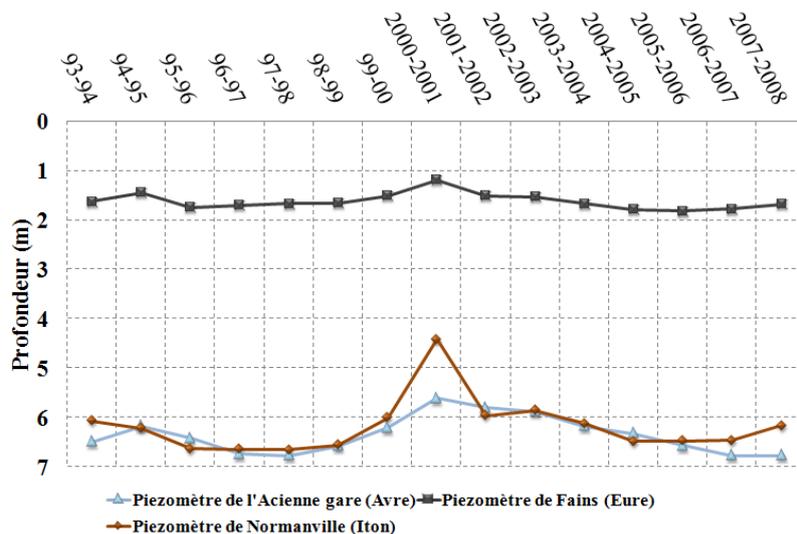


Figure B- 9 Profondeur moyenne annuelle

III- Fonctionnement hydrologique et paramètres d'influence majeure

L'analyse statistique des données mensuelles et annuelles des différentes bases de données pluviométriques, débitmétriques et piézométriques a montré une irrégularité dans le fonctionnement hydrologique des bassins versants de l'Eure, l'Iton et l'Avre. En effet, la pluviométrie mensuelle au niveau des trois bassins versant se caractérise par une présence quasi-continue le long de l'année par contre les deux autres types de données évoluent saisonnièrement avec des périodes de bas niveau estival et de haut niveau hivernal. Cette divergence entre les différentes distributions mensuelles est quasi-absente à l'échelle annuelle ce qui indique une interrelation compliquée entre les trois types de données. Afin de comprendre cette interrelation ainsi que le fonctionnement hydrologique des trois bassins versants, nous avons procédé à une comparaison mensuelle et annuelle des différents types de données pour analyser la corrélation entre la réponse hydrologique (débit) des différents bassins d'études d'un côté et les différents paramètres (pluie et piézométrie) d'un autre côté.

1- Bassin versant de l'Eure

1-1- Relation pluie-débit

La variation inter-saisonnière de la pluviométrie ainsi que le débit sur la station Louviers montrent une divergence de leurs évolutions temporelles (figure B-10). La pluviométrie mensuelle est quasi-continue tout au long de l'année avec des valeurs importantes et une fluctuation faible tandis que l'évolution de débit saisonnière suit la forme normale. Ce dernier est minimal aux deux extrêmes limites avec une croissance en automne et en hiver, une décrue pendant le printemps ainsi qu'un étiage estival. Cette normalité des débits saisonniers est observable même avec des pluies orageuses estivales. En effet, pendant le mois de juillet, le niveau des eaux superficielles dans l'Eure reste inchangé et n'enregistre aucune influence même avec un apport pluviométrique important (62 mm en juillet). Les maximums des débits sont hivernaux. Ils sont accompagnés par des apports pluviométriques mensuels inférieurs à la moyenne inter-saisonnière (52 mm), ce qui indique une indépendance assez forte entre les deux paramètres pluie-débit. Par contre, la comparaison des deux distributions annuelles des pluies et des débits au niveau du bassin versant de l'Eure indique une nette corrélation entre ces deux paramètres (figure B-10). Les plus hautes eaux enregistrées entre 1993 et 2008 coïncident avec les années les plus humides (comme l'année hydrologique de 1994-1995 et 2000-2001) ainsi que les années assez sèches avec les étiages. Cette coïncidence interannuelle est entachée pour quelques années hydrologiques (comme 1995-1996 et 1996-1997). La première année hydrologique 1995-1996 a une humidité importante par rapport aux basses eaux enregistrées et la deuxième année a une sécheresse accompagnée par des débits importants vis-à-vis de la pluie. Ces particularités, avec la mauvaise corrélation pluie-débit à l'échelle mensuelle, supposent la présence d'un troisième paramètre régulateur entre la pluie et le débit au niveau de l'exutoire de l'Eure. Ce paramètre intervient comme intermédiaire entre les apports pluviométriques (paramètre principal dans les processus hydrologiques) et les débits. Son intervention est remarquable à l'échelle mensuelle et annuelle. Comme première hypothèse nous considérons que ce paramètre se résume aux écoulements souterrains du bassin versant de l'Eure.

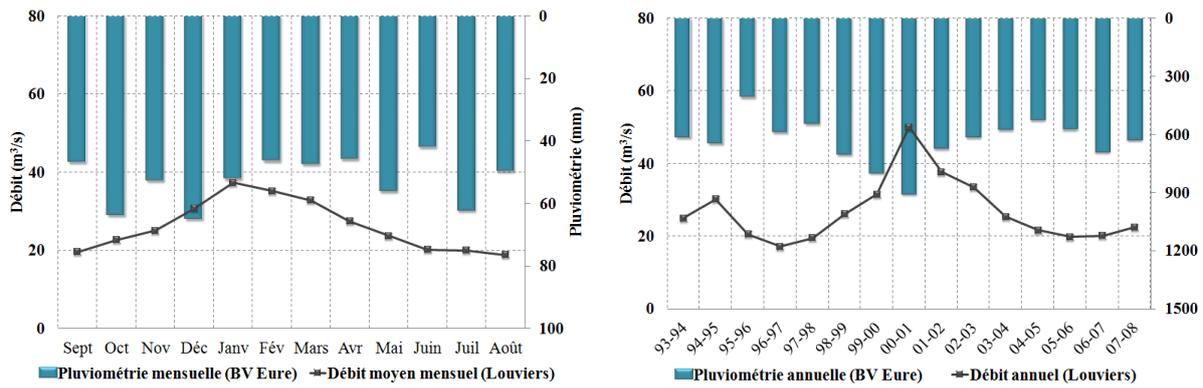


Figure B- 10 Évolution mensuelle et annuelle pluie-débit du bassin versant de l'Eure

1-2- Relation piézométrie-débit

La figure B-11 nous présente une évolution comparative inter-saisonnière et interannuelle entre les débits et les observations piézométriques au niveau de l'exutoire de l'Eure. L'écoulement surfacique à l'exutoire de l'Eure a une dépendance forte à l'évolution piézométrique de la nappe. Il augmente avec la diminution de la profondeur (augmentation du niveau piézométrique) jusqu'à atteindre le pic de crue en janvier. La nappe commence sa diminution (augmentation de la profondeur) et ainsi la décrue, à Louviers, jusqu'à atteindre les étiages estivaux alors à une profondeur quasi faible et constante de la nappe.

L'hypothèse du fort degré de dépendance des écoulements souterrains-surfaciques est soutenue par l'évolution annuelle des débits-nappes. La saturation de la nappe soutient les écoulements de l'Eure et provoque la genèse des crues (c'est le cas des crues extrême de 1994-1995 et 2000-2001) surtout avec une perméabilité importante au niveau des fonds de vallées qui sont les lieux de contact principaux et directs des écoulements souterrain-surfaciques de l'Eure à travers les alluvions. Cependant, en cas de baisse des niveaux piézométriques, elles ralentissent la montée de l'Eure et favorisent l'approvisionnement de cette nappe sous-jacente ainsi la perturbation du temps de réponse du bassin versant de l'Eure. Ces caractéristiques souterraines provoquent les étiages de l'Eure par les bas niveaux de la nappe, mais aussi soutiennent un bas niveau de la rivière pendant les périodes de sécheresse (cas de l'année hydrologique 1995-1996). Ces effets sont semblables à un effet tampon de la nappe envers l'écoulement surfacique surtout avec la variation temporelle de la pluviométrie moyenne de l'Eure.

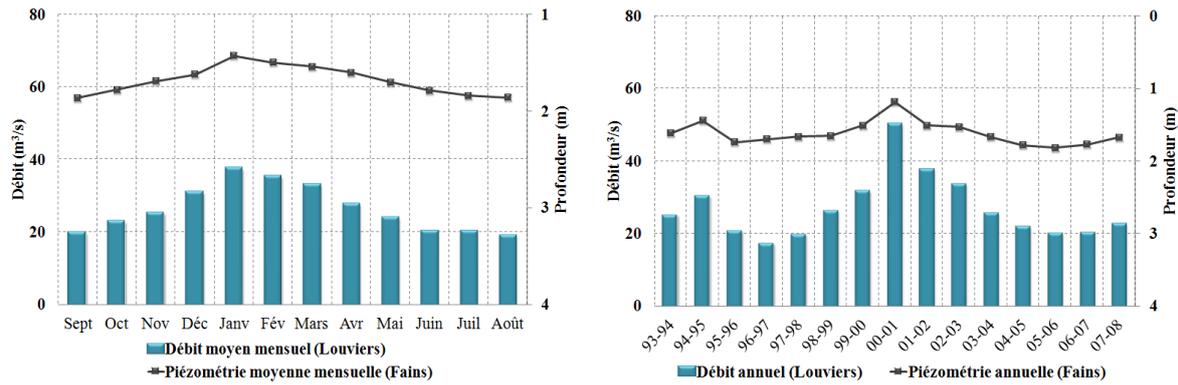


Figure B- 11 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Eure

1-3- Relation nappe-pluie

Le niveau piézométrique de la nappe sous-jacente de l'Eure a une distribution inter-saisonnière variable entre deux extrêmes estivaux et un pic hivernal (figure B-12). Cette distribution ne suit pas celle de la pluviométrie moyenne mensuelle. Cependant, durant septembre et jusqu'au janvier la nappe s'alimente par les apports pluviométriques quasi continus causant une augmentation remarquable des niveaux piézométriques (diminution de la profondeur de la nappe) jusqu'à atteindre un maximum en janvier. À partir de janvier, la nappe perd sa capacité progressivement avec une croissance de la profondeur qui coïncide avec la faible diminution de la quantité d'eau pluviale mensuelle, mais aussi sous l'effet de l'augmentation de l'évapotranspiration³⁸. Cette diminution des niveaux piézométriques est stoppée par les apports orageux durant juillet qui ne changent pas le sens de progression de la nappe, mais stabilisent le niveau piézométrique avec un approvisionnement important de la charge souterraine influencé par l'évapotranspiration estivale élevée. Cette différence inter-saisonnière entre la pluviométrie moyenne et la piézométrie de l'Eure est quasi absente sur le niveau interannuel. En effet, les distributions interannuelles de la profondeur et de la pluviométrie sont semblables durant les années hydrologiques 1993-2008 (figure B-12). Cette coïncidence entre les niveaux hauts et bas de la piézométrie d'une part et les années humides et sèches d'autre part indique que la nappe dépend sensiblement des apports pluviométriques. Par contre, cette dépendance est retardée par la variabilité de vitesse d'infiltration au niveau de la nappe ce qui implique une dépendance retardée de quelque dizaine de jours à quelque semaine envers les apports pluviométriques.

³⁸ Plus de détails sur l'ETP sont apportés dans le chapitre I I-2-.

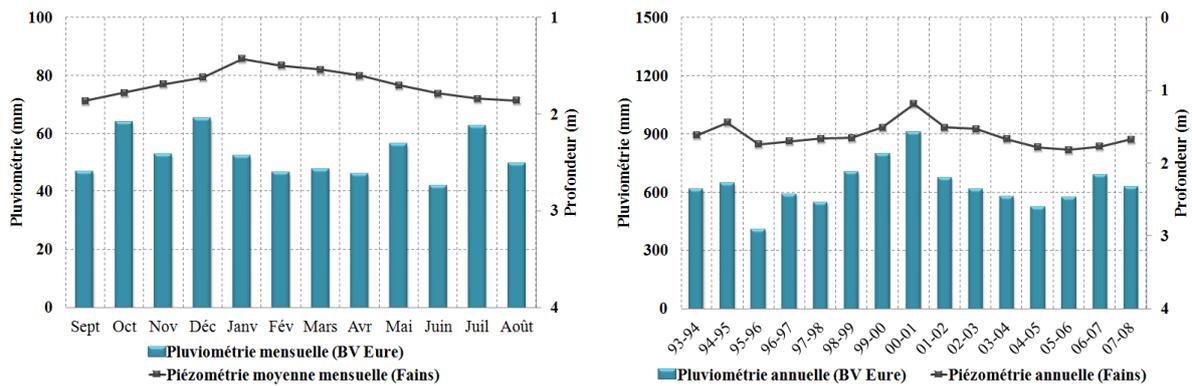


Figure B- 12 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-pluie du bassin versant de l'Eure

2- Bassin versant de l'Iton

2-1- Relation pluie-débit

Le bassin versant de l'Iton constitue l'entité hydrologique la plus importante comme sous bassin versant de l'Eure. Il intervient le plus dans le fonctionnement hydrologique de ce bassin. Le débit à l'exutoire de l'Iton (station Normanville) a une dépendance envers la pluviométrie, semblable à celle au niveau du bassin versant de l'Eure. La variation inter-saisonnière pluie-débit au niveau de l'Iton prouve une incohérence d'évolution entre les deux termes tout au long l'année hydrologique (figure B-13). La pluviométrie mensuelle est quasi-continue tout au long de l'année avec des apports mensuels importants et une fluctuation faible tandis que l'évolution de débit saisonnière suit la forme normale comme celle de la station Louviers. Ce dernier est maximal pendant l'hiver, une crue durant l'automne, une décrue pendant le printemps et un étiage estival. Cette normalité de distribution mensuelle débitmétrique est conservée même avec des apports importants de pluviométries durant les mois de mai et juillet. Par contre, les débits maximums sont accompagnés par une pluviométrie mensuelle moyenne n'indiquant pas l'exceptionnalité des évènements hivernaux. L'évolution annuelle des deux paramètres hydrologiques au niveau du bassin versant de l'Iton montre une dépendance assez moyenne. Globalement, lorsque les pluies annuelles sont importantes, les débits moyens annuels présentent une augmentation, cependant, ces augmentations ne sont pas similaires. Contrairement à l'Eure, le maximum des débits (2000-2001) ne coïncide pas avec celle de la pluie annuelle (1999-2000), ainsi l'année la plus sèche (1995-1996) ne présente pas le débit annuel minimum (2,3 m³/s pendant 1997-1998). Cette faible dépendance annuelle pluie-débit au niveau de l'Iton indique que leur relation est plus compliquée que dans le cas du bassin versant de l'Eure. Cette relation prétend un troisième paramètre régulateur qui influence la réponse hydrologique du bassin versant à l'apport pluviométrique. À première vue, ce paramètre est la nappe.

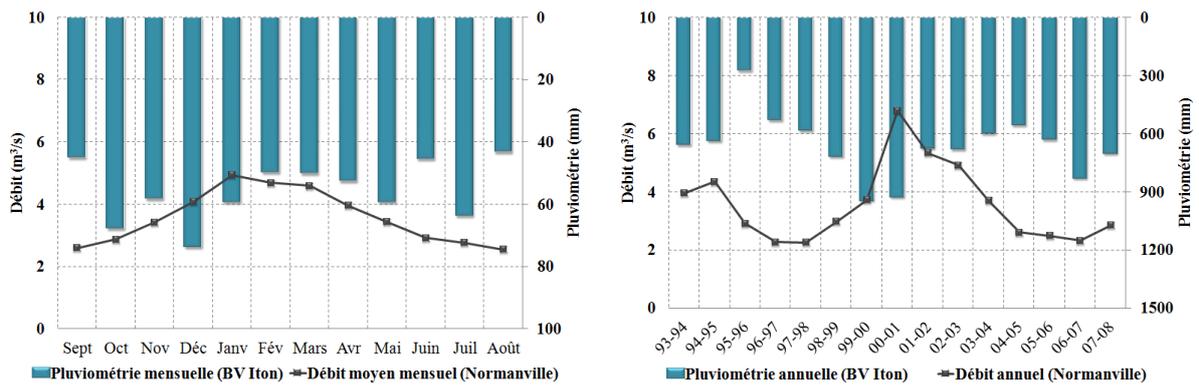


Figure B- 13 Évolution mensuelle et annuelle pluie-débit du bassin versant de l'Iton

2-2- Relation piézométrie-débit

La comparaison de l'évolution mensuelle de débit et de la nappe au niveau de l'Iton montre une synchronisation quasi parfaite (figure B-14). Le débit mensuel varie en fonction de la profondeur mensuelle de la nappe souterraine. Il augmente lorsque la profondeur diminue, indiquant une montée de nappe et diminue globalement lorsque la nappe perd de sa capacité durant l'été. Les deux distributions mensuelles partagent les mêmes périodes de pic et de minimum observé. Cette synchronisation est annuelle entre les deux paramètres (figure B-14). La variation annuelle du débit et de la nappe ont un fort degré de dépendance interannuelle. Les années des crues se marquent aussi par une montée exceptionnelle de la nappe (94-95 et 2000-2001) et les années des étiages se marquent par une nappe sèche avec des profondeurs importantes (97-98). La nappe crayeuse au niveau de l'Iton soutient la genèse des crues après une saturation des pores, mais en même temps cette nappe joue le rôle d'un réservoir souterrain qui soutient les écoulements des ruisseaux durant les étiages à travers les aquifères quaternaires aux bas fonds de la rivière.

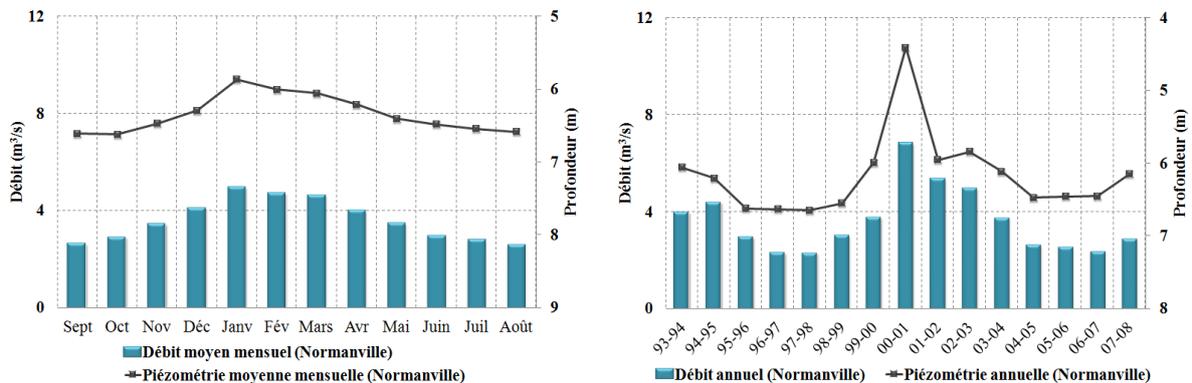


Figure B- 14 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Iton

2-3- Relation nappe-pluie

Dans le bassin versant de l'Iton, la nappe évolue entre les saisons avec une valeur maximale en hiver et une minimale en été, tandis que la pluviométrie a une variation intermensuelle quelconque (figure B-15). Ces deux distributions mensuelles indiquent une évolution partielle de la nappe en fonction de la pluviométrie avec une réaction retardée vu la faiblesse des vitesses d'infiltrations et l'effet partiel de l'évapotranspiration tout au long de l'année. Les apports pluviométriques assez importants entre octobre et décembre chargent la nappe jusqu'à une saturation en janvier puis la diminution de la pluviométrie influence la nappe et abaisse les niveaux piézométriques. L'augmentation de l'évapotranspiration entre mars et août influence profondément la pluie efficace ainsi la recharge de la nappe et elle résulte des niveaux piézométriques estivaux bas. Cette dépendance partielle à l'échelle mensuelle entre la nappe et la pluviométrie est quasi absente sur l'échelle annuelle (figure B-15). En effet, les distributions interannuelles de la profondeur et de la pluviométrie sont presque semblables durant les années hydrologiques 1993-2008, par contre leurs maximums et leurs minimums ne se croisent pas. La pluviométrie a une valeur maximale pendant 1999-2000 et une minimale pendant 1995-1996 tandis que la nappe a des profondeurs minimales (piézométrie maximale) durant l'année hydrologique 2000-2001 et leurs profondeurs maximales (piézométrie minimale) en 1997-1998. Cette différence entre les extrêmes des deux distributions peut être expliquée par la complexité hydrogéologique au niveau de l'Iton. La présence développée et non-identifiée des réseaux karstiques perturbe les niveaux piézométriques de la nappe au niveau de l'Iton avec des vitesses d'échange nappe-rivière importantes (le cas de la Sec-Iton).

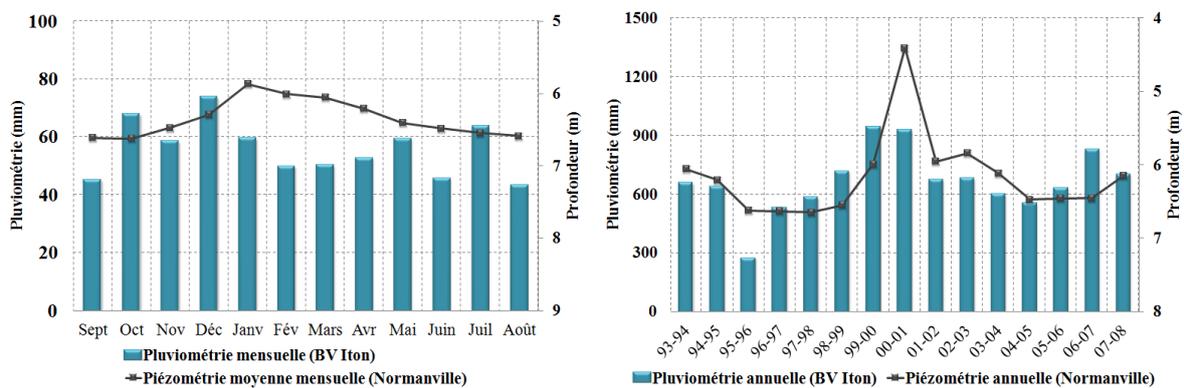


Figure B- 15 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-pluie du bassin versant de l'Iton

3- Bassin versant de l'Avre

3-1- Relation pluie-débit La relation pluie-débit dans le bassin versant de l'Avre est semblable à celle des bassins versants de l'Eure et de l'Iton. Leur relation mensuelle est indépendante (figure B-16). Elle a une incohérence totale au niveau des périodes de hauts débits et des hauts apports pluviométriques d'une part, et les étiages et les périodes de sécheresse d'autre part. La pluviométrie, comme dans le bassin versant de l'Eure, marque une présence quasi continue tout au long l'année, par contre les débits au niveau Muzy (exutoire de l'Avre) ont une distribution normale avec des étiages estivaux et de hauts débits hivernaux. Ce fort degré d'incohérence montre une réponse hydrologique quasi indépendante à la pluviométrie tout au long de l'année hydrologique. Cette quasi-indépendance continue sa manifestation entre les deux paramètres au niveau de la distribution annuelle. Les deux courbes de distribution ont deux formes différentes. Leurs maximums et minimums ne coïncident pas, c'est le cas de l'année hydrologique 1997-98 et celle 2000-01 (figure B-16). La distribution annuelle des deux paramètres renforce l'hypothèse de la présence d'un troisième régulateur de débit qui est en contact direct et continu avec les deux paramètres. Ce troisième paramètre est à priori la nappe.

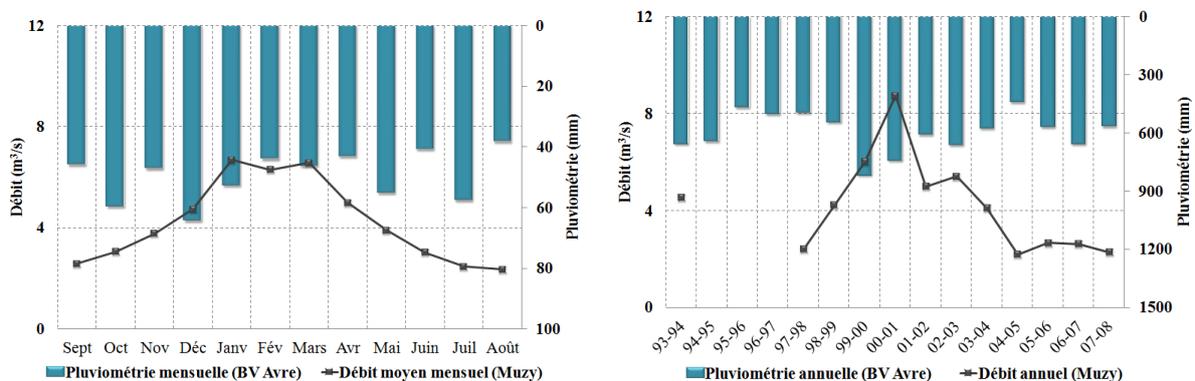


Figure B- 16 Évolution mensuelle et annuelle pluie-débit du bassin versant de l'Avre

3-2- Relation piézométrie-débit

La différence entre les deux distributions de la pluie et du débit au niveau de l'Avre est quasi-absente entre celles du débit et de piézométrie (figure B-17). La comparaison de l'évolution mensuelle de débit et de la nappe au niveau de l'Avre montre une synchronisation acceptable au niveau de leurs progressions mensuelles. Les débits augmentent jusqu'à un maximum en janvier avec la remontée de la nappe (diminution de la profondeur) entre septembre et janvier. Ils gardent une certaine ampleur entre janvier et mars et après ils diminuent avec le niveau piézométrique de la nappe jusqu'à atteindre leurs minimums en aout. Cette synchronisation quasi parfaite entre les deux paramètres piézométrie-débit est

enregistrée sur l'échelle annuelle (figure B-17). Les années des crues se marquent par une montée exceptionnelle de la nappe (99-00 et 2000-2001) et les années des étiages se marquent par une nappe sèche avec des profondeurs importantes (97-98). La nappe crayeuse au niveau de l'Avre soutient la genèse des crues, à travers les fonds vallée de l'Avre, avec leur saturation. Elle est considérée comme le principal paramètre qui contrôle les écoulements surfaciques après l'intervention de la pluviométrie. Elle est un paramètre intermédiaire et régulateur entre les pluviométries et les écoulements surfaciques aux fonds vallée de l'Avre.

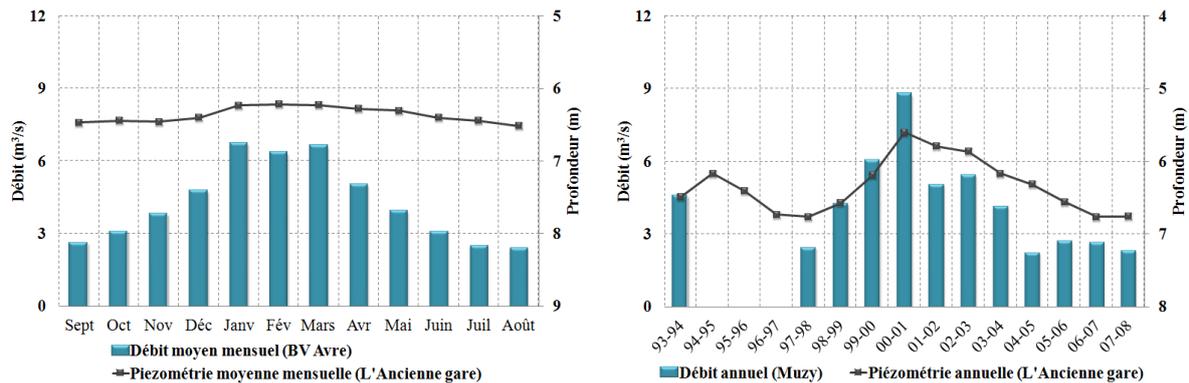


Figure B- 17 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Avre

3-3- Relation nappe-pluie

Dans le bassin versant de l'Avre, la nappe évolue entre les saisons avec une valeur maximale en hiver et une minimale en été, tandis que la pluviométrie a une variation inter-mensuelle quelconque (figure B-18). La nappe réagit aux apports pluviométriques avec un retard dû à la vitesse d'infiltration et à la variation saisonnière de l'évapotranspiration surtout entre septembre et décembre. Après, la nappe commence à prendre de la hauteur avec une variation quasi-constante de la pluviométrie jusqu'au mois de mars et enfin, le niveau piézométrique de la nappe diminue jusqu'à son minimum en aout pendant que la pluviométrie alterne autour de la moyenne inter-mensuelle. Cette forte incohérence entre les deux paramètres est quasi-absente à l'échelle annuelle (figure B-18). Les distributions interannuelles de la profondeur et de la pluviométrie sont presque semblables durant les années hydrologiques 1993-2008 et présentent une dépendance moyenne. En effet, leurs maximums et leurs minimums ne se croisent pas. La pluviométrie a une valeur maximale pendant 1999-2000 et une minimale pendant 2004-2005 tandis que la nappe a des profondeurs minimales durant l'année hydrologique 2000-2001 et leurs profondeurs maximales en 2006-2007. Cette différence au niveau des deux distributions est essentiellement due au niveau de la vitesse de réponse de la nappe à la pluviométrie.

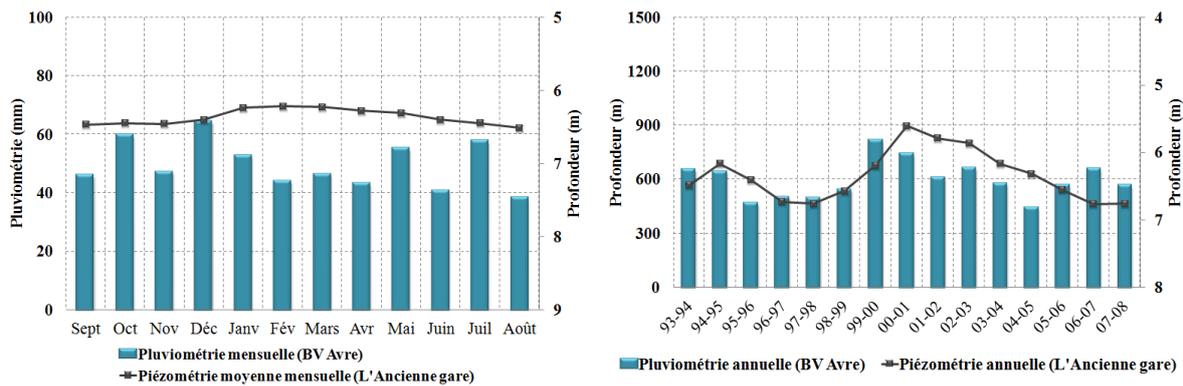


Figure B- 18 Évolution mensuelle et annuelle piézométrie-pluie du bassin versant de l'Avre

IV- Modélisation fréquentielle des débits extrêmes

L'analyse statistique des données pluvio-hydrométriques a permis d'identifier la variation temporelle des écoulements dans les différents cours d'eau du bassin versant de l'Eure. Ces écoulements se caractérisent par une variation interannuelle assez irrégulière des valeurs moyennes de débits et des valeurs extrêmes. Pour identifier la tendance d'apparition des débits extrêmes, une estimation des débits de différentes périodes de retour (T) est nécessaire afin de quantifier le risque de crue. Cette estimation se fait par le biais d'une étude fréquentielle des débits maxima annuels au niveau des stations hydrométriques Louviers, Normanville et Muzy.

1- Traitement appliqué dans l'ajustement statistique des données

En Hydrologie, deux approches sont utilisées : la prévision et la prédiction. La prévision se fait à court terme alors que la prédiction à long terme (Meylon, 2008). La dernière approche consiste à estimer les débits pour différents temps de retour. Elle permet une quantification des risques des crues futures. Cette quantification se réalise à travers une analyse fréquentielle des débits maxima annuels permettant ainsi une estimation des extrêmes hydrologiques futurs. La prédiction étudie les évènements passés en empruntant des procédures de création d'un modèle fréquentiel décrivant le comportement statistique d'une variable hydrologique aléatoire par une fonction de répartition (fréquence cumulée) F :

$$F(x) = \Pr(X \leq x)$$

Le choix d'une fonction adéquate est une étape principale dans la modélisation fréquentielle. Cette fonction détermine la présentation théorique de la réalité, mais avec une certaine relativité. Selon Matheron (1978), « *Le modèle, jamais, n'est identique à la réalité. D'innombrables aspects du réel lui échappent toujours et, inversement, le modèle contient toujours d'innombrables propositions parasites, sans contrepartie aucune dans la réalité.* ».

Nous constatons alors que cette étape est la plus importante des étapes dans une modélisation fréquentielle. Le but étant de choisir la loi la plus appropriée aux stations étudiées produisant ainsi les moindres erreurs. Les étapes principales alors de la modélisation fréquentielle sont :

- Constitution d'une base de données des maxima annuels pour chaque station étudiée.
- Choix et ajustement du modèle fréquentiel le plus approprié en validant et évaluant l'adéquation (test de Kolmogorov-Smirnov³⁹ et de corrélation).
- Exploitation de la distribution ajustée en produisant les quantiles de périodes de retour importantes (entre 2 ans et 200 ans).

2- Constitution de la base de données

La base de données brute comporte les données de débit horaire des trois stations Louviers, Normanville et Muzy. Ces stations possèdent successivement 23, 28 et 32 années hydrologiques d'observations horaires. Ces années ne permettent pas de sélectionner une base des maxima annuels assez longue afin de pratiquer l'analyse fréquentielle des extrêmes, à l'exception de la station Muzy (32 années d'observation). En effet, les études d'analyse fréquentielle ont permis de montrer qu'il est plus légitime d'étudier les valeurs extrêmes annuelles que pour les séries chronologiques de 30 ans et plus (Meylon, 2008). Une série courte entache l'homogénéité optimale de l'échantillon. Concernant les deux autres stations (Louviers et Normanville), l'utilisation des séries des maxima annuels est déconseillée vu le faible nombre des valeurs de la série (inférieur de 30 valeurs) de l'échantillon ce qui nous guide à l'utilisation des séries « gonflées » qui permettent de dépasser ses limites. La série dite « gonflée » se compose de « k » plus grandes valeurs annuelles. Les différents ajustements de cette série nécessitent un traitement spécifique pour neutraliser la sur-représentativité annuelle⁴⁰.

Nous avons constitué ainsi trois séries chronologiques comportant des maxima instantanés annuels des débits pour les trois stations. Ces maxima présentent chacun les pics des différents événements. La station Muzy a une série des maxima annuels tandis que les stations Louviers et Normanville ont deux séries « gonflées » avec $k = 2$ (les deux débits de

³⁹ Le test de Kolmogorov-Smirnov est l'un des tests les plus fréquemment utilisés dans l'hydrologie fréquentielle. C'est un test non paramétrique permettant de tester l'hypothèse selon laquelle les valeurs observées sont ajustées par une loi de probabilité théorique considérée comme étant un modèle convenable. Dans ce test, les calculs sur les lois de probabilité se font sur les fonctions de répartition F mesurant ainsi l'écart entre la fonction de répartition théorique et la fonction de répartition observée (Immediato, 2010)

⁴⁰ Le choix de k valeurs maximale annuelle influencera les paramètres de temps ainsi les paramètres d'ajustement et nécessite une neutralisation d'effet de k valeurs (annualisation des paramètres). Ce traitement sera présenté par la suite.

pointes des deux évènements les plus extrêmes de chaque année hydrologique). Nous avons classé les différentes valeurs pour chaque station en ordre croissant, puis nous avons attribué à chacune de ces valeurs une fréquence empirique suivant la formule de Hazen⁴¹ (tableau B-10). Cette formule est présentée par la relation suivante :

$$F = (r - 0.5)/N$$

Avec r le rang et N la taille de l'échantillon.

Pour les stations Louviers et Normanville, cette fréquence empirique a été corrigée par la relation suivante :

$$F_c(x) = [F(x)]^k$$

Avec x la variable dans la série chronologique et k le nombre d'observations par année (k = 2 dans ce travail).

⁴¹ Cette formule a été choisie pour des raisons qui seront expliquées dans le paragraphe suivant.

Rang	Station de Louviers		Station de Normanville		Station de Muzy	
	Observation (m ³ /s)	F _C	Observation (m ³ /s)	F _C	Observation (m ³ /s)	F
1	18,2	0,0001	2,8	0,0001	4,3	0,0156
2	23,2	0,0011	3,0	0,0007	6,4	0,0469
3	31,5	0,0030	4,7	0,0020	9,0	0,0781
4	31,8	0,0058	5,0	0,0039	9,4	0,1094
5	36,7	0,0096	5,3	0,0065	10,4	0,1406
6	38,5	0,0143	5,8	0,0096	10,7	0,1719
7	39,4	0,0200	5,9	0,0135	11,5	0,2031
8	40,7	0,0266	6,0	0,0179	11,7	0,2344
9	44	0,0341	6,1	0,0230	12,7	0,2656
10	44,2	0,0427	6,1	0,0288	13,2	0,2969
11	44,2	0,0521	6,1	0,0352	13,7	0,3281
12	45,1	0,0625	6,2	0,0422	14,2	0,3594
13	46,5	0,0738	6,2	0,0498	15,0	0,3906
14	47,4	0,0861	6,3	0,0581	15,2	0,4219
15	48,1	0,0994	6,7	0,0670	15,4	0,4531
16	48,2	0,1135	6,7	0,0766	15,7	0,4844
17	48,7	0,1287	6,8	0,0868	16,0	0,5156
18	49,4	0,1447	6,8	0,0977	16,1	0,5469
19	49,8	0,1617	6,9	0,1091	16,8	0,5781
20	50,1	0,1797	6,9	0,1213	16,9	0,6094
21	50,2	0,1986	6,9	0,1340	18,1	0,6406
22	52,4	0,2185	7,0	0,1474	18,4	0,6719
23	52,5	0,2392	7,1	0,1614	19,6	0,7031
24	53,9	0,2610	7,2	0,1761	19,9	0,7344
25	54,2	0,2837	7,4	0,1914	20,3	0,7656
26	54,3	0,3073	7,4	0,2074	20,5	0,7969
27	54,7	0,3319	7,5	0,2239	21,3	0,8281
28	57,1	0,3574	7,5	0,2412	22,6	0,8594
29	58,7	0,3839	7,6	0,2590	22,6	0,8906
30	58,8	0,4113	7,6	0,2775	23,9	0,9219
31	61,4	0,4396	7,7	0,2966	26,1	0,9531
32	62,4	0,4689	7,8	0,3164	30,9	0,9844
33	64,4	0,4992	7,8	0,3368		
34	65,4	0,5304	7,9	0,3579		
35	65,6	0,5625	8,0	0,3795		
36	65,8	0,5956	8,1	0,4019		
37	68,4	0,6296	8,3	0,4248		
38	70,1	0,6646	8,3	0,4484		
39	70,1	0,7005	8,6	0,4727		
40	71,9	0,7374	8,6	0,4975		
41	73,4	0,7752	8,7	0,5230		
42	80,9	0,8139	9,0	0,5492		
43	102	0,8536	9,0	0,5760		
44	110	0,8943	9,1	0,6034		
45	119	0,9358	9,1	0,6315		
46	142	0,9784	9,3	0,6602		
47			9,4	0,6895		
48			9,6	0,7195		
49			9,7	0,7501		
50			10,0	0,7813		
51			10,2	0,8132		
52			10,2	0,8457		
53			10,2	0,8789		
54			12,8	0,9127		
55			13,9	0,9471		
56			17,9	0,9822		

Tableau B- 10 Échantillon des maxima annuels pour chaque station

3- Choix du modèle fréquentiel

Une sélection de la loi de distribution est nécessaire avant de se lancer dans cette étude fréquentielle des valeurs extrêmes. Un tel choix résulte fréquemment de l'expérience des praticiens constituée peu à peu au sein des écoles existantes (Abessolo, 2010). Les écoles anglaises préfèrent l'utilisation des lois de Gumbel et de Weibull (Institute of Hydrology, 1980 ; Polarski, 1989) tandis que plusieurs recherches américaines préfèrent les lois de Log-Pearson III (Loganathan, 1986) et la loi Gamma (Bobée, 1991), qui est un cas particulier de la loi précédente. En 2008, Meylon a effectué une description sélective des différentes distributions de probabilité usuelle dans le domaine de l'hydrologie et il a conclu que l'utilisation de la loi de Gumbel⁴² est recommandée pour une étude fréquentielle des valeurs extrêmes (débit instantané de pointe) et particulièrement pour les séries « gonflées ». D'autre part, les résultats sont plus fiables avec la combinaison de la loi de Gumbel et la distribution empirique de Hazen (Musy, 2003). De ce fait, nous utiliserons la loi de Gumbel pour notre analyse fréquentielle des extrêmes hydrologiques des stations Louviers, Normanville et Muzy. La fonction de répartition de la loi de Gumbel s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right)$$

Soit

$$x = b \times [-\ln(-\ln F(x))] + a$$

Avec a et b paramètres de Gumbel. Ces paramètres sont estimés selon la méthode des moments. Cette dernière consiste à estimer les paramètres théoriques de la loi à partir de ceux calculés sur la base des échantillons. Elle procure des estimateurs (la moyenne et l'écart type de l'échantillon) non biaisés (Roux, 1996). L'estimation se fait comme suit :

$$\mu_{théorique} = \mu_{échantillon}$$

$$\sigma_{(théorique)} = \sigma_{(échantillon)} \times \sqrt{\frac{N}{N-1}}$$

Avec N la taille de l'échantillon ; μ la moyenne de cet échantillon et σ l'écart type des valeurs composant l'échantillon

À travers cette méthode, les paramètres a et b sont estimés selon les formules suivantes :

$$\begin{cases} b = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times \sigma \\ a = \mu - b \times \gamma \end{cases}$$

Avec σ l'écart type des valeurs composant l'échantillon,

⁴² Cas particulier de la loi des extrêmes généralisés GEV

μ la moyenne de cet échantillon,

γ la constante de l'Euler = 0,5772

Pour les séries dites « gonflée », le paramètre « a » de la loi de Gumbel subit une correction comme suit à fin d'annualiser l'ajustement :

$$a_e = a + b \times \ln(k)$$

Avec a_e paramètre annualisé de la loi de Gumbel

k nombre de maximums par an. Dans ce travail k = 2

Paramètres de Gumbel	Station Louviers	Station Normanville	Station Muzy
a_e	60,07	8,05	13,57 (a)
b_e	18,34	1,88	4,57 (b)

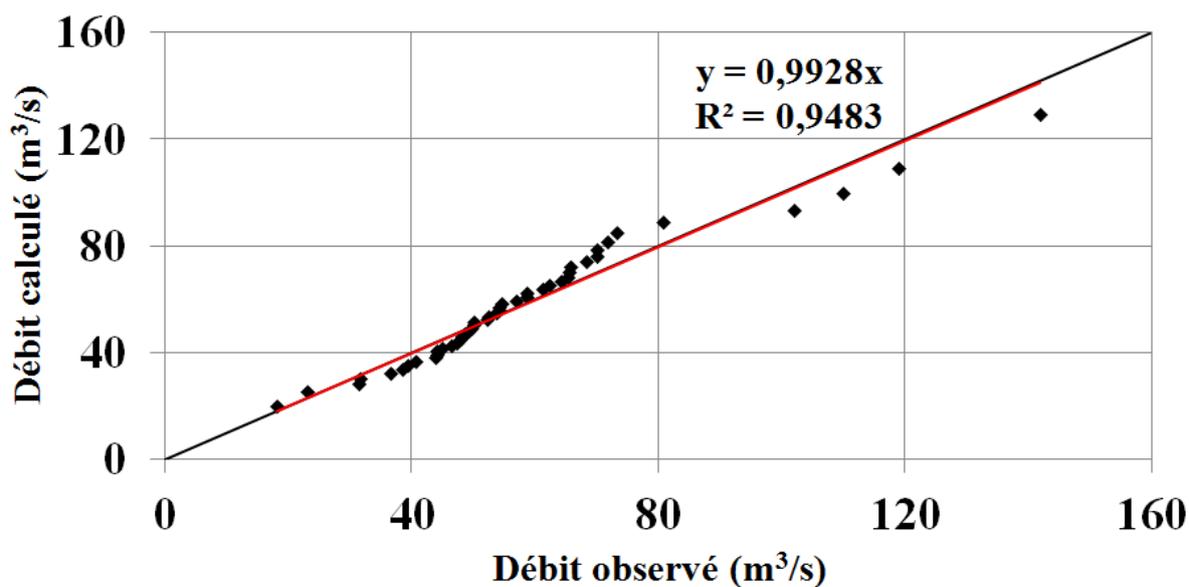
Tableau B- 11 Paramètres de Gumbel

4- Ajustement et exploitation du modèle fréquentiel

4-1- Station Louviers (bassin versant de l'Eure)

L'ajustement de la station débitmétrique Louviers par la loi de Gumbel montre une corrélation forte entre les valeurs calculées et celles observées (figure B-19). En effet, cette corrélation affiche un nuage de points qui s'ajuste avec la droite $x=y$ indiquant ainsi une adéquation acceptable entre la loi de Gumbel et l'échantillon de la station de Louviers. Cette adéquation est renforcée par le test de Kolmogorov-Smirnov⁴³. En fait, le risque de rejeter à tort l'hypothèse d'adéquation entre les échantillons observés et théoriques est de 78,9 % (supérieur au seuil de signification de 5 %). Autrement dit, la différence entre les deux échantillons n'est pas significative.

⁴³ Le test de Kolmogorov-Smirnov a été réalisé à l'aide de l'application XLSTAT sous Excel 2007.



— Linéaire (droite X = Y) — Linéaire (Débit observé/calculé)

Figure B- 19 Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour la station de Louviers

La comparaison des caractéristiques statistiques entre l'échantillon observé et les valeurs calculées nous montre globalement que la loi de Gumbel permet une quasi-conservation de la forme et des paramètres de la distribution des observations hydrométriques sur Louviers (tableau B-12).

	Caractéristique des débits calculés	Caractéristique de l'échantillon
Nombre d'observation	46	46
Minimum	18,2	19,7
Maximum	142,0	130,2
Moyenne	57,9	57,8
Écart type	23,3	23,1
Médiane	53,2	54,1
Coef. de variation	0,4	0,4
Coef. d'asymétrie	1,6	0,9

Tableau B- 12 Comparaison statistique entre les valeurs observées et celles calculées (station de Louviers)

Ayant ajusté nos données par la loi de Gumbel, nous pouvons calculer les différents quantiles de débits Q_T . La démarche consiste à calculer les valeurs théoriques de Gumbel (ou Q_T) pour chaque période de retour T (tableau B-13).

T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Q_T (m ³ /s)
2	0,5	66,79
5	0,8	87,58
10	0,9	101,34
20	0,95	114,54
50	0,98	131,63
100	0,99	144,43
200	0,995	157,19

Tableau B- 13 Quantiles de débit selon les différentes périodes de retour (station de Louviers)

A partir du tableau précédent, nous pouvons construire une courbe des différents quantiles Q_T ainsi que les valeurs observées et ajustées selon la loi Gumbel (figure B-20). Ce graphique nous montre un ajustement satisfaisant des valeurs observées par rapport aux valeurs théoriques et notamment des débits extrêmes, qui permettent une extrapolation statistique relativement fiable de l'échantillon des maxima annuels au niveau de Louviers.

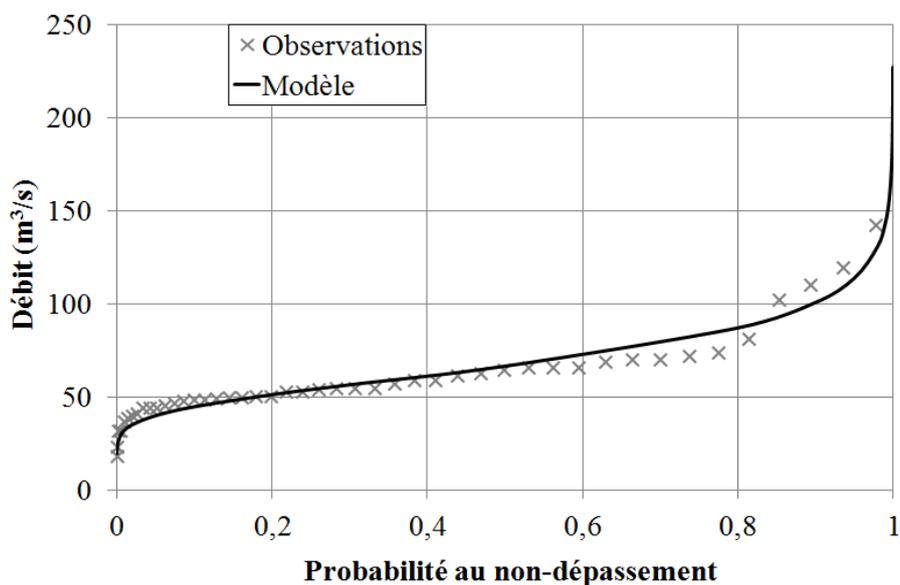
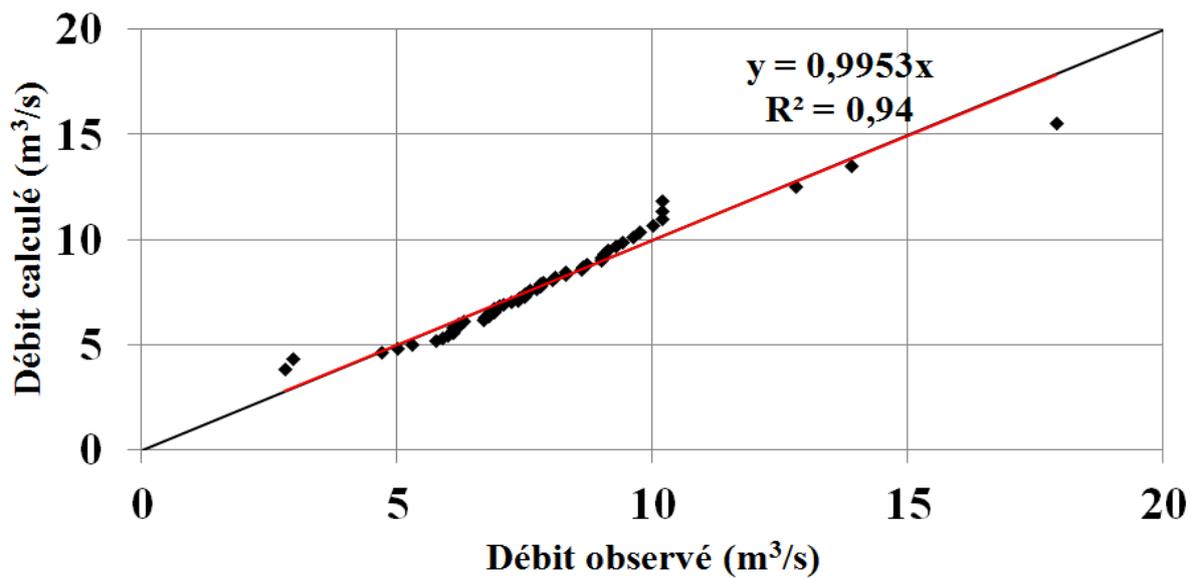


Figure B- 20 Comparaison graphique entre débit observé et débit calculé par Gumbel

4-2- Station Normanville (bassin versant de l'Iton)

La station débitmétrique Normanville a été ajustée suivant la loi de Gumbel avec une corrélation forte entre les observations et les valeurs calculées par cette loi (figure B-21). Cet ajustement est renforcé par les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov. Le risque de rejeter injustement l'hypothèse d'adéquation entre les deux échantillons observés et théoriques (de la loi de Gumbel) est de 88 % (supérieur au seuil de signification de 5 %). Autrement dit, la différence entre les deux échantillons n'est pas significative.



— Linéaire (droite $X = Y$) — Linéaire (Débit observé/calculé)

Figure B- 21 Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour la station de Normanville

Le tableau B-14 montre une comparaison entre les caractéristiques statistiques des valeurs réellement observées et des valeurs théoriques qui correspondent à la loi de Gumbel. Cette loi garde une faible différence entre les deux groupes de valeurs et prouve encore l'adéquation de la loi de Gumbel avec l'échantillon de la station Normanville.

	Caractéristique des débits théoriques	Caractéristique de l'échantillon
Nombre d'observation	57	57
Minimum	2,8	3,8
Maximum	17,9	15,6
Moyenne	7,8	7,8
Écart type	2,4	2,4
Médiane	7,5	7,4
Coef. de variation	0,31	0,3
Coef. d'asymétrie	1,5	1,0

Tableau B- 14 Comparaison statistique entre valeurs observées et celles calculées (station de Normanville)

Après l'ajustement des données de la station de Normanville par la loi de Gumbel, nous avons estimé les quantiles Q_T suivant les différentes périodes de retour T (tableau B-15). Ces quantiles présentent les valeurs théoriques de la loi de Gumbel.

Temps de retour (ans)	Probabilité au non-dépassement	Débit calculé (m ³ /s)
2	0,5	8,74
5	0,8	10,88
10	0,9	12,29
20	0,95	13,65
50	0,98	15,40
100	0,99	16,72
200	0,995	18,03

Tableau B- 15 Quantiles de débit selon les différentes périodes de retour (station de Normanville)

A partir du tableau précédent, nous construisons une présentation graphique des différents quantiles Q_T ainsi que les valeurs observées et ajustées selon la loi Gumbel (figure B-20). Cette présentation nous montre un fort ajustement des observations réelles par rapport aux valeurs théoriques de la loi de Gumbel spécialement pour les débits extrêmes. Cet ajustement des débits extrêmes rend les quantiles Q_T , d'importantes périodes de retour, relativement fiable.

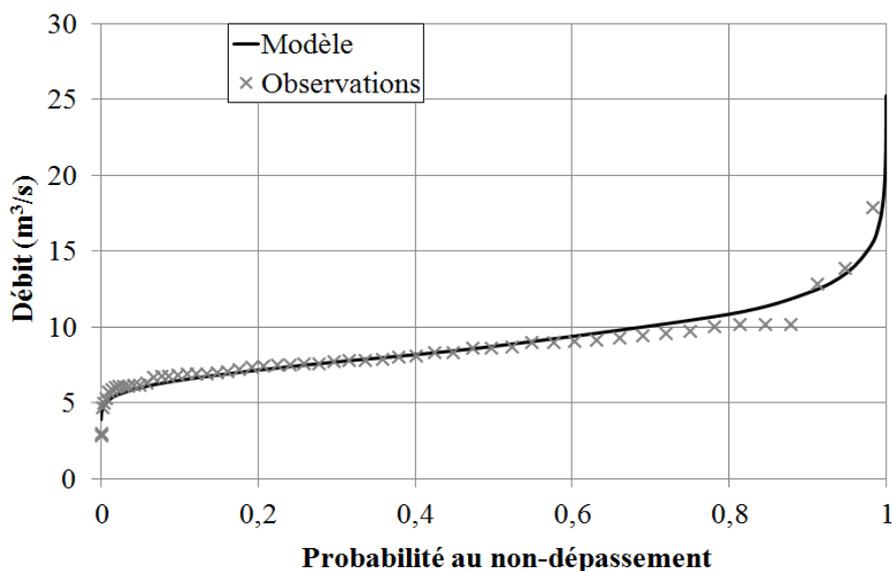
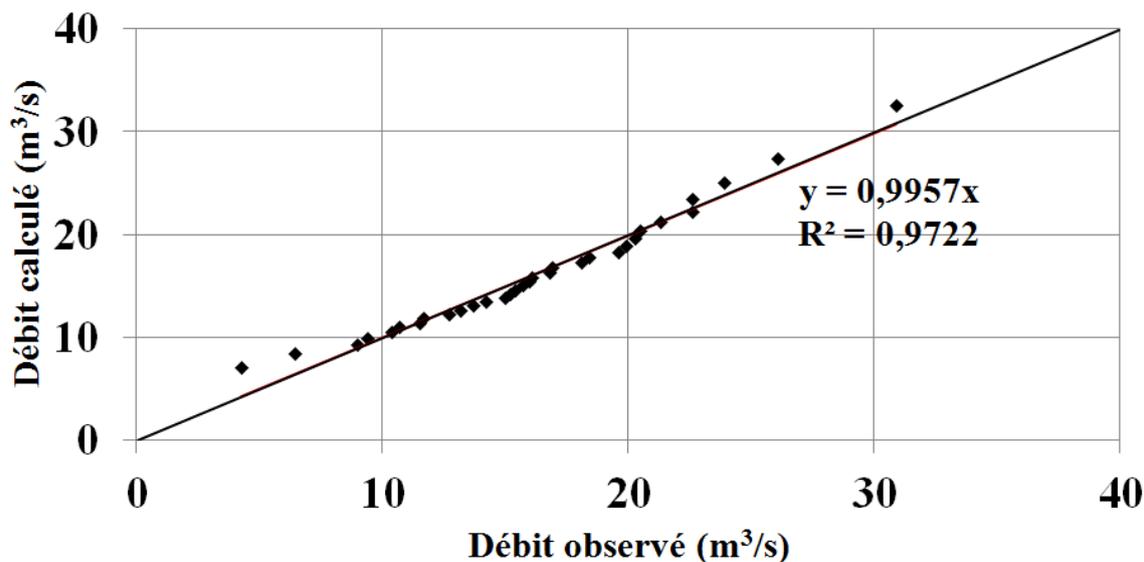


Figure B- 22 Comparaison graphique entre débit observé et débit calculé par Gumbel (station de Normanville)

4-3- Station de Muzy (bassin versant de l'Avre)

L'ajustement de la station débitmétrique de Muzy (Exutoire de l'Avre) par la loi de Gumbel montre une corrélation quasi-parfaite entre les valeurs calculées et celles observées (figure B-19). En effet, le nuage des points a une tendance linéaire indiquant ainsi une adéquation acceptable entre la loi de Gumbel et l'échantillon de la station de Muzy. Cette adéquation est testée par le test de Kolmogorov-Smirnov. Ce test indique que le risque de rejeter faussement l'hypothèse d'adéquation entre les deux échantillons testés (observées et

théoriques) est de 99,8 % (supérieur au seuil de signification de 5 %). Autrement dit, la différence entre les deux échantillons n'est pas significative.



— Linéaire (Débit observé/calculé) — Linéaire (droite X = Y)

Figure B- 23 Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour la station de Muzy

La comparaison entre les caractéristiques statistiques des deux séries de données réelles et théoriques donne une faible variation dans les extrêmes et les paramètres de formes (tableau B-16). Cette faible variation indique globalement une quasi-semblance entre l'échantillon des maxima étudié et les calculs de la loi de Gumbel. Cette loi produit une faible variation entre les deux groupes de données et ainsi, de faibles erreurs.

	Caractéristique des débits calculés	Caractéristique de l'échantillon
Nombre d'observation	32	32
Minimum	4,3	7,1
Maximum	30,9	32,5
Moyenne	16,2	16,2
Écart type	5,8	5,7
Médiane	15,9	15,2
Coef. de variation	0,36	0,35
Coef. d'asymétrie	0,3	0,9

Tableau B- 16 Comparaison statistique entre valeurs observées et celles calculées (station de Normanville)

Après cette étape d'ajustement de la loi de Gumbel, nous avons estimé les quantiles des débits Q_T en appliquant l'inverse de cette loi sur les probabilités au non-dépassement des différentes périodes de retour T (tableau B-17). Ces quantiles présentent les valeurs théoriques de la loi de Gumbel.

Temps de retour	Probabilité au non-dépassement	Débit calculé (m ³ /s)
2	0,5	15,24
5	0,8	20,42
10	0,9	23,84
20	0,95	27,13
50	0,98	31,38
100	0,99	34,57
200	0,995	37,75

Tableau B- 17 Quantiles de débit selon les différentes périodes de retour (station de Normanville)

Le calcul des différents quantiles Q_T nous mène à un traçage d'un graphique de présentation et de comparaison des deux types de valeurs (réellement observées et théoriques) (figure B-24). Le nuage de points a un bon ajustement suivant la courbe théorique de la distribution de la loi de Gumbel. Cet ajustement est remarquable même pour les valeurs extrêmes ce qui leur donne plus de signification scientifique.

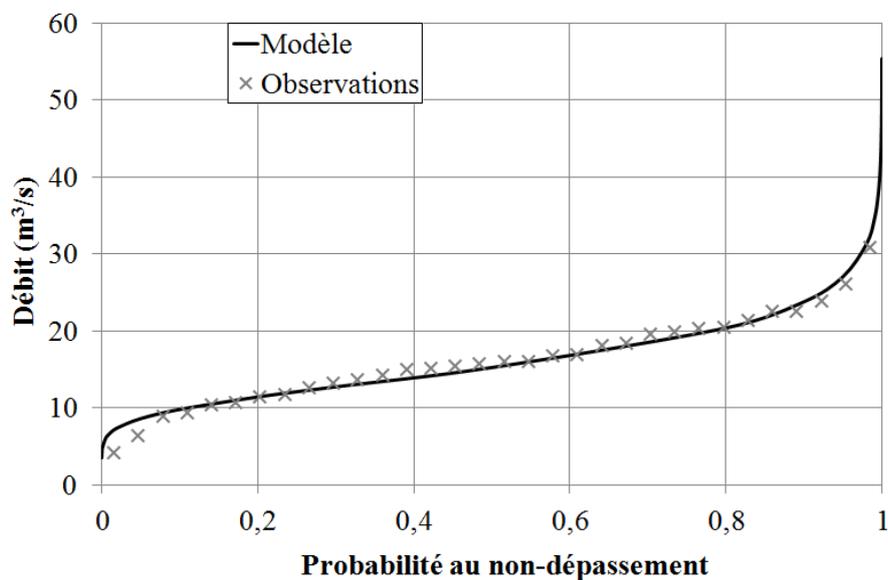


Figure B- 24 Comparaison graphique entre débit observé et débit calculé par Gumbel (station de Muzy)

Conclusion du deuxième chapitre

Dans ce chapitre, nous avons effectué une analyse critique des données pluviométriques, débitométriques et piézométriques dans la zone d'étude. Cette analyse a identifié une qualité de données satisfaisante pour les données débitométriques et assez satisfaisante pour celles pluviométriques et piézométriques. Par contre, ces qualités restent exploitables dans une modélisation hydrologique essentiellement pour les données pluies et débits.

L'analyse statistique des données pluviométriques, débitométriques ainsi que piézométriques des bassins versants d'étude (Eure, Iton et Avre) a permis d'identifier une variabilité temporelle et spatiale nette dans le fonctionnement hydrologique de la zone. Elle a abouti à l'identification de l'interaction entre les différents paramètres étudiés (pluie-débit-piézométrie). En effet, le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Eure, ainsi que ses composantes Iton et Avre, sont fortement touchés par la variation hydrogéologique annuelle et saisonnière. Ce paramètre joue le rôle de l'intermédiaire entre les pluies et les écoulements dans les rivières de l'Eure.

L'analyse fréquentielle des maxima annuels au niveau des trois stations débitométriques (Louviers, Normanville et Muzy) a été effectuée afin de quantifier le risque des crues extrêmes. Cette analyse ajuste différents échantillons suivant la loi de Gumbel. Elle a abouti à une estimation satisfaisante des crues ainsi que leurs périodes de retour.

La démarche méthodologique proposée a permis une synthèse sur la nature hydrologique des bassins versants analysés sur la base d'outils statistiques très différents, dont chacun apporte des éléments d'informations plus spécifiques. Cet apport sera utile dans la définition des relations non-linéaire pluie-débit pour créer et appliquer un modèle non-linéaire à base de réseaux neurones artificiels (RNA ou ANN) pour une prévision des crues.

**CHAPITRE III. MÉTHODOLOGIE RNA ET PREMIÈRE
APPLICATION : PRÉVISIONS DES CRUES AU NIVEAU
DE LA STATION LOUVIERS**

Dans la troisième partie, nous présentons les étapes de la création des modèles des réseaux de neurones artificiels (RNA) de prévisions des crues ainsi que son application sur le bassin versant de l'Eure (station Louviers). Cette application a pour objectif d'anticiper des crues à des horizons de prévisions (+6h, +12h, +18h, +24h et +48h). La création d'un tel modèle nécessite un passage par plusieurs étapes afin de réaliser une modélisation performante et de produire une prévision fiable pour protéger les personnes et les biens. Avant d'entamer cette modélisation, nous donnons un aperçu sur la technique RNA et ses applications dans le domaine de l'eau ainsi que sur la création d'une méthodologie ayant pour but de créer un modèle RNA fiable de prévision des crues.

I- Réseaux de neurones artificiels

1- Principe général

Le réseau de neurones artificiels (RNA) simule le principe de fonctionnement du cerveau humain qui gère un flux d'informations à partir d'une base de données d'apprentissage (Lippmann, 1987 ; Hornik, 1989 ; Hsu, 1997 ; Najjar, 1997 ; Thiria, 1997 ; Piechowiak, 2004). C'est un puissant modèle qui permet de calculer et d'établir la complexité des relations entrée-sortie d'un système (Najjar, 1997). Il est lourdement interconnecté afin d'adapter et d'identifier tous les poids entre les variables dans un jeu de données. C'est un outil de modélisation et de simulation conçu pour résoudre des problèmes complexes tel que la reconnaissance de formes, les relations non linéaires, la classification, etc. (Rumelhart, 1986 ; ASCE, 2000). Les RNA de type perceptron multicouches (PMC) ou à fonctions radiales (RFR) sont les modèles couramment utilisés pour simuler des relations non linéaires (Zaier, 2010). En particulier, les PMC⁴⁴ sont les plus usités et les plus sophistiqués (Lallahem, 2003 ; Sion, 2011) raison pour laquelle ils ont été choisis dans le cadre de ce travail. Le RNA ne présente pas un modèle explicite physiquement, mais il présente une technique durable pour développer des simulations d'entrées-sorties (Uvo, 2000). Cette technique se base sur les étapes principales suivantes: construction, apprentissage, validation et exploitation du modèle RNA (Piechowiak, 2004).

Afin de comprendre ce qui précède, nous allons aborder quelques définitions de base sur les RNA.

⁴⁴ Ce type de réseau sera détaillé par la suite.

2- Inspiration biologique

Le réseau de neurones biologiques confère au RNA son principe de fonctionnement. Il a permis la réalisation des puissants modèles informatiques qui peuvent résoudre des problèmes d'analyse des données et de statistique. Ces modèles RNA sont inspirés des tentatives d'imiter la tolérance aux erreurs et la capacité d'apprentissage des systèmes de neurones biologiques en simulant la structure du cerveau⁴⁵. Ce cerveau est composé essentiellement d'un grand nombre de neurones massivement interconnectés. Ces derniers sont des cellules spécialisées qui permettent de créer, recevoir et diffuser un signal électrochimique. Comme toute cellule biologique, les neurones ont un corps, une structure de branchement d'entrée « les dendrites » et une structure de sortie de ramification « les axones ». Les axones d'une cellule sont liés aux dendrites d'un autre via une « synapse ». L'activation d'un neurone déclenche un signal électrochimique le long de l'axone. Ce signal traverse les synapses des autres neurones, qui peuvent à leurs tours les exciter, propageant ainsi le signal sur la totalité du système nerveux. Un neurone ne se déclenche que si le signal total reçu au niveau des dendrites dépasse un certain seuil. La combinaison des pouvoirs d'un grand nombre de neurones engendre des résultats incroyables. Elle peut achever diverses tâches cognitives complexes comme l'apprentissage et même la conscience⁹. Par analogie, un RNA est formé par des nœuds (neurones) qui interagissent entre eux pour céder au réseau son comportement global. Le réseau de neurones artificiels est conçu pour calquer le fonctionnement du cerveau humain par l'acquisition des connaissances à travers un processus d'apprentissage et calculer des poids optimaux pour les interconnexions des cellules nerveuses (Liu, 2003). Il est composé par des processeurs élémentaires fortement connectés qui fonctionnent en parallèle. Avec un changement d'état dynamique, chaque processeur reçoit et traite des informations afin de calculer une sortie unique (Hecht-Nielson, 1990). Le RNA, à travers ces critères, permet l'utilisation d'une structure de programmation parallèle capable de représenter la complexité des processus non-linéaires qui relient les entrées et les sorties de tout système (Hsu, 1997). Il peut atteindre des résultats remarquables par rapport aux autres types de modèles. Cependant, il n'atteint pas les performances d'un cerveau humain.

3- Neurone artificiel

Un RNA est un réseau qui traite les informations numériques d'entrée avec des processeurs ou des nœuds interconnectés : les neurones artificiels. La figure C-1 montre l'analogie entre le neurone biologique et celui artificiel, et leurs principaux organes.

⁴⁵ Manuel électronique de « STATISTICA 8 ».

Le neurone artificiel reçoit l'information numérique d'entrées des neurones amont à travers leurs connexions pondérées (chaque connexion a une valeur numérique : le poids). Il est aussi connecté aux autres neurones artificiels d'aval par plusieurs liaisons. Ces derniers assurent la transmission du signal calculé aux neurones artificiels de l'aval. Selon Lallahem (2003), un neurone artificiel est caractérisé par trois concepts : son état, ses connexions avec d'autres neurones et sa fonction d'activation.

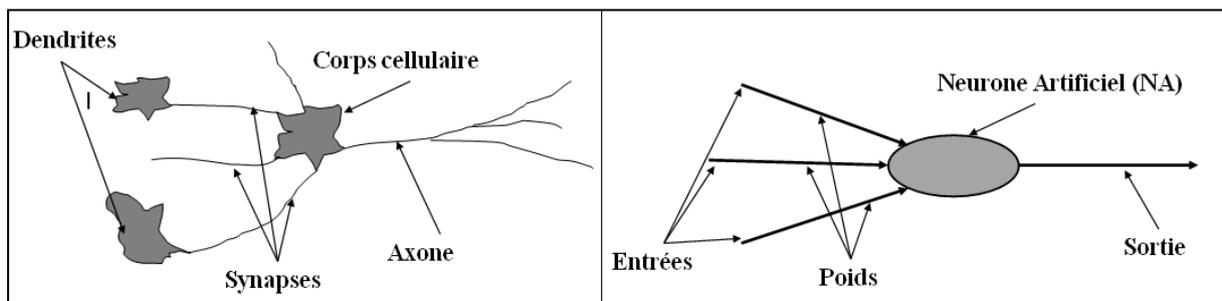


Figure C- 1 Neurone biologique / Neurone artificiel

Neurone biologique	Neurone artificiel
Corps cellulaire	Neurone artificiel
Dendrite	Entrée
Axone	Sortie
Synapse	Poids

Tableau C- 1 Analogie neurone biologique / neurone artificiel

3-1- État du neurone artificiel

Un neurone artificiel est caractérisé par son état interne dynamique. Il reçoit des signaux qui lui permettent de modifier son état à l'aide des fonctions mathématiques (Lallahem, 2003). Soit « A » l'ensemble des états possibles d'un neurone artificiel. « A » pourra prendre toutes les valeurs possibles, par exemple {0, 1} ou « 0 » sera interprété comme l'état inactif et « 1 » l'état actif ; dans le cas des couleurs d'image, A pourra prendre un nombre plus grand de valeurs {0, 1,..., P} où ces valeurs représentent les niveaux entre noir et blanc. Un neurone artificiel possède un état interne qui varie en deux étapes (figure C-2). La première c'est la réception des poids des entrées et la détermination de la somme pondérée de ces derniers. La deuxième, c'est le changement d'état des signaux en appliquant une fonction qui décrit la non-linéarité du système sur cette somme pondérée : c'est la fonction de transition ou d'activation.

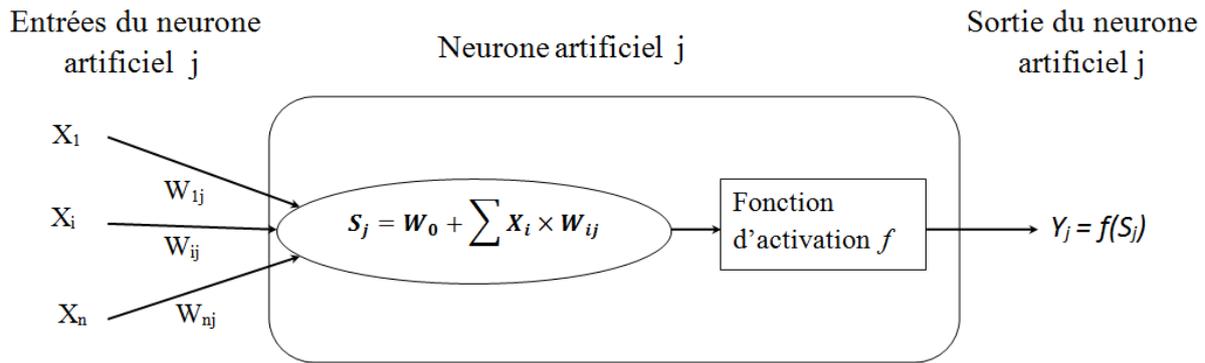


Figure C- 2 Processus de calcul de l'état du neurone artificiel

3-2- Interconnexions neuronales

Les réseaux de neurones artificiels se composent des couches de neurones artificiels interconnectés. Ces interconnexions permettent à ces réseaux l'identification des complexités des systèmes ainsi que l'apprentissage du réseau. La modification d'état d'un neurone dépend de l'état et du poids des autres neurones artificiels liés au neurone précédent. Autrement dit, un RNA se compose de plusieurs neurones artificiels (NA) avec n neurones d'entrée et p neurones de sortie. Il s'agit d'un système non autonome. Il reçoit des variables externes descriptives de l'état du système par le biais des entrées X_i . La connexion entre les NA d'ordre i et j se fait à travers le poids W_{ij} . Le niveau d'activation du $j^{\text{ème}}$ NA se modifie par la somme pondérée S_j des poids des liaisons de n NA situés en amont (figure C-2). Puis en seconde étape, S_j est soumise à l'application de la fonction d'activation « f », qui est fixée pour chaque NA selon les objectifs de la modélisation, afin de donner un nouveau seuil d'activation. Ces étapes se propagent entre les neurones d'entrée jusqu'à arriver aux neurones de sorties pour donner au système son aspect général.

Les connexions entre les NA dans un RNA déterminent sa topologie. Ils permettent de distinguer quatre types de réseaux: les réseaux à connexions récurrentes, les réseaux à connexion locale, les réseaux à connexions complètes et les réseaux multicouches (Touzet, 1992). Dans leurs travaux, Touzet (1992) et Haykin (1994) détaillent l'architecture des différents types d'interconnexions des NA.

Dans ce projet, nous utiliserons des RNA organisés par couches (les perceptrons multicouches). Pour ce type de RNA, les connexions se font entre un ou plusieurs NA d'une couche et un NA d'une autre couche (figure C-3).

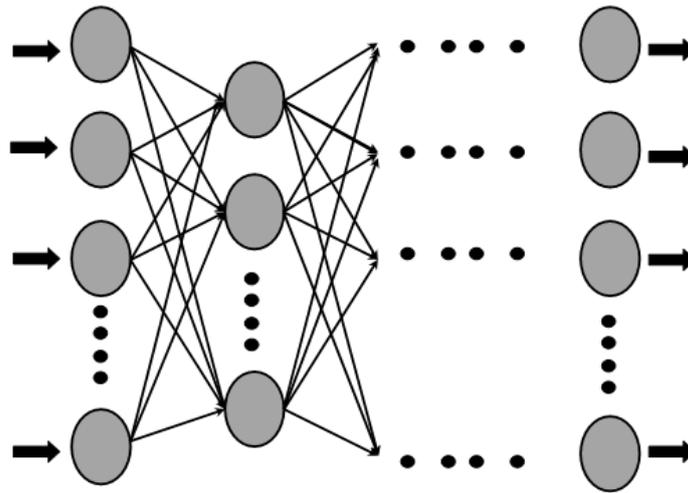


Figure C- 3 RNA de type perceptrons multicouches (PMC ou MLP)

3-3- Fonction d'activation

Les neurones artificiels calculent leurs états à partir des signaux reçus des autres NA dans un RNA. Ces calculs sont effectués à partir de la fonction d'activation « f », une fonction mathématique pouvant profondément influencer la performance du modèle du RNA. Elle peut avoir différentes formes dans un RNA : la fonction identique, la fonction sigmoïde, la fonction tangente hyperbolique, la fonction exponentielle, la fonction Softmax, la fonction Gaussienne etc. Elle est définie par l'utilisateur et permet de paramétrer l'influence d'un neurone sur un autre dans le transfert d'information. Les fonctions les plus usitées sont la fonction « sigmoïde » et la fonction « tangente hyperbolique » (Chokmani, 2008). Selon Lallahem (2003), la fonction sigmoïde est la plus utilisée, car elle est inspirée directement du comportement des cellules nerveuses face aux signaux reçus et introduit la non-linéarité du système. Sa présentation mathématique est la suivante :

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}} \quad (\text{Eq. C - 1})$$

Où s est la variable.

4- Perceptron Multicouche

Un perceptron multicouche (PMC ou MLP en anglais) se compose de trois types de couches successives (Haykin, 1999 ; Reed&Marks, 1998), comportant des neurones artificiels (des éléments de calcul) (figure C-2). Il englobe successivement une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie (figure C-4). Ces couches sont interconnectées au travers des poids de leurs neurones (Najjar, 2000). Les neurones de la même couche ne sont pas connectés.

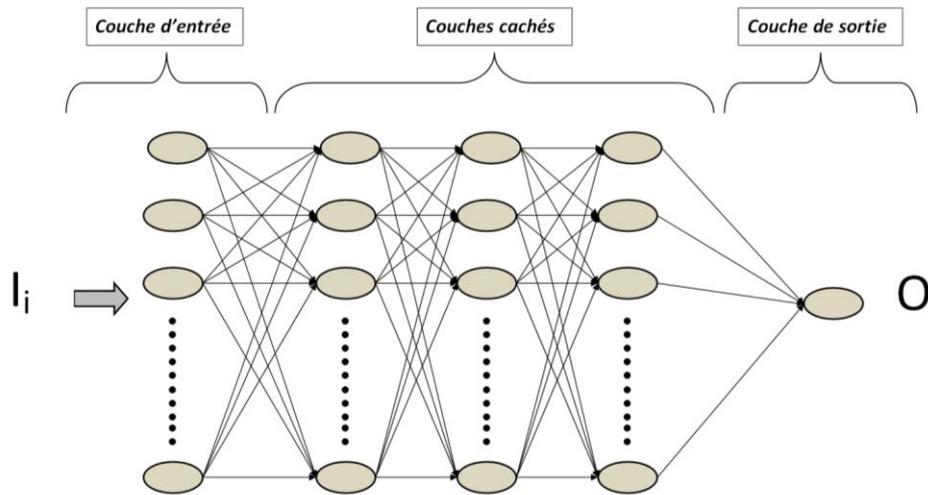


Figure C- 4 Exemple d'un RNA avec une couche d'entrée, trois couches cachées et une couche de sortie

La détermination de l'architecture du RNA est une étape cruciale. C'est à partir de l'architecture du réseau qu'est introduite l'influence de chaque paramètre dans le système ayant pour but de produire des modélisations fiables. Le nombre de couches, le nombre de neurones par couche et les différentes fonctions d'activation déterminent l'architecture du RNA (Chokmani, 2008). Tous ces paramètres sont déterminés selon le problème traité. Le vecteur X (X_1, X_2, \dots, X_n) présente les états de n neurones d'entrée. Il est fixé selon le cas d'étude. Le vecteur Y (Y_1, Y_2, \dots, Y_p) présente les états calculés de p neurones par le RNA dans la couche sortie. Le nombre de neurones dans la couche cachée est déterminé selon l'apprentissage de notre réseau en évitant le sur-apprentissage qui peut être causé par un trop grand nombre de neurones cachés.

La première couche reçoit les variables d'entrées (X_i) à travers les neurones d'entrées i , les transforme avec la fonction d'activation f sur le neurone d'entrée et les envoie aux neurones j de la première couche cachée. Généralement, les fonctions d'activation des neurones d'entrées sont de type identique, c'est-à-dire que les signaux d'entrées restent inchangés. La couche cachée se compose des neurones de traitement qui reçoivent les sommes pondérées S (Eq. C-2) issues de la couche d'entrée, puis effectuent leurs transformations (avec la fonction d'activation) et finalement les transfèrent à la couche suivante (cachée ou sortie selon l'architecture RNA déterminée).

$$S_{ij} = \sum_i^n X_i \times W_{ij} + W_0 \quad (\text{Eq. C - 2})$$

Avec : n est le nombre d'éléments d'entrée ; X_i est la valeur de la sortie du i^{e} neurone de la couche précédente ; W_{ij} est la valeur du poids entre le neurone i et le neurone j ; W_0 est le biais.

Les PMC fonctionnent le plus souvent avec une seule couche cachée qui offre déjà un degré de liberté suffisant et se rapproche d'une fonction de type non-linéaire (Funahashi, 1989 ; Hornik, 1989). Selon Riad (2003), quelque soit le nombre de couches cachées dans un PMC, il existe un PMC équivalent avec une seule couche cachée. Donc, dans cette étude, nous nous limiterons à des PMC avec une seule couche cachée.

L'équation de production dans un PMC à trois couches (n neurones dans la couche d'entrée, m neurones dans la couche cachée et p neurones dans la couche de sortie) est la suivante :

$$Y_k = f_k \left(\sum_{j=1}^m W_{jk} \times f_j \left(\sum_{i=1}^n X_i \times W_{ij} \right) \right) + W_0 \quad (\text{Eq. C - 3})$$

Avec : Y_k est l'une des sorties du système ; f_k et f_j sont successivement les fonctions d'activation du neurone k de la couche sortie et du neurone j de la couche cachée ; W_{jk} et W_{ij} sont successivement les poids entre le j^{e} neurone et le k^{e} neurone de sortie et le poids entre le i^{e} neurone et le j^{e} neurone ; W_0 le biais.

II- Application de la méthode du RNA sur le BV de l'Eure

Le RNA est un modèle stochastique de type « boîte noire » capable de surpasser la non-linéarité d'un système. Il fournit un modèle équivoque physiquement, par contre, c'est une technique durable pour développer des modélisations entrées-sorties des systèmes complexes. Ses capacités à résoudre la linéarité et la non-linéarité des systèmes expliquent son utilisation dans de nombreux domaines de la science et de l'ingénierie.

L'hydrologie est l'étude scientifique de l'eau et ses propriétés, sa distribution et ses effets sur la surface de la terre, le sol et l'atmosphère : relations connues pour être fortement non linéaires. La plupart des processus hydrologiques présentent un degré élevé de variabilité temporelle et spatiale. Ils sont marqués par des questions de non-linéarité des processus physiques et des incertitudes dans les estimations des paramètres. Plusieurs problèmes hydrologiques ont été traités avec succès par les techniques du RNA. Ces derniers ont un rôle marquant dans la modélisation des processus hydrologiques. Ils ont la capacité d'extraire le comportement général du système à travers les interrelations entrées-sorties. Cette technique a été utilisée dans plusieurs ouvrages de modélisation pluie-débit (Smith et Eli, 1995 ; Hsu, 1997 ; Abrahart, 1999 ; Tokar et Johnson, 1999 ; Sudheer, 2002 ; Rajurkar, 2003 ; Riad, 2003 ; Chang, 2007), de la modélisation hydrogéologique (Lallahem, 2003 ; Lallahem, 2004 ;

Hani, 2006 ; Changjun, 2009 ; Zhang, 2002 ; Wang, 2002), de la prédiction des débits (Elshorbagy, 2000 ; Dawson, 2005), de la prévision des débits (Pang, 2006 ; Chiang, 2004 ; Toukourou, 2010 ; Boucher, 2010 ; Coulibaly, 2000 ; Sivakumar, 2002; Shamseldin,1997) et de la prévision de pluie (Luk, 2001 ;). Dans le domaine de la géotechnique, les RNA sont intervenus dans les travaux de : Kurup et Dudani, 2002 ; Najjar et Zhang, 2000. Aussi, dans le domaine de la qualité de l'eau, les RNA ont été appliqués afin de déterminer les variations des paramètres d'eau (Zhang, 1997 ; Eslamian, 2009 ; Aguilera, 2001 ; Zuo, 2008 ; Maier et Dandy, 1996). De même, dans le domaine de l'hydraulique urbaine, les RNA artificiels ont été appliqués avec des performances importantes (Jafar, 2009, Khorchani, 2003).

Un degré considérable de non-linéarité spatio-temporelle des précipitations et des ruissellements est généralement présent sur des bassins versants de superficie importante. La présence d'un tel degré de complexité rend la modélisation, et surtout la prévision, difficile à réaliser. Cette difficulté est liée aux interrelations compliquées des paramètres hydrologiques dans un système géographique complexe comme le bassin versant de l'Eure. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous appliquons les RNA afin de développer un modèle de prévision des crues fiables à pas de temps horaires pour le bassin versant de l'Eure, de l'Iton et de l'Avre.

1- Méthodologie d'application

Dans une modélisation RNA la reconnaissance du système se fait à travers la phase d'apprentissage. La fiabilité de cette phase dépend de l'architecture de RNA qui diffère d'un système à un autre. La phase de construction (ou la création de l'Architecture du RNA) est l'une des principales phases de la modélisation RNA. Dans cette étape, nous déterminerons l'architecture qui consiste à fixer le nombre de couches, le nombre de neurones dans chaque couche et le choix des fonctions d'activation associées aux neurones. Ensuite, nous passerons à l'apprentissage du réseau de neurones artificiels. Cet apprentissage est une phase de calcul et d'optimisation des poids informatifs des interrelations non-linéaires entrées-sorties. Cette étape est itérative. Elle est suivie par deux étapes de vérification « test » et « validation ». Comme dans toute démarche de modélisation, ces dernières étapes sont essentielles avant de passer à l'exploitation d'un RNA.

Maier (2001) propose une approche systématique pour optimiser la performance du modèle RNA. Cette approche comporte la sélection des variables d'entrée, la détermination de l'architecture du réseau adapté, l'optimisation de l'apprentissage du réseau et l'utilisation d'une méthodologie de validation fiable (Chokmani, 2008).

La façon la plus appropriée et la plus efficace pour déterminer l'architecture du RNA (nombre de neurones d'entrée, cachés, de sortis et leurs fonctions d'activation) est d'adopter les essais expérimentaux (essais-erreurs) selon les objectifs d'application. Après le choix des variables d'entrée, il est impératif de déterminer le nombre de nœuds dans la couche cachée. En effet, la dimension de cette couche influence directement le fonctionnement du réseau, un nombre assez important de nœuds garantira un nombre suffisant de degrés de liberté pour le RNA, et assez petit minimisera le risque de perte de la capacité de généralisation du réseau. Par contre, un accroissement inutile de la dimension de la couche cachée mènera à une augmentation de temps de calcul de l'apprentissage et de l'exploitation du RNA et au sur-apprentissage du réseau. Le nombre de neurones artificiels dans la couche de sortie est fixé selon l'objectif de l'application. Ici, nous allons prévoir les débits à $t+t_0$ ($t_0 = 6h, 12h, 18h, 24h$ et $48h$) alors la sortie sera composée d'un seul neurone artificiel qui présente $Q(t+t_0)$ selon chaque horizon de prévision t_0 .

Généralement, toutes les variables d'un système n'ont pas les mêmes apports informatifs pour une modélisation, alors, il est intéressant de sélectionner un vecteur d'entrée convenable pour la modélisation de RNA (Bowden, 2005). Inéluctablement, nous allons appliquer la corrélation-croisée afin de déterminer les variables les plus informatives par rapport aux débits futurs $t+t_0$ au niveau de la station de Louviers (exutoire du bassin versant de l'Eure). Cette corrélation-croisée consiste à calculer le coefficient de corrélation (Eq. C-10) entre une entrée et une sortie du système avec à chaque fois des décalages de temps. Les variables d'entrées et sorties sont déterminées à travers l'analyse hydrologique du bassin versant de l'Eure effectuée précédemment. Cette analyse a indiqué que le débit à l'exutoire dépend fortement de l'évolution de la nappe sous-jacente. Cette nappe influence directement les écoulements surfaciques des rivières avec un contact permanent nappe-lit de rivière assuré par les formations géologiques. L'évolution des nappes est alors implicite dans les valeurs de débits. Dans ce cas, nous pouvons nous limiter à deux types d'entrées du modèle, les pluies et les débits. Ces deux types d'entrée correspondent aux exigences du SPC SACN⁴⁶. Concernant la corrélation croisée, les variables d'entrées sont soit les données de pluie horaires antérieures, soit les données de débit horaires antérieures à l'exutoire. La sortie du système est le débit $Q(t)$. En effet, la sélection des variables informatives de $Q(t)$ permet de sélectionner les variables informatives de l'hydrologie future. Autrement dit, les variables explicatives du $Q(t)$ représentent les dernières variables du passé qui peuvent expliquer $Q(t+t_0)$.

⁴⁶ La prévision des crues en fonction des données pluie et débit est l'une des exigences du SPC SACN

Subséquentement, nous utiliserons l'expérimentation numérique (essais-erreurs) en effectuant différentes combinaisons de pluie, de débits et de pluies-débits afin de déterminer les variables d'entrées optimales du RNA.

La détermination de l'architecture de RNA consiste aussi à choisir la fonction d'activation pour les nœuds des deux couches cachées et de sortie. La fonction utilisée ici est la fonction « sigmoïde ». Un traitement préalable des variables de cette fonction est indispensable pour la prise en compte des totalités des valeurs (faibles et fortes) et pour éviter la saturation des sigmoïdes avec les fortes valeurs de la base de données (Siou, 2011). Ce traitement consiste à normaliser toutes les valeurs de la base de données entre 0 et 1. Cela se fait à travers l'équation suivante :

$$\bar{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{Eq. C - 4})$$

Avec : X est la valeur réelle à normaliser, X_{\min} est sa valeur minimale, X_{\max} est sa valeur maximale et \bar{X} est la valeur normalisée. Cette transformation place les données de la base d'entrées entre [0,1].

Les réseaux neuronaux sont des outils hautement non-linéaire, qui sont calés en utilisant des techniques itératives. La technique la plus usitée pour le calage des réseaux de neurones artificiels est l'algorithme BFGS⁴⁷. Généralement, il est gourmand en mémoire et exige un calcul massif. Néanmoins, il peut n'exiger qu'un petit nombre d'itérations pour caler un RNA en réalisant un taux de convergence rapide.

$$E_{App} = \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2 \quad (\text{Eq. C - 5})$$

Avec E_{App} : Erreur d'apprentissage

y'_i : valeur calculée

y_i : valeur observée

n : nombre d'observations

L'apprentissage de RNA nécessite des données historiques afin de caler le modèle de prévision des crues. Il calcule les poids des interconnexions neuronales des différentes couches pour l'identification du système. Cet apprentissage détermine la qualité du modèle du RNA non fini avec les valeurs injectées (des données historiques) dans la couche sortie et évalue la performance des poids déterminés en calculant l'erreur quadratique entre les sorties observées et estimées par l'équation (Eq. C-5). L'erreur se propage en rétro-propagation afin

⁴⁷ Manuel électronique de « STATISTICA 8 »

d'ajuster les poids des interconnexions. Après chaque itération, le modèle non-fini passe en phase de test avec une autre base de données différente de celle d'apprentissage. La comparaison entre l'erreur du test et celle de l'apprentissage permet d'éviter le sur-apprentissage du RNA. Si la différence entre les deux types d'erreur décroît alors l'apprentissage continu, sinon nous sommes dans le cas d'un sur-apprentissage et les itérations s'arrêtent. Ces étapes se répètent pour chaque réseau de neurones artificiels jusqu'à avoir le meilleur critère de performance (erreur minimale), les itérations s'arrêtent et le modèle de RNA s'enregistre. Finalement et après l'enregistrement du modèle le plus performant, nous passons à la phase de la validation (deuxième test) et de l'exploitation où nous appliquons le modèle sur une base de données différente de celles de l'apprentissage et du test.

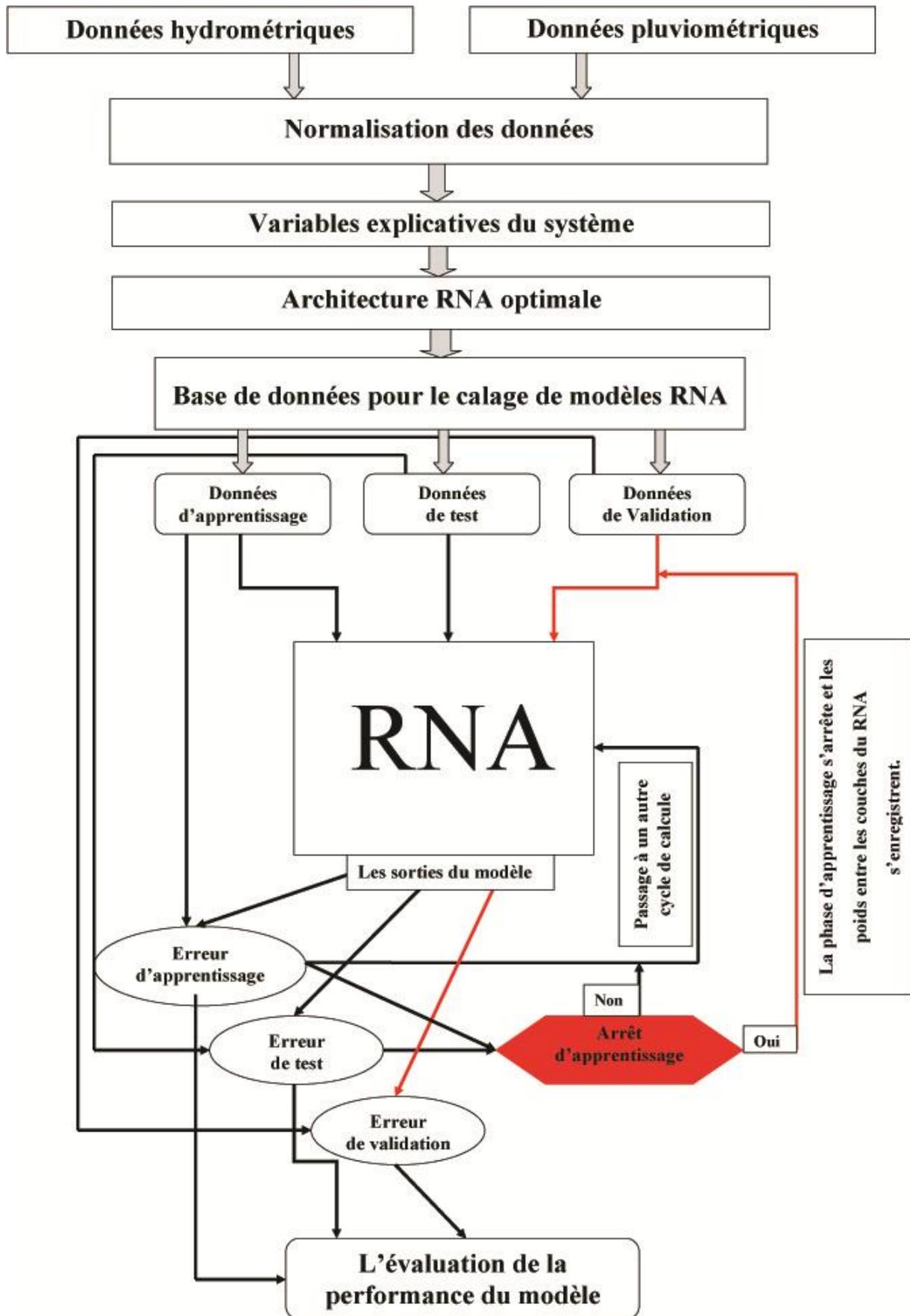


Figure C- 5 Structure de la modélisation par les réseaux neurones artificiels

2- Jeux de données de la modélisation RNA

Les réseaux de neurones artificiels sont appliqués pour le calage en premier lieu et l'exploitation en second lieu d'un modèle de prévision des crues. Ils utilisent les données horaires de pluie moyenne « P » et de débit « Q » du bassin versant de l'Eure (station Louviers). Le risque de débordement de la rivière Eure est important en se rapprochant de la station Louviers⁴⁸. Les crues de 1995, 1999 et 2001 sont les crues les plus marquantes au niveau de la station Louviers où leurs niveaux d'alerte ont été « Orange » et « Rouge » indiquant des zones urbaines touchées par les débordements et des dégâts matériels.

Période de la crue	Valeur (m ³ /s)	Niveau d'alerte
Janvier 1995	119	Orange
Février 1995	59	Jaune
Mars 1995	65,4	Jaune
Janvier 1998	57,1	Vert
Octobre 2000	53	Vert
Novembre 2000	71,5	Jaune
Décembre 2000	91	Orange
janvier 2001	102	Orange
Février 2001	90,9	Orange
Mars 2001	142	Rouge
Avril 2001	74,5	Jaune
Mai 2001	63,9	Jaune

Tableau C- 2 Description de la base de données de calage

Dans ce travail, et selon les exigences du SPC SACN (ou SPC 76), la prévision des crues se fait en fonction des données de pluie et de débit. Les données hydrométriques utilisées dans cette recherche ont été obtenues auprès du service de prévision des crues de la Haute-Normandie (SPC 76). La base de données contient des observations horaires de pluviométries moyennes au niveau du bassin versant de l'Eure entre 1993-2010 et de débit au niveau de la station Louviers entre 1985-2010.

La création de la base de données de calage est une étape principale pour la réalisation d'un modèle optimal à base du RNA ayant pour but d'anticiper les mesures de débit des événements hydrologiques. Cette base contient des observations horaires de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Eure et du débit au niveau de la station de Louviers. La pluviométrie moyenne horaire a été introduite afin d'exprimer la variabilité spatiale et temporelle de la climatologie à l'intérieur du bassin versant de l'Eure. Cette variation

⁴⁸ L'enjeu de la prévision des crues de l'Eure-aval a été détaillé dans le chapitre I II-1-.

influence énormément les évènements hydrologiques à travers la nappe qui joue le rôle d'intermédiaire entre la pluie et les écoulements surfaciques dans le bassin versant de l'Eure. Les débits horaires antérieurs de la station Louviers introduisent indirectement l'influence hydrogéologique sur l'écoulement surfacique au niveau de Louviers. Les données choisies pour la base de calage sont celles qui expriment les crues et les décrues des évènements survenus en 1995, 1998, 2000, 2001 et 2002 (tableau C-2).

Afin d'éviter le sur-apprentissage du modèle, la base de données de calage est divisée en trois parties:

- La première partie est destinée à l'apprentissage pour reconnaître le dynamisme de système. Elle est la plus importante des parties (70%).
- La deuxième partie c'est celle du test. Cette partie évite le sur-apprentissage en vérifiant l'évolution des deux erreurs d'apprentissage et du test. Normalement, l'erreur de test diminue en avançant avec les itérations de l'apprentissage, si l'erreur de test commence à augmenter par rapport à celle de l'itération d'avant, alors, l'apprentissage s'arrête pour stopper le sur-apprentissage. Le modèle de RNA retenu est celui qui correspondant au minimum d'erreurs. Cette base de données a 20% de la base de données de calage.
- La troisième partie est celle de la validation. Cette partie n'est pas utilisée durant l'apprentissage du modèle. Après l'arrêt de l'apprentissage et l'enregistrement des poids des interconnexions du modèle le plus performant, la partie de données de validation (10 % aléatoires) nous confirme la performance du modèle de RNA calculé.

Le modèle RNA sera validé avec une deuxième base de données continue et externe à la base de données de calage. Cette base contient des données de la crue de 1999-2000 (tableau C-3).

Période de la crue	Valeur (m ³ /s)	Niveau d'alerte
Décembre 1999	58,7	Jaune
Janvier 2000	110	Orange

Tableau C- 3 Description de la deuxième base de données de validation

3- Critères de performances

L'évaluation de la qualité du modèle doit répondre aux critères de performance. Pour cela, l'introduction des exigences des utilisateurs de la modélisation et de la prévision sont obligatoires pour définir les critères utilisés dans ce travail. Le prévisionniste a besoin d'une bonne anticipation de la montée des crues et la synchronisation entre la crue observée et celle

estimée (Toukourou, 2009). Mais une anticipation peut être médiocre avec des calculs sous-estimant ou surestimant les observations de la crue. Ces anticipations peuvent délivrer des pics fictifs avec possibilité de déclenchement de fausses alertes produisant alors un effet d'insécurité pour la population. L'évaluation de la qualité de la prévision des crues avec un seul critère de performance peut être mauvaise, par exemple, parfois nous pouvons avoir des critères de « Nash » élevés pour des prévisions de crues naïves. Pour passer ces limites, nous avons recours à une évaluation qualitative de la prévision suivant plusieurs critères de performances. L'organisation mondiale de météorologie et d'autres investigateurs (WMO, 1975 ; Nash and Sutcliffe, 1970) ont proposé de nombreux critères à des fins d'évaluation des modélisations et des prévisions en hydrologie. L'évaluation de la modélisation se fait à travers deux groupes d'indicateurs : indicateurs graphiques et indicateurs numériques. Celui graphique est déterminé par l'alignement du nuage de points (débit prévu Q' en fonction du débit observé Q) autour de la droite $y = x$. Nous introduisons aussi des courbes qui présentent les erreurs relatives en fonction des débits observés pour évaluer la performance de la prévision des crues par rapport aux différents niveaux d'alerte. Les critères numériques sont : la Racine Carré Quadratique Moyenne RMSE (**R**oot **M**ean **S**quare **E**rror), critère de NASH, la moyenne de l'erreur relative absolue MARE (**M**ean **A**bsolute **R**elative **E**rror) et le critère de persistance C_p .

3-1- NASH

Le critère de NASH représente numériquement la proportion de la variance totale de la prévision. Il permet de déterminer l'adéquation entre les valeurs calculées ou prévues avec les valeurs observées réellement. Ce critère peut être perturbé par la présence des événements isolés (comme les montées et les décrues brusques). Selon Hreiche (2003), le critère de Nash représente faiblement les petits débits et a une meilleure représentation pour les situations de fortes mesures ainsi que du volume total.

L'expression de critère de Nash est la suivante (Nash et Sutcliffe, 1970) :

$$\text{NASH} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i(t + t_0) - Q'_i(t + t_0))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i(t + t_0) - \bar{Q})^2} \quad (\text{Eq. C - 6})$$

Où :

N : Le nombre de valeurs dans la base de données.

Q_i : La $i^{\text{ème}}$ valeur de débit observée.

Q'_i : La $i^{\text{ème}}$ valeur de débit calculée ou prévue.

\bar{Q} : La valeur moyenne de débit observée.

t : Instant quelconque.

t₀ : Horizon de prévision.

Maximiser le critère de NASH revient à minimiser la différence entre la valeur calculée Q'_i et la valeur observée Q_i . Si nous avons une adéquation parfaite entre les deux courbes observées et calculées alors le critère de Nash est égal à 1. S'il est nul alors nous avons une simulation qui calcule la valeur moyenne observée, ce qui signifie que le modèle est inadéquat.

Selon Toukourou, 2010, dans les applications hydrologiques et selon le type de rivière, les critères de Nash sont acceptables entre 0,60 et 0,70 et excellents s'ils sont supérieurs à 0,90.

3-2- Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne « RMSE »

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE (Eq. C-7) est l'un des critères d'évaluation les plus utilisés dans les travaux de recherche de prévision (Lallahem, 2003 ; Sudheer, 2002 ; Zaier, 2010). Il donne une indication quantitative sur l'erreur des calculs obtenue par le modèle de prévision. Il détermine la déviation de la prévision et de la simulation par rapport à la valeur observée.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i(t + t_0) - Q'_i(t + t_0))^2}{N}} \quad (\text{Eq. C - 7})$$

Où :

N : Le nombre de valeurs dans la base de données.

Q_i : La $i^{\text{ème}}$ valeur de débit observée.

Q'_i : La $i^{\text{ème}}$ valeur de débit calculée ou prévue.

t : Instant quelconque.

t₀ : Horizon de prévision.

La RMSE est égale à 0 si les valeurs calculées et les valeurs observées sont égales.

3-3- Moyenne de l'erreur relative et absolue « MARE »

La moyenne de l'erreur relative et absolue « MARE » est un critère préconisé par les utilisateurs des prévisions, comme la RMSE et le critère de Nash. Ce critère est fréquemment présent dans les travaux de recherche de prévision (Riad, 2003). Il indique la quantité relative de l'erreur par rapport aux valeurs observées réellement. Sa formule est la suivante :

$$\text{MARE} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i(t + t_0) - Q'_i(t + t_0)}{Q_i(t + t_0)} \right|}{N} \times 100 \quad (\text{Eq. C - 8})$$

Où :

N : Le nombre de valeurs dans la base de données.

Q_i : La valeur de débit observée.

Q'_i : La valeur de débit calculée par le modèle de prévision.

t : Instant quelconque.

t_0 : Horizon de prévision.

Comme le critère RMSE, MARE a une valeur de 0 % (valeur idéale) lorsque nous avons une égalité entre les deux valeurs, calculée et observée.

3-4- Critère de persistance « Cp »

Ce critère est très connu dans le domaine de prévision des crues (Fourmigué, 2004 ; Siou, 2011). Il quantifie la qualité de la prévision à t_0 (horizon de prévision) en comparant l'erreur de prévision par rapport à l'accroissement de débit. Il permet la détection des prévisions naïves, où nous avons un modèle de prévision qui prévoit qu'un débit futur à l'instant $t+t_0$ est égal au débit à l'instant t . Selon Kitadinis, 1980, l'expression de la formule C_p est la suivante :

$$C_p = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i(t + t_0) - Q'_i(t + t_0))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i(t + t_0) - Q_i(t))^2} \quad (\text{Eq. C - 9})$$

Où :

N : Le nombre de valeurs dans la base de données.

Q_i : La $i^{\text{ème}}$ valeur de débit observée.

Q'_i : La $i^{\text{ème}}$ valeur de débit calculée par le modèle de prévision.

t : Instant quelconque.

t_0 : Horizon de prévision.

C_p est égale à « 1 » si la prévision est parfaite, entre « 1 » et « 0 » si elle est meilleure que la prévision naïve et négative si la prévision est médiocre.

III- Création du modèle RNA de prévision des crues : station hydrométrique Louviers

1- Architecture optimale du RNA

Le réseau de neurones artificiels se compose d'une couche d'entrée, une cachée et une de sortie avec des fonctions d'activation de type sigmoïdes. Afin de déterminer l'architecture optimale pour le modèle RNA, nous avons lancé plusieurs simulations de diverses combinaisons afin d'assurer l'exploration du champ des possibles. Cependant, une phase de détermination des variables explicatives est primordiale pour fixer l'intervalle des valeurs informatives du modèle à partir de la base de données.

1-1- Sélection des variables informatives du système

Dans ce travail, la détermination des variables informatives du système hydrologique de l'Eure a été effectuée suivant la méthode de la corrélation croisée entre les variables d'entrée et celle de sortie $Q(t)$ pour toutes les données de calage. Cette détermination passe par le calcul du coefficient de corrélation entre le débit (sortie du système) et les valeurs antérieures du même débit d'une part (entrées du système), et entre le même débit de la sortie et les valeurs antérieures de la pluie moyenne (entrées du système) d'autre part. Les variables les plus explicatives sont les variables qui correspondent à des coefficients de corrélation positifs. L'estimation du coefficient de corrélation $C_{XY}(t_0)$ se fait à travers la formule suivante :

$$C_{XY}(t_0) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_{i-t_0} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_{i-t_0} - \bar{Y})^2}} \quad (\text{Eq. C - 10})$$

Où : t_0 est le décalage temporaire (0 h comme début) ; N est le nombre d'observation ; X est la variable de sortie (débit) et Y est la variable d'entrée (pluie ou débit antérieur).

Avant de procéder au calcul de la corrélation entre les variables susceptibles d'être en entrée et la variable de sortie, une normalisation des données est nécessaire pour donner aux différentes variables un même poids. La normalisation des données se fait avec l'équation (Eq. C-4).

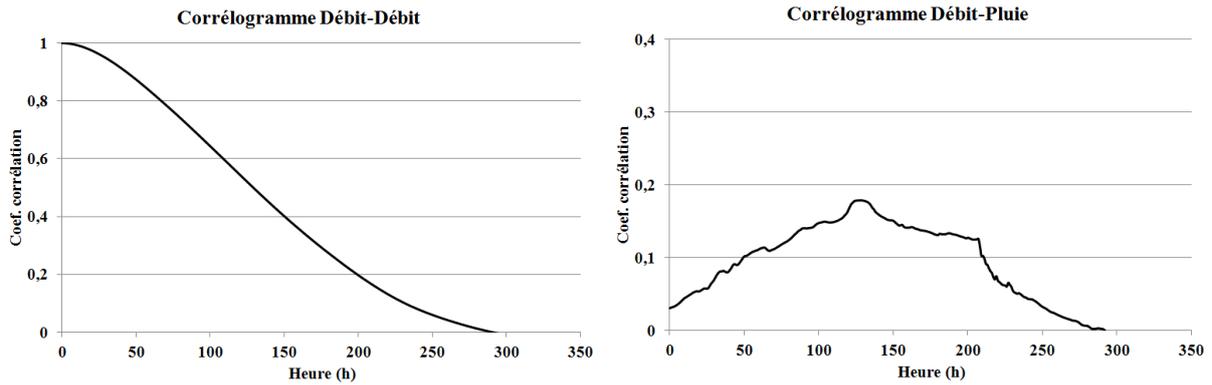


Figure C- 6 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie) : base de données de calage.

La figure C-6 présente les résultats des matrices de corrélation débit-débit et débit-pluie à la station Louviers. Les corrélogrammes montrent que les variables de débits antérieures ont une influence importante sur $Q(t)$ jusqu'à 289 h d'antériorité par contre les variables de pluies ont une influence plus faible sur $Q(t)$ jusqu'à 291 h d'antériorité avec une corrélation qui ne dépasse pas 0,2. Les variables explicatives sont les variables entre $Q(t)$ et $Q(t-289)$ et entre $P(t)$ et $P(t-291)$

La détermination du vecteur optimal de l'architecture RNA est primordiale pour une modélisation RNA. Cette détermination est effectuée à travers une étape expérimentale (essais-erreurs) au cours de laquelle nous testons et évaluons différentes architectures. L'évaluation dans cette partie est une évaluation numérique. Les différentes combinaisons sont des entrées en pluies, en débits et en pluies-débits. Le RNA est un PMC avec une seule couche cachée et une fonction d'activation de type sigmoïde (Eq. C-1). Le nombre de neurones cachés est fixé automatiquement par l'outil informatique⁴⁹, il enregistre le nombre optimal des neurones cachés pour chaque itération.

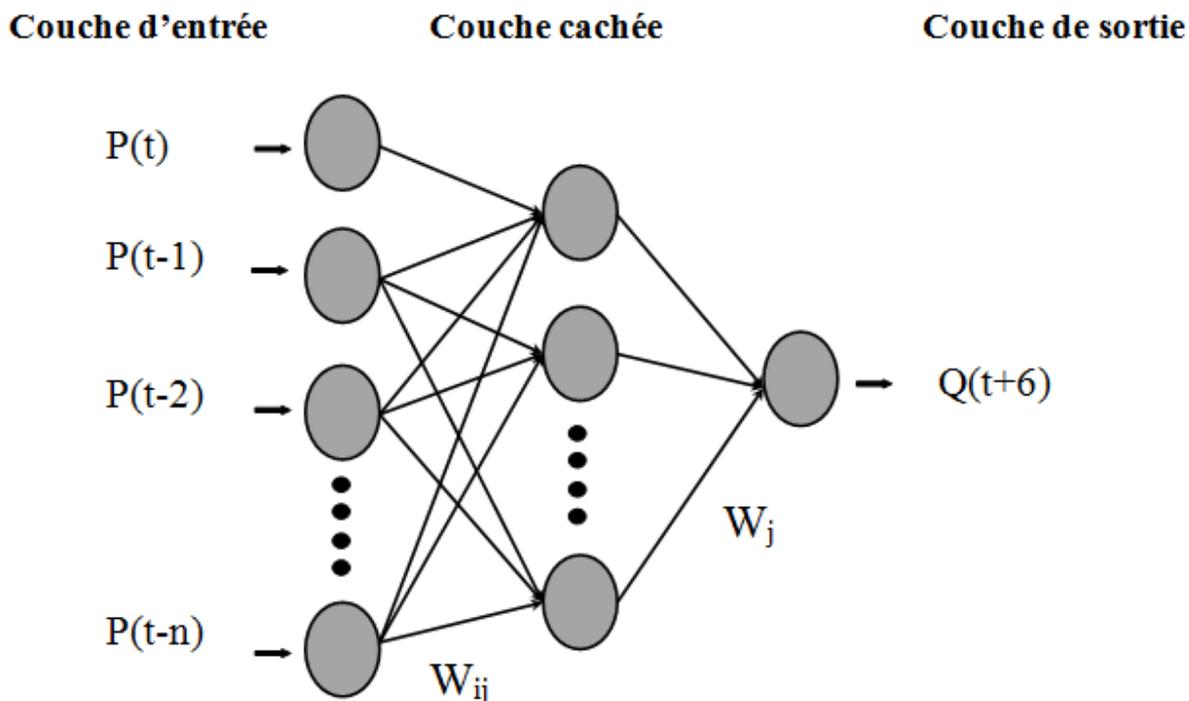
1-1-1- Variable en pluies

La réalisation de différentes modélisations RNA avec l'équation (Eq. C-11), nous amènera à connaître la valeur informative des données de type pluviométrique vis-à-vis de la prévision des crues à 6h. Dans cette étape de calcul, nous avons choisi de lancer les simulations avec un pas de 48 neurones entre les vecteurs afin de réduire le nombre énorme de calculs. La sortie est le débit observé à $t+6h$, la première échéance de prévision. Les entrées sont les différentes combinaisons entre les variables de pluie.

$$Q(t + 6) = f(P(t), \dots, P(t - n)) \quad (\text{Eq. C - 11})$$

Où n varie entre 47 et 291 ; Q est le débit ; P est la pluie.

⁴⁹ Logiciel « Statistica 8 »



Avec P est la pluie antérieure

W_{ij} est le poids de connexion entre l' $i^{\text{ème}}$ et le $j^{\text{ème}}$ neurone

Q est le débit à prévoir

Figure C- 7 Architecture générale du RNA (vecteur d'entrée en pluie)

La simulation comporte les trois phases : l'apprentissage, le test et la validation. Pour une évaluation et comparaison des résultats de modélisation RNA, nous avons analysé les résultats issus de la phase de validation (10 % aléatoire de la base de données de calage).

	292	288	240	192	144	96	48
NASH	0,582	0,705	0,713	0,647	0,385	0,734	0,306
RMSE	13,809	13,595	13,536	15,418	16,878	18,424	20,084
MARE	28,518	28,140	27,021	29,730	31,761	34,507	38,461
CP	-1,412	-1,336	-1,318	-2,015	-2,608	-3,301	-4,113

Tableau C- 4 Évaluation des modèles RNA : vecteurs d'entrées en pluies

Le tableau C-4 présente les critères de performances des calculs faits en fonction des différents vecteurs d'entrées de pluies antérieures. Les critères de performances obtenues indiquent que la modélisation RNA avec des variables d'entrée de pluies est insatisfaisante. Ils sont inadmissibles avec des valeurs RMSE/MARE élevées et des valeurs de NASH/ C_p faibles.

L'utilisation de la pluie seule en entrée a une influence réduite sur la modélisation RNA des débits futurs à la station Louviers. Cette influence s'améliore progressivement en augmentant le nombre de variables de pluie dans le vecteur d'entrée, mais elle reste décevante avec des RMSE importantes (figure C-8). Les meilleurs critères enregistrés correspondent à un vecteur d'entrée de 240 variables de pluies et au-delà de ce nombre, la performance décline et le modèle RNA commence à perdre de sa qualité.

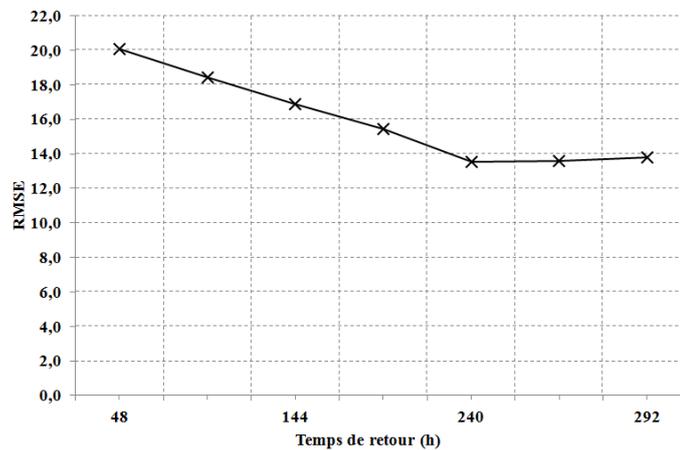


Figure C- 8 Évolution du modèle RNA avec RMSE selon le nombre de neurones d'entrée « pluie »

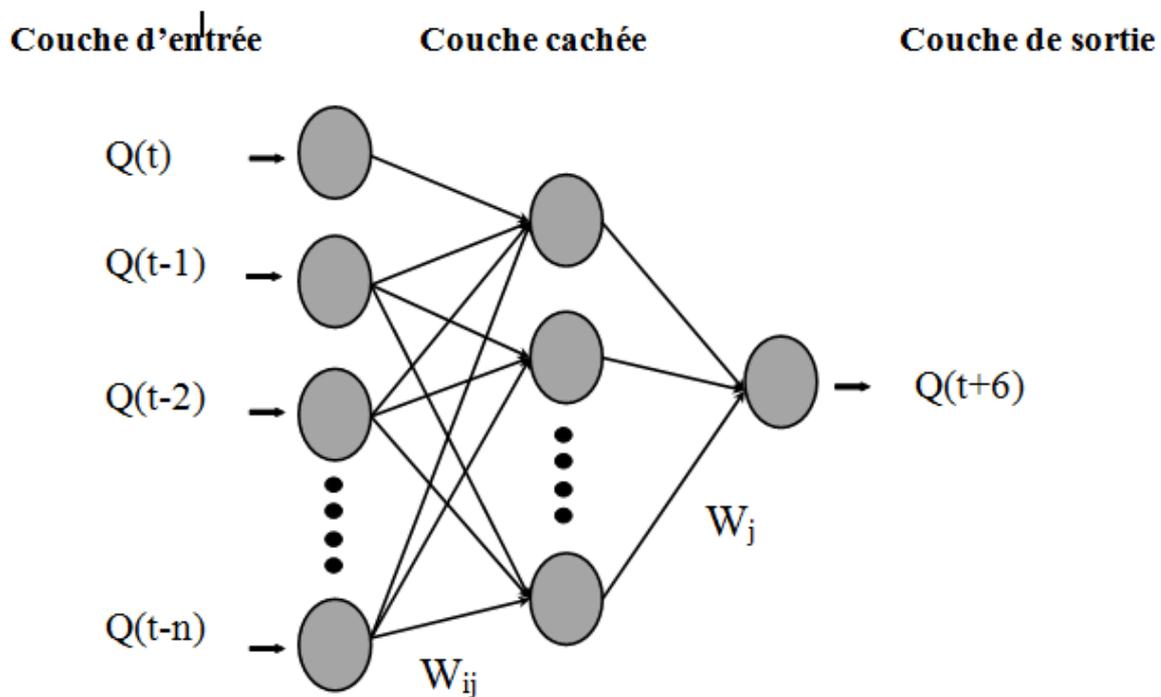
1-1-2- Entrées en débits

Concernant les variables d'entrée en débits, la détermination de l'apport informatif des différentes combinaisons en débits a été effectuée à travers l'application du RNA suivant l'équation (Eq. C-12). Les calculs comportent les trois phases de calibrage d'un modèle (apprentissage, test et validation). Comme pour les vecteurs d'entrées en pluies, l'évaluation de la modélisation RNA se fait à travers les résultats issus de la phase de validation.

$$Q(t + 6) = f(Q(t), \dots, Q(t - m)) \quad (\text{Eq. C - 12})$$

Où m varie entre 47 et 289 avec un pas de temps de 48h ; Q est le débit.

La figure C-9 montre les différentes architectures RNA issues des diverses combinaisons en entrées de débits antérieurs.



Avec Q est le débit antérieur

W_{ij} est le poids de connexion entre l'ième et le j^{ème} neurone

Q est le débit à prévoir

Figure C- 9 Différentes architectures RNA (entrées en débits)

Nous avons un total de sept combinaisons pour les entrées en débit antérieur d'où sept modèles différents du RNA. Les résultats trouvés ont de bons critères de performance (tableau C-5). Ces derniers indiquent que les différentes combinaisons ont une bonne qualité vis-à-vis la prévision à 6h. Ils assurent que les données débits antérieures de la station Louviers contiennent une quantité importante des valeurs informatives pour les débits à T+6h avec des critères RMSE et MARE faibles par rapport à ceux des vecteurs en pluies seules.

	290	288	240	192	144	96	48
NASH	0,9998	0,9998	0,9998	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998
RMSE	0,7767	0,7179	0,7684	0,7819	0,7856	0,7718	0,7765
MARE	1,2696	1,2186	1,2454	1,2458	1,2880	1,2518	1,2128
CP	0,9923	0,9935	0,9925	0,9922	0,9922	0,9924	0,9923

Tableau C- 5 Performance de la modélisation RNA : vecteurs d'entrée en débits (phase de la validation avec 10% aléatoire des données de calage)

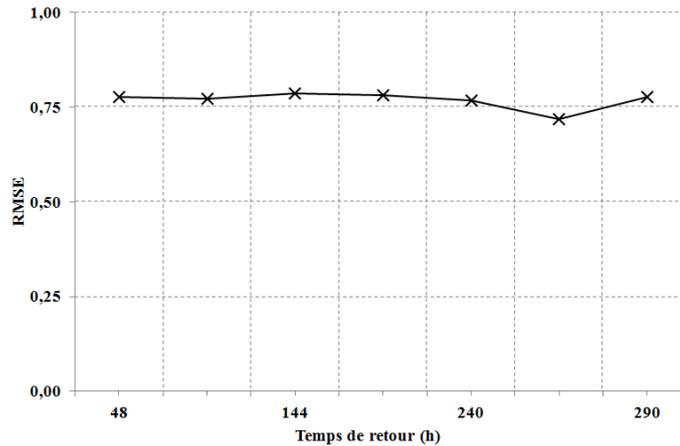


Figure C- 10 Évolution de la performance du modèle RNA en fonction de nombre de neurones du débit en entrée

Les critères numériques varient en fonction du nombre de neurones dans la couche d'entrée du modèle RNA (tableau C-8). Ils ont une évolution irrégulière indiquant que l'ajout ou la réduction des neurones d'entrée en débit ne garantit pas une augmentation ou une diminution de la performance d'un RNA (exemple de la RMSE figure C-10). Pour les vecteurs d'entrée en débits, la meilleure performance est enregistrée par le vecteur qui comporte 288 variables de débits antérieurs.

Les deux étapes précédentes de la modélisation RNA indiquent que les 240 variables antérieures de la pluviométrie et les 288 premières variables antérieures de débits sont les plus informatives pour notre système du RNA. Nous pouvons alors adapter temporairement un vecteur d'entrée optimal qui se compose de 240 variables pluies et 288 variables débits (Eq. C-13).

$$Q(t + 6) = f(P(t), \dots, P(t - 239), Q(t), \dots, Q(t - 287)) \quad (\text{Eq. C} - 13)$$

Par contre les critères de performances des différents modèles RNA débit-débit sont proches (tableau C-5). L'ajout d'un nombre de variables de pluie à ces vecteurs en débits peut parasiter les calculs du RNA ainsi influencer en positif ou en négatif la qualité de modélisation RNA. Nous nous orientons alors vers une étape plus avancée pour nous assurer du choix d'un RNA optimal.

1-1-3- Vecteurs d'entrée en pluie-débit

Dans cette partie, nous avons effectué des combinaisons entre les variables antérieures pluies et débits afin de créer les différents scénarios possibles de vecteurs d'entrées (figure C-11). « n » et « m » varient successivement entre 47- 291 et 47-289 avec un pas de 48 unités.

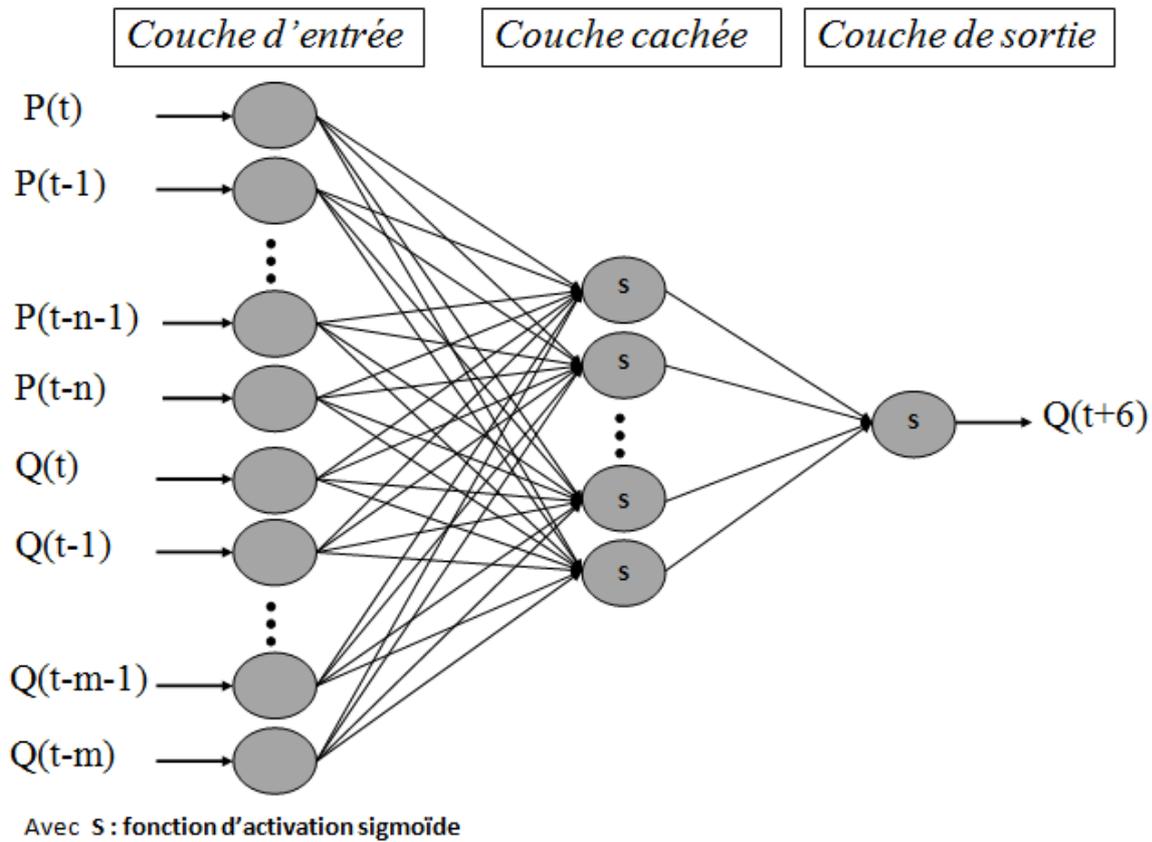


Figure C- 11 Différentes architectures RNA : vecteurs d'entrées en débit-pluie

L'évaluation de la modélisation RNA a été effectuée à partir des résultats de la validation. Le tableau C-6 montre les différents résultats évalués selon les critères de performance numérique (RMSE, MARE, NASH et C_p). Pour une prévision à 6 h, nous remarquons que le critère NASH n'affiche pas une différence considérable. Ceci nous amène à comparer les modèles à travers les critères RMSE, MARE et C_p . Ces critères indiquent des résultats satisfaisants et admissibles pour toutes les combinaisons. Le modèle RNA le plus performant est le modèle avec 240 entrées en débits antérieurs et 48 entrées en pluies antérieures. En effet, l'ajout de l'information pluviométrique à celle débitométrique dans un même modèle de prévision des crues change leurs influences vis-à-vis de ce modèle ainsi que les résultats produits. Les différentes combinaisons ont produit un modèle RNA amélioré par rapport aux modèles débit-débit précédant (tableau C-5).

Entrée en Débit	Nash							
	Entrée en Pluie							
		292	288	240	192	144	96	48
	290	0,99770	0,99873	0,99976	0,99925	0,99874	0,99924	0,99974
	288	0,99652	0,99789	0,99925	0,99925	0,99924	0,99951	0,99977
	240	0,99534	0,99704	0,99874	0,99924	0,99975	0,99977	<u>0,99980</u>
	192	0,99754	0,99812	0,99870	0,99923	0,99975	0,99977	0,99978
	144	0,99974	0,99919	0,99865	0,99921	0,99976	0,99976	0,99976
	96	0,99781	0,99972	0,99973	0,99948	0,99976	0,99902	0,99882
	48	0,99912	0,99943	0,99974	0,99951	0,99928	0,99915	0,99902
	RMSE							
	Entrée en Pluie							
		292	288	240	192	144	96	48
	290	2,3147	1,0278	0,7688	1,0059	1,7459	1,2636	0,7814
	288	2,7279	1,3222	1,2389	1,0001	1,2614	0,7993	0,7369
	240	3,1410	1,6167	1,7090	1,2430	0,7770	0,7347	<u>0,6924</u>
	192	1,9541	1,2204	1,7073	1,6573	0,7630	0,7408	0,7185
	144	0,7671	0,8242	1,7056	1,2273	0,7491	0,7469	0,7447
	96	2,1341	0,8096	0,7979	1,1100	0,7402	1,5631	1,6387
	48	1,4200	0,8774	0,7734	1,0388	1,3042	1,4336	1,5631
	MARE							
	Entrée en Pluie							
		292	288	240	192	144	96	48
	290	4,024	1,802	1,381	1,637	2,713	2,078	1,443
	288	4,855	2,338	2,160	1,670	2,015	1,341	1,338
	240	5,686	2,875	2,938	2,128	1,317	1,275	<u>1,232</u>
	192	3,534	2,148	2,910	2,837	1,313	1,285	1,258
	144	1,382	1,421	2,882	2,095	1,308	1,296	1,284
	96	3,310	1,464	1,365	1,992	1,274	2,567	2,553
	48	2,296	1,469	1,378	1,758	2,138	2,352	2,567
	CP							
	Entrée en Pluie							
	292	288	240	192	144	96	48	
290	0,9320	0,9622	0,9925	0,9769	0,9613	0,9768	0,9922	
288	0,9033	0,9405	0,9777	0,9773	0,9768	0,9850	0,9931	
240	0,8747	0,9188	0,9629	0,9776	0,9923	0,9931	<u>0,9939</u>	
192	0,9336	0,9483	0,9630	0,9776	0,9926	0,9930	0,9934	
144	0,9925	0,9778	0,9631	0,9780	0,9929	0,9929	0,9930	
96	0,9422	0,9917	0,9919	0,9844	0,9930	0,9690	0,9659	
48	0,9744	0,9834	0,9924	0,9854	0,9784	0,9737	0,9690	

Tableau C- 6 Évaluation des résultats des différentes combinaisons d'entrées débit-pluie (phase de la validation avec 10% aléatoire des données de calage)

La corrélation croisée nous a permis de limiter les variables antérieures susceptibles d'avoir une influence sur le débit $Q(t)$ ainsi que sur les débits futurs. Autrement dit, ces variables du passé sont les seules qui peuvent expliquer l'hydrologie future. Nous adapterons alors la même architecture RNA pour la prévision des crues avec les horizons de prévision étudiés (+6, +12, +18, +24 et +48 h). La relation mathématique de la modélisation RNA est la suivante :

$$Q(t + t_0) = f(P(t), \dots, P(t - 47), Q(t), \dots, Q(t - 239)) \quad (C - 14)$$

Avec $Q(t+t_0)$: débit à prévoir pour l'horizon t_0

Malgré cette performance, l'utilisation de la corrélation croisée sur toutes les données de calage présente différents inconvénients. En effet, cette corrélation a produit un grand nombre des neurones d'entrée. Cet énorme vecteur d'entrée engendre une augmentation de l'erreur produite donc une dégradation dans la production RNA. Autrement dit, l'introduction d'un nombre important des neurones d'entrée signifie une augmentation du nombre des interconnexions neuronales, ce qui entraîne une multiplication des erreurs qui se propagent dans le système. Cette application de la corrélation croisée a engendré aussi une phase de calage extrêmement lourde et a rendu plus lente l'application de la méthodologie RNA proposée sur la station Louviers contrairement aux exigences du SPC SACN⁵⁰. De ce fait, nous avons cherché à appliquer différemment la corrélation croisée afin de réduire ces inconvénients.

1-2- Deuxième sélection des variables informatives du système

Dans cette partie, nous avons appliqué la corrélation croisée sur les données du début de la crue la plus forte (crue de mars 2001) afin de sélectionner les variables hydrologiques explicatives de l'Eure et de produire un modèle RNA performant. En effet, l'utilisation de toute la base de calage ne permet pas de déterminer les variables explicatives exactes du système hydrologique. L'identification des variables de pluie et débit qui provoquent la montée des crues est relativement impossible vu la présence quasi continue de la pluviométrie tout au long de l'année. De ce fait, nous allons appliquer la corrélation croisée aux données qui décrivent le début de la montée des crues où nous avons une progression des débits après une période de stabilité hydrologique (figure C-12). Comme précédemment, cette application passe par le calcul du coefficient de corrélation entre le débit (sortie du système) et les valeurs antérieures du même débit d'une part (entrée du système), et entre le même débit de sortie et

⁵⁰ Le SPC SACN exige une réduction maximale du temps de la modélisation RNA (calage et application du modèle RNA)

les valeurs antérieures de la pluie moyenne (entrées du système) d'autre part. L'estimation du coefficient de corrélation $C_{XY}(t_0)$ se fait à travers l'Eq. C-10. Les variables explicatives du système hydrologique sont celles qui correspondent à des coefficients de corrélation positifs.

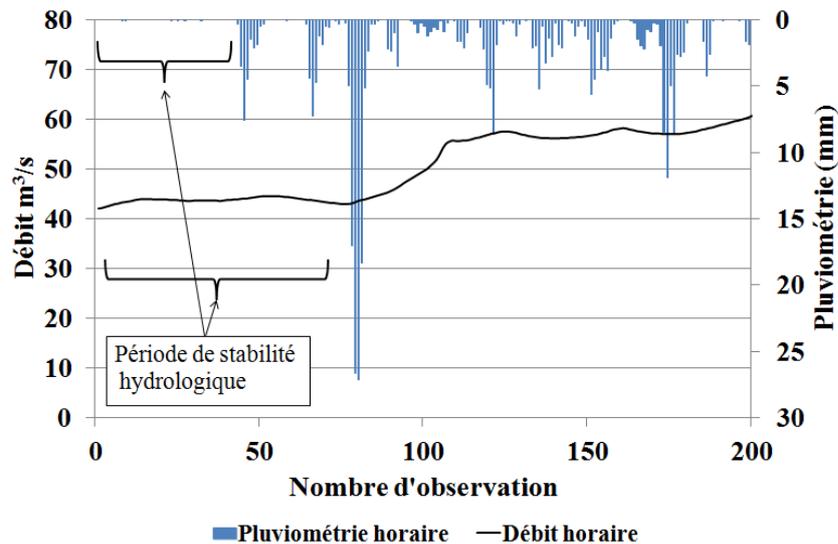


Figure C- 12 Stabilité hydrologique avant la montée d'une crue (crue de mars 2001)

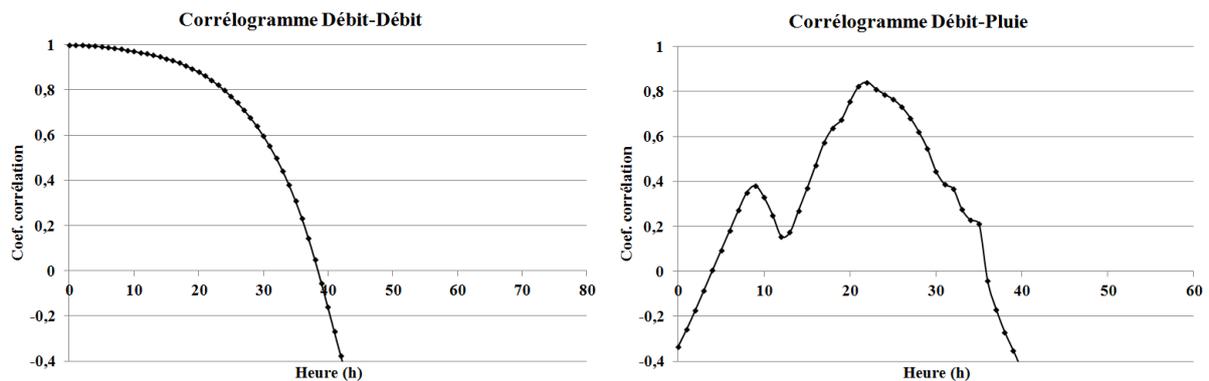


Figure C- 13 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie)

La figure C-13 présente les résultats des matrices de corrélation débit-débit et débit-pluie à la station Louviers. Les variables de pluie moyenne explicatives sont les 37 antécédents horaires (de $P(t)$ jusqu'à $P(t-36)$). Les 39 antécédents horaires du débit (de $Q(t)$ jusqu'à $Q(t-38)$) sont les variables de débit les plus informatives pour $Q(t)$ au niveau de la station Louviers. Ces variables peuvent expliquer les débits futurs (+6h, +12h, +18h, +24h et +48h), conséquences directes du fonctionnement hydrologique de la totalité du bassin versant de l'Eure.

L'identification du vecteur optimal de l'architecture RNA est indispensable pour une modélisation performante. Cette identification est effectuée à travers une étape expérimentale

(essais-erreurs) au cours de laquelle nous testons et évaluons les différentes architectures. L'évaluation dans cette partie est une évaluation numérique. Les différentes combinaisons sont des entrées en pluies, en débits et en pluies-débits. Comme précédemment, le RNA est un PMC avec une seule couche cachée et la fonction d'activation est de type sigmoïde (Eq. C-1).

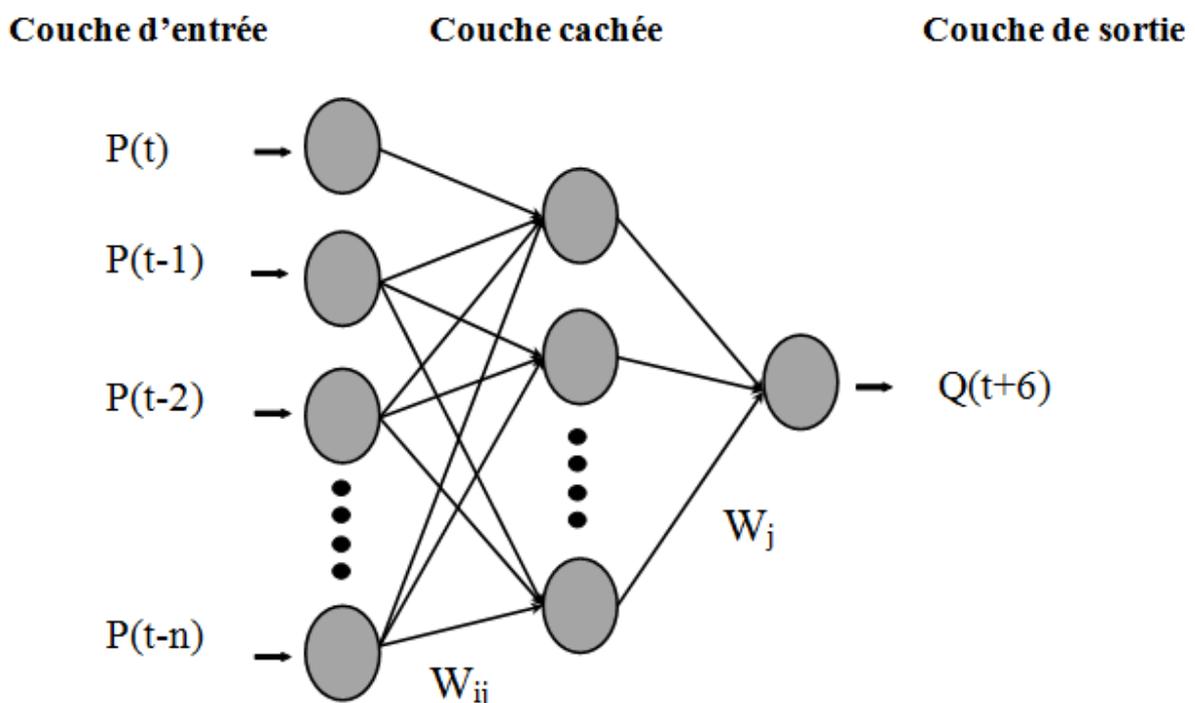
1-2-1- Variable en pluies

La réalisation des différents RNA avec l'équation (Eq. C-15), nous permettra de connaître la valeur informative des données de type pluviométrique vis-à-vis la prévision des crues. Afin de réduire le nombre des simulations, nous avons choisi de lancer les calculs avec un pas de 6 neurones chaque fois entre les vecteurs d'entrées. La sortie est le débit observé à $t+6h$. Les entrées sont les différentes combinaisons entre les variables de pluie.

$$Q(t + 6) = f(P(t), \dots, P(t - n)) \quad (\text{Eq. C - 15})$$

Où n varie entre 0 et 36 ; Q est le débit ; P est la pluie.

L'évaluation numérique de ces simulations est réalisée à travers les résultats de la phase de la validation (10% aléatoire des données de calage).



Avec P est la pluie antérieure

W_{ij} est le poids de connexion entre l' $i^{\text{ème}}$ et le $j^{\text{ème}}$ neurone

Q est le débit à prévoir

Figure C- 14 Architecture générale du RNA (vecteur d'entrée en pluie)

	37	31	25	19	13	7	1
NASH	0,114	0,100	0,075	0,060	0,043	0,029	0,017
RMSE	21,883	22,050	22,356	22,537	22,742	22,906	23,041
MARE	56,968	58,249	59,171	59,820	60,648	61,760	62,411
CP	-13,871	-14,092	-14,510	-14,767	-15,050	-15,291	-15,492

Tableau C- 7 Évaluation des modèles RNA : vecteurs d'entrées en pluies

Le tableau C-7 présente les critères de performance des calculs faits en fonction des différents vecteurs d'entrées en pluies antérieures. Les critères de performance obtenus indiquent que la modélisation RNA avec des variables d'entrées de pluies jusqu'à 37 de variables antérieures reste insatisfaisante avec une dégradation remarquable par rapport à celles de la première méthode de corrélation croisée. En effet, les RMSE sont augmentées jusqu'à atteindre des valeurs de 23,04 contre une RMSE de 13,81 issue de la première application de la corrélation croisée. Cette dégradation indique que l'apport informatif des variables pluies est plus important lorsque le temps d'antériorité est plus large. Cependant, cette modélisation reste insatisfaisante même avec 240 entrées en pluie (nombre de neurones d'entrée « pluie » du RNA le plus performant) pour une prévision fiable des crues.

L'utilisation de la pluie seule en entrée montre qu'elle a une influence réduite sur les débits futurs à la station Louviers. Cette influence s'améliore progressivement en augmentant le nombre de variables de pluie dans le vecteur d'entrée, mais elle reste décevante avec des RMSE importantes (figure C-15). Les meilleurs critères enregistrés correspondent à un vecteur d'entrée de 37 variables de pluie.

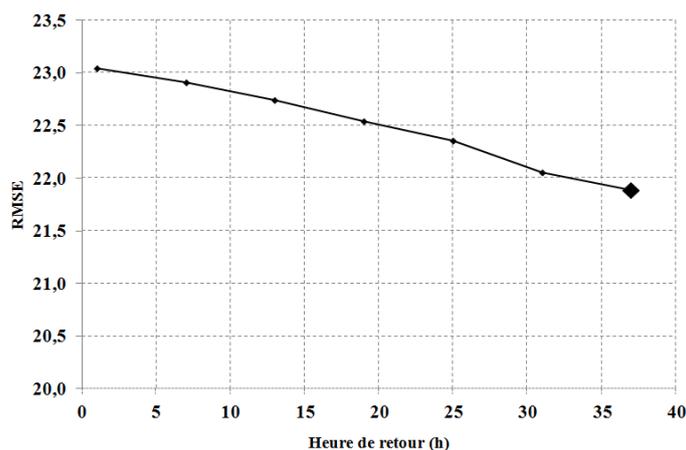


Figure C- 15 Évolution du RMSE en fonction de la dimension du vecteur d'entrée de pluie

1-2-2- Entrées en débits

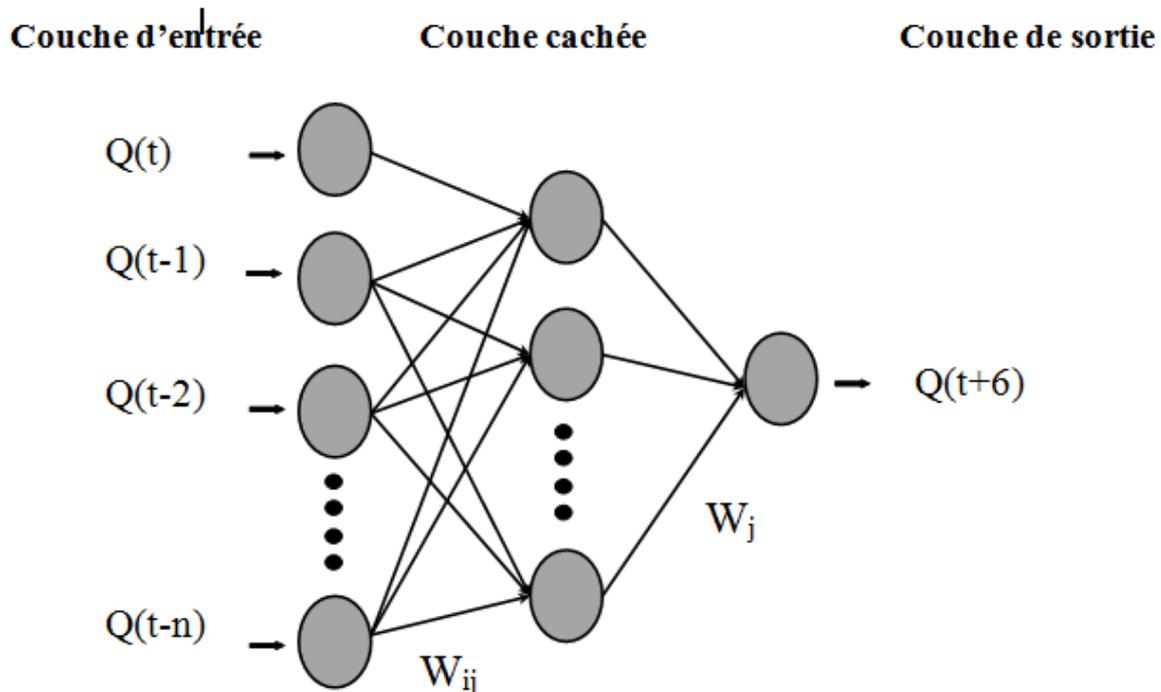
Concernant les variables d'entrée en débits, la détermination de l'apport informatif des différentes combinaisons en débits a été effectuée à travers l'application du RNA suivant

l'équation (Eq. C-16). Les calculs comportent les trois phases de calibrage d'un modèle (apprentissage, test et validation). Comme pour les vecteurs d'entrées en pluies, l'évaluation de la modélisation RNA se fait à travers les résultats issus de la phase de validation.

$$Q(t+6) = f(Q(t), \dots, Q(t-m)) \quad (\text{Eq. C-16})$$

Où m varie entre 2 et 38 avec un pas de temps de 6 h ; Q est le débit.

La figure C-16 montre les différentes architectures RNA issues des diverses combinaisons en entrées par les débits antérieurs.



Avec Q est le débit antérieur

W_{ij} est le poids de connexion entre l' $i^{\text{ième}}$ et le $j^{\text{ème}}$ neurone

Q est le débit à prévoir

Figure C- 16 Différentes architectures RNA (entrées en débits)

Les résultats trouvés ont de bons critères de performance (tableau C-8). Ces critères indiquent que les différentes combinaisons ont une bonne qualité vis-à-vis de la prévision à 6h. Ils assurent que les données des débits antérieurs de la station Louviers contiennent une quantité importante de valeurs informatives avec des RMSE minimales par rapport à celles des vecteurs en pluies seules. Cette performance évolue irrégulièrement en augmentant le nombre de neurones d'entrées (figure C-17). Par ailleurs, ces modèles RNA en débit-débit produisent moins d'erreurs par rapport à ceux issus de la première méthode de corrélation. Ils

produisent des RMSE minimales de l'ordre de 0,547 pour une combinaison de 27 entrées en débits contre 0,718 pour une combinaison 288 entrée en débits.

	39	33	27	21	15	9	3
NASH	0,999	0,999	<u>0,999</u>	0,999	0,999	0,999	0,999
RMSE	0,558	0,564	<u>0,547</u>	0,593	0,560	0,613	0,642
MARE	1,287	1,357	<u>1,218</u>	1,418	1,342	1,478	1,614
CP	0,990	0,990	<u>0,991</u>	0,989	0,990	0,988	0,987

Tableau C- 8 Performance de la modélisation RNA : vecteurs d'entrée en débits (phase de la validation avec 10% des données de calage)

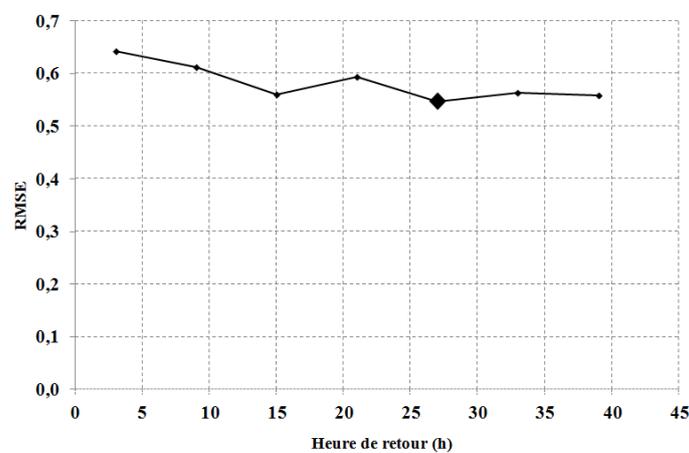


Figure C- 17 Évolution de la performance du modèle RNA en fonction de nombre de neurones du débit en entrée

Ces deux types de modélisation (entrées en débit et pluie séparément) indiquent que les 37 variables antérieures de la pluviométrie et les 27 variables antérieures du débit sont les plus informatives pour notre système du RNA. Par contre, comme nous avons vu précédemment, la combinaison d'un nombre de variables de pluie avec celle du débit peut améliorer ou dégrader les calculs du RNA surtout que les critères de performances enregistrés pour les différents modèles RNA débit-débit sont proches (tableau C-8). Nous nous orientons alors vers une étape plus avancée pour nous assurer du choix d'un RNA optimal.

1-2-3- Vecteurs d'entrée en pluie-débit

Dans cette partie, nous avons effectué des combinaisons entre les variables antérieures pluie et débit afin de créer les différents scénarios possibles de vecteurs d'entrées (figure C-18). « n » et « m » varient successivement entre 0 et 36, et 2 et 38. Cette variation se fait avec un espacement de 6 unités.

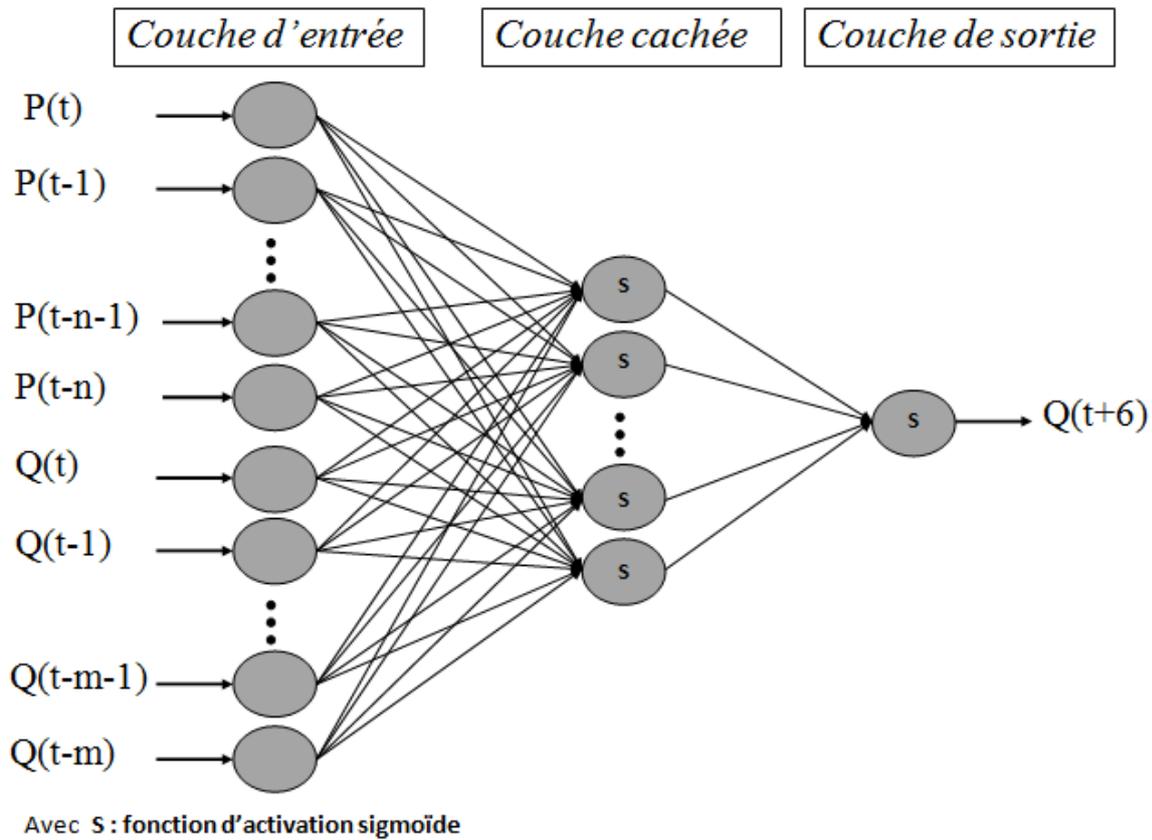


Figure C- 18 Différentes architectures RNA : vecteurs d'entrées en débit-pluie

L'évaluation de la modélisation RNA a été effectuée à partir des résultats de la validation. Le tableau C-9 montre les différents résultats évalués selon les critères de performance numérique (RMSE, MARE, NASH et C_p). Pour une prévision à 6h, nous remarquons que les critères NASH et C_p n'affichent pas une différence considérable pour classer les scénarios. Ceci nous amène à comparer seulement les critères d'erreurs RMSE et MARE. Selon ces derniers, nous constatons que le modèle RNA le plus performant est celui avec comme entrée un seul neurone de pluie moyenne et 39 neurones de débits. Ce modèle ignore toute information issue de la partie pluie dans le bassin versant de l'Eure. Par contre, les résultats affichés précédemment (tableau C-7) nous affirment qu'une seule variable de pluie dans le vecteur d'entrée ne produit pas suffisamment d'informations par rapport à d'autres vecteurs en pluies et que le vecteur à 37 entrées pluviométriques donne la quantité d'information la plus importante issue de la pluviométrie. Ces variables combinées avec d'autres variables de débits affichent un modèle RNA performant (deuxième performance sur la totalité des scénarios) pour un vecteur d'entrée de 39 variables de débit et 37 variables de pluies (tableau C-9).

La sélection des variables d'entrées du modèle RNA par la deuxième méthode de corrélation croisée (application sur les données du début de la montée des crues) a produit un modèle RNA plus performant que celui produit par la première méthode de corrélation croisée. En effet, la deuxième application de corrélation a permis une application plus rapide de la méthodologie RNA avec une moindre erreur (RMSE = 0,533) contre des erreurs plus importantes issues de la première application de la corrélation (RMSE = 0,692). Elle a permis aussi une création plus rapide du modèle RNA (temps d'apprentissage réduit) en réduisant le volume de données nécessaires (76 contre 336 neurones d'entrée) et en accélérant les calculs.

Entrée en Débit	Nash							
	Entrée en Pluie							
		37	31	25	19	13	7	1
	39	<u>0,99948</u>	0,99943	0,99941	0,99940	0,99937	0,99948	<u>0,99949</u>
	33	0,99937	0,99942	0,99938	0,99941	0,99939	0,99942	0,99945
	27	0,99902	0,99924	0,99912	0,99910	0,99928	0,99908	0,99908
	21	0,99926	0,99926	0,99932	0,99930	0,99928	0,99917	0,99922
	15	0,99924	0,99919	0,99911	0,99911	0,99919	0,99927	0,99917
	9	0,99917	0,99915	0,99910	0,99908	0,99921	0,99921	0,99925
	3	0,99905	0,99877	0,99899	0,99895	0,99875	0,99896	0,99892
	RMSE							
	Entrée en Pluie							
		37	31	25	19	13	7	1
	39	<u>0,533</u>	0,553	0,567	0,572	0,583	0,534	<u>0,526</u>
	33	0,582	0,560	0,579	0,567	0,576	0,559	0,547
	27	0,727	0,639	0,688	0,699	0,622	0,705	0,705
	21	0,633	0,632	0,608	0,613	0,622	0,671	0,647
	15	0,640	0,663	0,694	0,694	0,661	0,626	0,669
	9	0,670	0,678	0,699	0,705	0,652	0,653	0,636
	3	0,716	0,816	0,737	0,752	0,823	0,748	0,764
	MARE							
	Entrée en Pluie							
		37	31	25	19	13	7	1
	39	<u>1,239</u>	1,410	1,427	1,417	1,404	1,258	<u>1,177</u>
	33	1,463	1,338	1,456	1,397	1,354	1,304	1,249
	27	1,746	1,566	1,730	1,735	1,444	1,652	1,654
	21	1,510	1,501	1,430	1,441	1,444	1,553	1,486
	15	1,606	1,704	1,757	1,750	1,581	1,473	1,631
	9	1,771	1,758	1,790	1,813	1,634	1,559	1,514
	3	1,837	1,881	1,795	1,865	2,092	1,888	1,793
	CP							
	Entrée en Pluie							
		37	31	25	19	13	7	1
39	<u>0,9912</u>	0,9905	0,9900	0,9898	0,9894	0,9912	<u>0,9914</u>	
33	0,9895	0,9902	0,9896	0,9900	0,9897	0,9903	0,9907	
27	0,9836	0,9873	0,9853	0,9848	0,9880	0,9846	0,9845	
21	0,9876	0,9876	0,9885	0,9883	0,9880	0,9860	0,9870	
15	0,9873	0,9863	0,9850	0,9850	0,9864	0,9878	0,9861	
9	0,9861	0,9857	0,9848	0,9845	0,9868	0,9868	0,9874	
3	0,9841	0,9793	0,9831	0,9824	0,9790	0,9826	0,9818	

Tableau C- 9 Évaluation des résultats des différentes combinaisons d'entrées débit-pluie (phase de la validation avec 10% aléatoire des données de calage)

En conséquence, l'architecture RNA optimale déterminée pour la prévision de crues à $t+6h$ est celle qui contient 37 entrées de pluie ($P(t)$ jusqu'à $P(t-36)$) et 39 entrées du débit ($Q(t)$ jusqu'à $Q(t-38)$) dans la couche entrée, 21 neurones dans la couche cachée et un seul neurone dans la couche sortie, avec la fonction sigmoïde comme fonction d'activation pour les deux dernières couches (figure C-19). Nous adapterons alors la même architecture RNA pour la prévision des crues au niveau de la station hydrométrique Louviers avec les horizons de prévision étudiés (+6, +12, +18, +24 et +48 h). La relation mathématique de la modélisation RNA est la suivante :

$$Q(t + t_0) = f(P(t), \dots, P(t - 36), Q(t), \dots, Q(t - 38)) \quad (C - 17)$$

Avec $Q(t+t_0)$: débit à prévoir pour l'horizon t_0

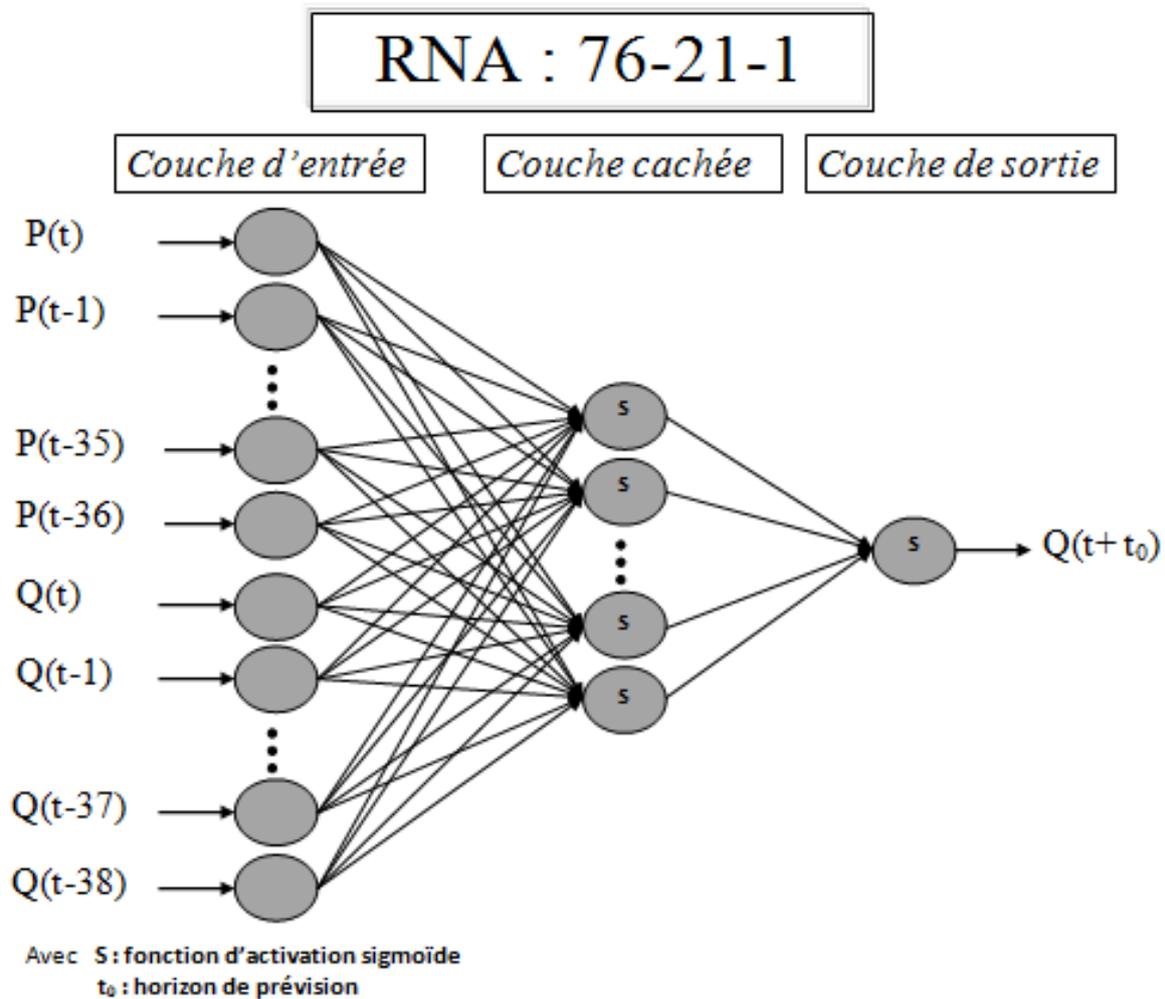


Figure C- 19 Architecture optimale du modèle RNA de prévision des crues (station Louviers)

2- Calage des modèles RNA de prévision des crues

La détermination de l'architecture optimale pour la station Louviers nous permet de caler un modèle RNA ayant pour but de prévoir les débits futurs au niveau de la station

Louviers (avec des horizons de prévision entre 6h et 48h) et d'évaluer la performance de l'application du RNA sur le bassin versant de l'Eure. Cette architecture (RNA : 76-21-1) est appliquée pour tous les modèles de prévision des crues (T+6h, T+12h, T+18h, T+24h et T+48h) avec la même base de données utilisée précédemment. La modélisation comporte trois phases : apprentissage, test et validation.

Le calage des modèles RNA de la prévision a été effectué de façon à ce que la différence entre les erreurs d'apprentissage et celles de test converge. Il produit ainsi les poids des différentes liaisons entre les couches. La qualité du calage est évaluée selon les critères de performances (RMSE, MARE, NASH et C_p) (tableau C-10). Ils sont calculés à partir des débits futurs issus des trois phases du calage des modèles RNA pour les différents Horizons de Prévision (HP).

HP	Apprentissage				Test				Validation			
	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP
T+6h	0,527	1,269	0,999	0,927	0,583	1,307	0,999	0,969	0,546	1,297	0,999	0,991
T+12h	1,336	3,047	0,997	0,850	1,384	3,065	0,996	0,979	1,322	3,019	0,997	0,993
T+18h	1,689	3,724	0,994	0,878	1,763	3,852	0,994	0,981	1,659	3,590	0,995	0,993
T+24h	2,047	4,476	0,992	0,889	2,236	4,730	0,991	0,979	2,188	4,556	0,991	0,990
T+48h	3,924	8,160	0,970	0,866	4,338	8,567	0,964	0,959	4,271	8,344	0,966	0,973

Tableau C- 10 Critères de performances pour les différentes phases de modélisation RNA en fonction du temps de prévision

L'évaluation numérique de la modélisation à travers les critères de performance NASH, RMSE, MARE et C_p indique l'adéquation des modèles RNA avec les prévisions (T+6h, T+12h, T+18, T+24h et T+48h). Ces critères réalisent une comparaison entre les débits calculés par RNA et les débits observés réellement. Ils montrent que les modèles RNA de prévisions sont performants en produisant des débits proches de la réalité avec des erreurs minimales (RMSE (validation T+6h) = 0,55). La production d'erreurs augmente en fonction de l'horizon de prévision, mais reste admissible (RMSE (validation t+48h) = 4,27). Cette performance est traduite aussi par des valeurs de C_p proche de « 0 » pour toutes les phases de calage indiquant des prévisions non naïves entre T+6h et T+48h.

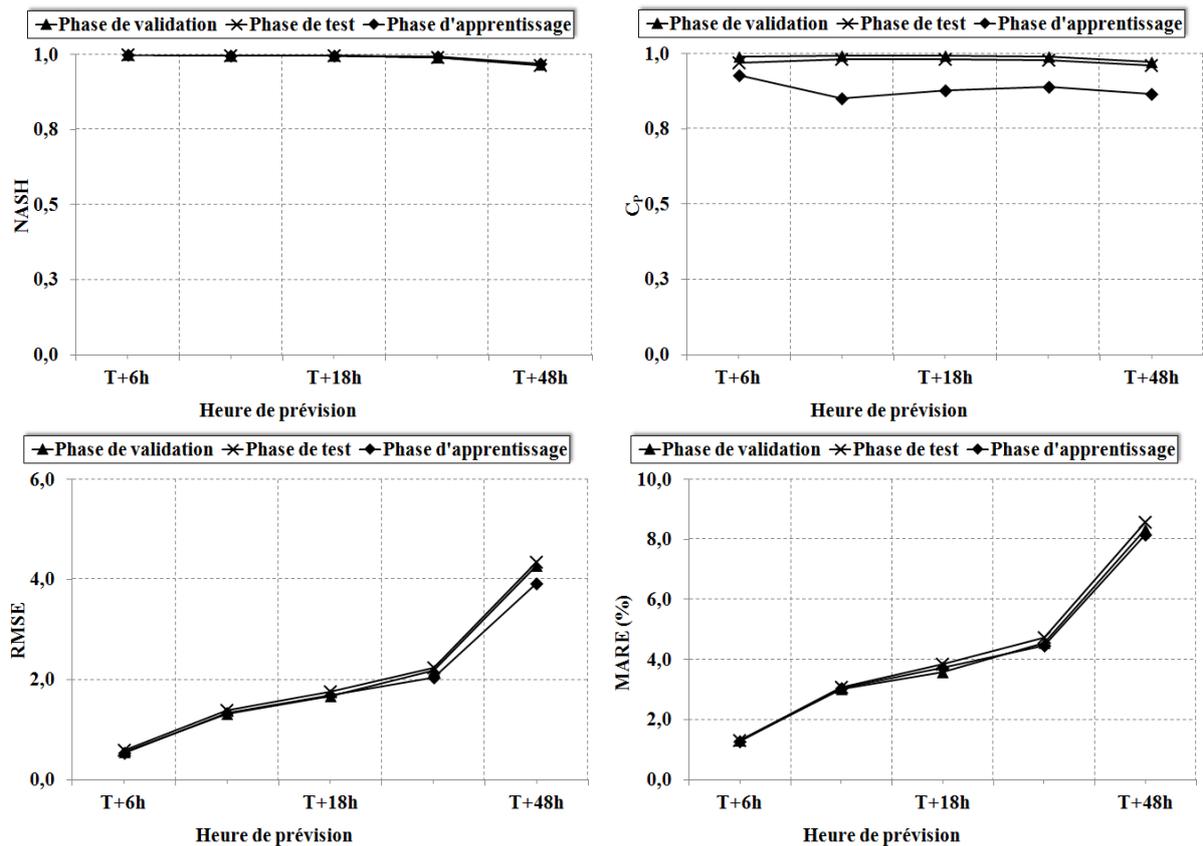


Figure C- 20 Comparaison de l'évolution des critères de performances en fonction du temps de prévision pour les trois phases de modélisation RNA

La comparaison des différents critères numériques, durant les trois phases de calage des modèles, est affichée dans la figure C-20. Les critères RMSE, MARE et NASH gardent le même rythme d'évolution. Cette évolution indique une quasi-stabilité des calculs généraux par RNA en passant d'une phase à une autre. Par contre, les critères de persistance C_P de la phase d'apprentissage sont inférieurs aux C_P des phases de test et de validation pour chaque horizon de prévision. Cette différence indique une amélioration des prévisions après l'apprentissage et l'estimation des différents poids inter-neuronaux. En effet, la convergence entre l'erreur du test et l'erreur de l'apprentissage rapproche les poids estimés de la réalité et montre une amélioration de la prévision durant la phase de test et par conséquent durant celle de la phase de validation. Cette amélioration présente une meilleure connaissance de la réaction hydrologique de l'Eure aux différents paramètres d'entrées après la finalisation du calage du modèle RNA.

Par ailleurs et en augmentant le temps de prévision, les critères RMSE/MARE augmentent et NASH/ C_P diminuent respectivement pour les phases d'apprentissage, de test et de validation (figure C-20). En conséquence, le modèle de prévision RNA perd de la précision en augmentant le temps de prévision. Cette perte de précision reste satisfaisante avec un

critère de persistance C_p de 0,97 durant la phase de validation de la prévision des crues à T+48h.

Les résultats de la prévision des débits au niveau de la station Louviers ont été évalués graphiquement. La figure C-21 présente une comparaison des débits observés et ceux calculés pour les horizons de prévision (+6h, +12h, +24h et +48h). La phase analysée ici est la phase de validation. La représentation des données calculées en fonction des données observées forme un nuage de point situé autour de la droite ($Y=X$). Les nuages des points sont répartis selon une orientation de 45° pour les pas de temps de prévision (+6h, +12h et +24h) avec une courbe de tendance linéaire qui coïncide avec la droite $Y=X$. Cette disposition linéaire du nuage des points indique la présence d'une bonne corrélation entre les données observées et celles calculées. Pour la prévision à T+48h, nous remarquons une déviation minimale de la ligne de tendance du nuage des points par rapport à la courbe $Y=X$. Cette déviation du côté des débits observés démontre une sous-estimation des valeurs observées. Cette sous-estimation reste minimale et acceptable avec un coefficient de corrélation de 0,96. Ces bonnes corrélations sont traduites par une quasi-coïncidence des hydrogrammes des crues observés et ceux calculés. Ces hydrogrammes indiquent des prévisions satisfaisantes en prévoyant avec un décalage temporel minime la totalité des allures et des pics.

Nous notons une dispersion du nuage de points autour de la courbe $Y=X$ lorsque nous augmentons l'horizon de prévision. Cette dispersion implique une diminution du coefficient de corrélation. L'ampleur de la dispersion du nuage de point est fonction de la valeur du débit prévu. La figure C-21 montre que l'ampleur de dispersion est plus importante au niveau des bas débits et diminue lorsque ces débits augmentent. Le modèle RNA de prévision des crues a une tendance à prévoir les montées des crues et les débits extrêmes avec une bonne corrélation en revanche la qualité diminue pour les débits de base.

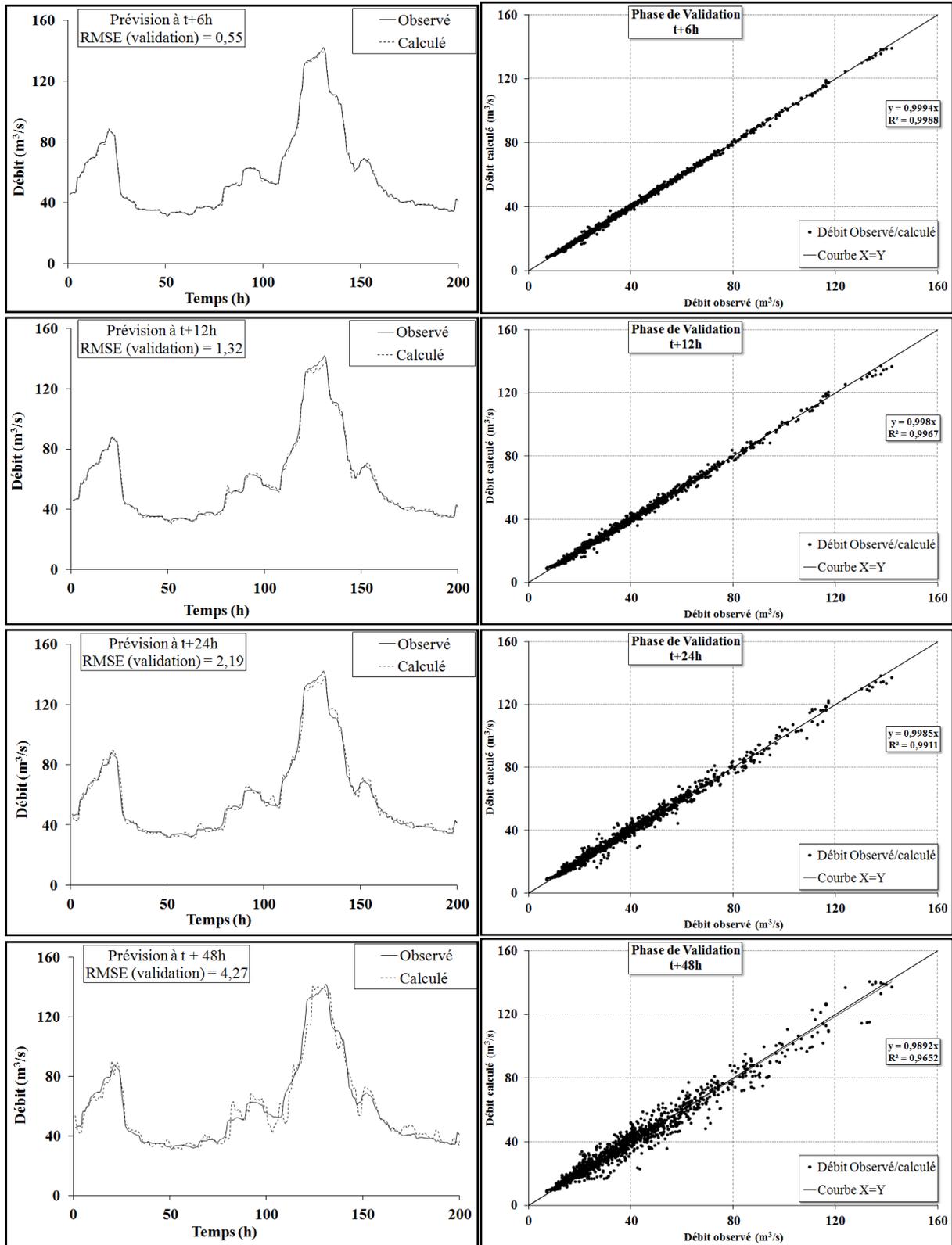


Figure C- 21 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (événements entre janvier-avril 2001 de la base de validation -10% aléatoire des données de calage)

3- Évaluation des résultats des modèles RNA vis-à-vis les niveaux d'alerte

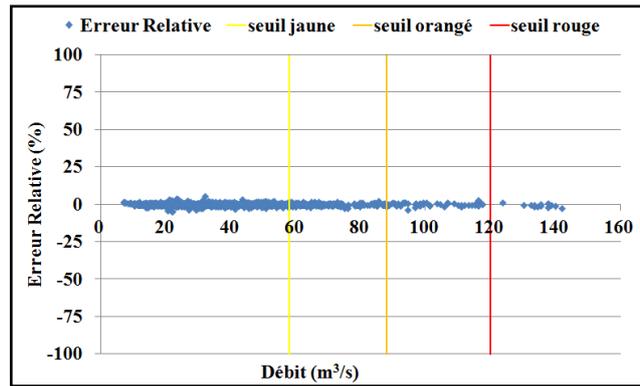
Nous allons maintenant nous intéresser à la prévision des débits extrêmes au niveau des stations hydrométriques du bassin versant de l'Eure. Le service de prévision des crues SPC76 réagit à la montée des crues en annonçant des alertes (Vert, Jaune, Orange et Rouge). Alors, il est primordial d'évaluer la qualité de la modélisation RNA par rapport à ces seuils d'alerte.

La figure C-22 présente l'erreur relative en fonction des débits observés pour les horizons de prévision (+6, +12, +24 et +48). L'erreur relative est calculée selon la formule suivante :

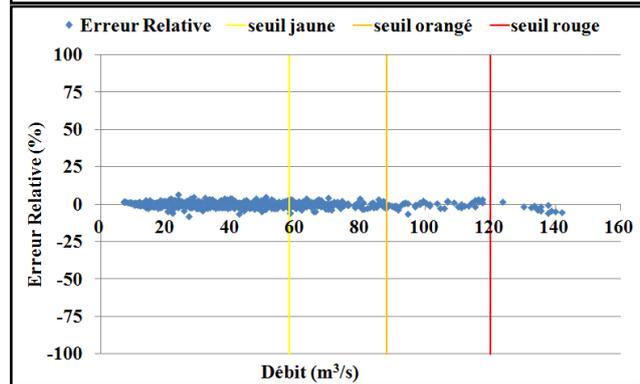
$$Erreur\ Relative(\%) = \left(\frac{Q_i(t + t_0) - Q'_i(t + t_0)}{Q_i(t + t_0)} \right) \times 100 \quad (C - 19)$$

Avec Q_i est la $i^{\text{ème}}$ valeur du débit observé ; Q'_i est la $i^{\text{ème}}$ valeur de débit prévue ; t est un instant quelconque et t_0 est l'horizon de prévision.

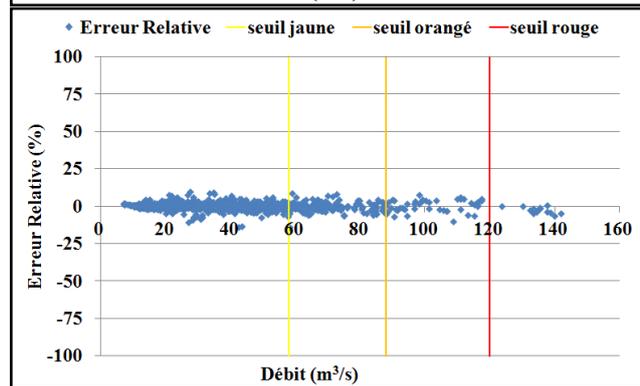
T+6h
MARE = 1,87 %



T+12h
MARE = 3,01 %



T+24h
MARE = 4,55 %



T+48h
MARE = 8,34 %

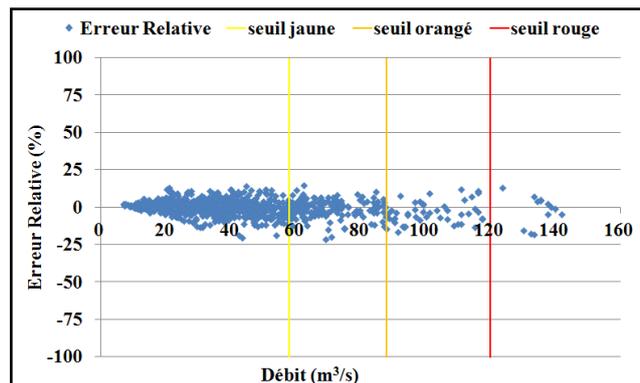


Figure C- 22 Évaluation graphique des prévisions par niveaux d'alerte (phase de validation : 10% aléatoire de la base de calage)

Nous remarquons que les erreurs relatives se concentrent autour de l'axe horizontal d'erreur relative 0 % indiquant des modélisations RNA à erreurs minimales. Cette concentration varie selon l'horizon de prévision et selon les débits observés.

Nous notons une dispersion du nuage des points en augmentant le temps de prévision. Cette dispersion n'a pas la même ampleur pour tous les niveaux d'alerte. Elle est plus marquée pour les débits de base qui présentent le niveau vert (avant le seuil jaune). Elle diminue en passant du seuil jaune au seuil orange jusqu'à atteindre le seuil rouge. Elle montre une prévision plus performante pour les niveaux d'alerte Orange et Rouge que pour le niveau Vert et le niveau Jaune. À titre d'exemple, la moyenne des erreurs relatives des débits d'alerte rouge est inférieure à celle des débits de niveau vert pour l'horizon de prévision 48h (tableau C-11).

	Niveau d'alerte	T+6	T+12	T+18	T+24	T+48
MARE (%)	Vert	2,05	3,24	3,82	4,80	8,84
	Jaune	0,88	1,81	2,38	3,20	6,41
	Orange	0,90	1,57	2,19	3,33	6,98
	Rouge	0,73	2,09	1,82	1,96	5,70

Tableau C- 11 Évaluation numérique des prévisions entre 3h et 48h selon les niveaux d'alertes (phase de validation : 10% aléatoire de la base de calage)

Généralement, la modélisation RNA a une fiabilité élevée pour les quatre niveaux d'alerte (Vert, Jaune, Orange et Rouge) et jusqu'à 48h de temps de prévision. Cette fiabilité est plus élevée pour les hauts débits.

4- Deuxième validation avec les crues de 1999-2000

Dans cette partie nous allons tester la qualité des modèles RNA de prévision des crues avec une autre base de données externe à la base de calage. Cette base de données contient les données qui décrivent la crue de décembre 1999 et de janvier 2000, avec un pic de 110 m³/s (tableau C-12). Elle englobe des débits de niveaux d'alerte Vert, Jaune et Orange.

Moyenne	40,0
Écart type	23,6
Minimum	17,8
Maximum	110,0
Coefficient de variation	0,6

Tableau C- 12 Paramètres statistique de la base de données (deuxième validation)

Nous avons appliqué l'architecture optimale du RNA (76-21-1) avec les poids de connexions inter-neuronaux calculés pour chaque horizon de prévision dans la phase de calage. Le tableau C-13 présente les résultats du modèle RNA sur la crue de 99-2000. Les critères de performances déterminés dévoilent une bonne qualité de prévision RNA entre

T+6h et T+48h. À titre d'exemple pour un horizon de prévision de 48h, le critère de persistance est de 0,783, montrant ainsi une prévision fiable et loin d'une naïve. La fiabilité de la modélisation RNA diminue en fonction du temps de prévision, mais reste acceptable pour les horizons de prévision calculés.

Horizon de prévision	Validation avec les crues 12-1999 et 01-2000			
	RMSE	MARE	NASH	C _P
T+6h	0,777	1,755	0,999	0,696
T+12h	1,228	2,669	0,997	0,768
T+18h	1,696	3,470	0,995	0,779
T+24h	2,312	4,483	0,990	0,759
T+48h	4,475	7,619	0,970	0,783

Tableau C- 13 Évaluation des résultats

La figure C-23 illustre les résultats de la prévision de T+6h, T+12h, T+24h et T+48h. Elle exprime une comparaison entre les débits observés et ceux calculés par les modèles RNA. Nous constatons que le nuage des points se propage tout au long de la droite (Y=X). Pour les horizons de prévision (+6h, +12h, +24h et +48h), le nuage des points est réparti selon une orientation de 45° avec des courbes de tendance linéaire qui coïncident avec la droite Y=X. Cette disposition linéaire des nuages des points indique une bonne corrélation entre les données observées et celles calculées par le modèle RNA.

Nous notons une augmentation de la dispersion du nuage des points autour de la droite X=Y en fonction de l'augmentation de l'horizon de prévision. Cette augmentation reste acceptable en termes de prévision des crues. La prévision des crues par RNA à horizon de 48h marque une déviation de la courbe de tendance du nuage des points par rapport à la courbe Y=X. Cette déviation du côté des débits calculés montre une surestimation des valeurs observées. Cette surestimation reste acceptable avec un coefficient de corrélation de 0,97 et avec un pouvoir remarquable de prévision des pics et des allures des hydrogrammes des crues.

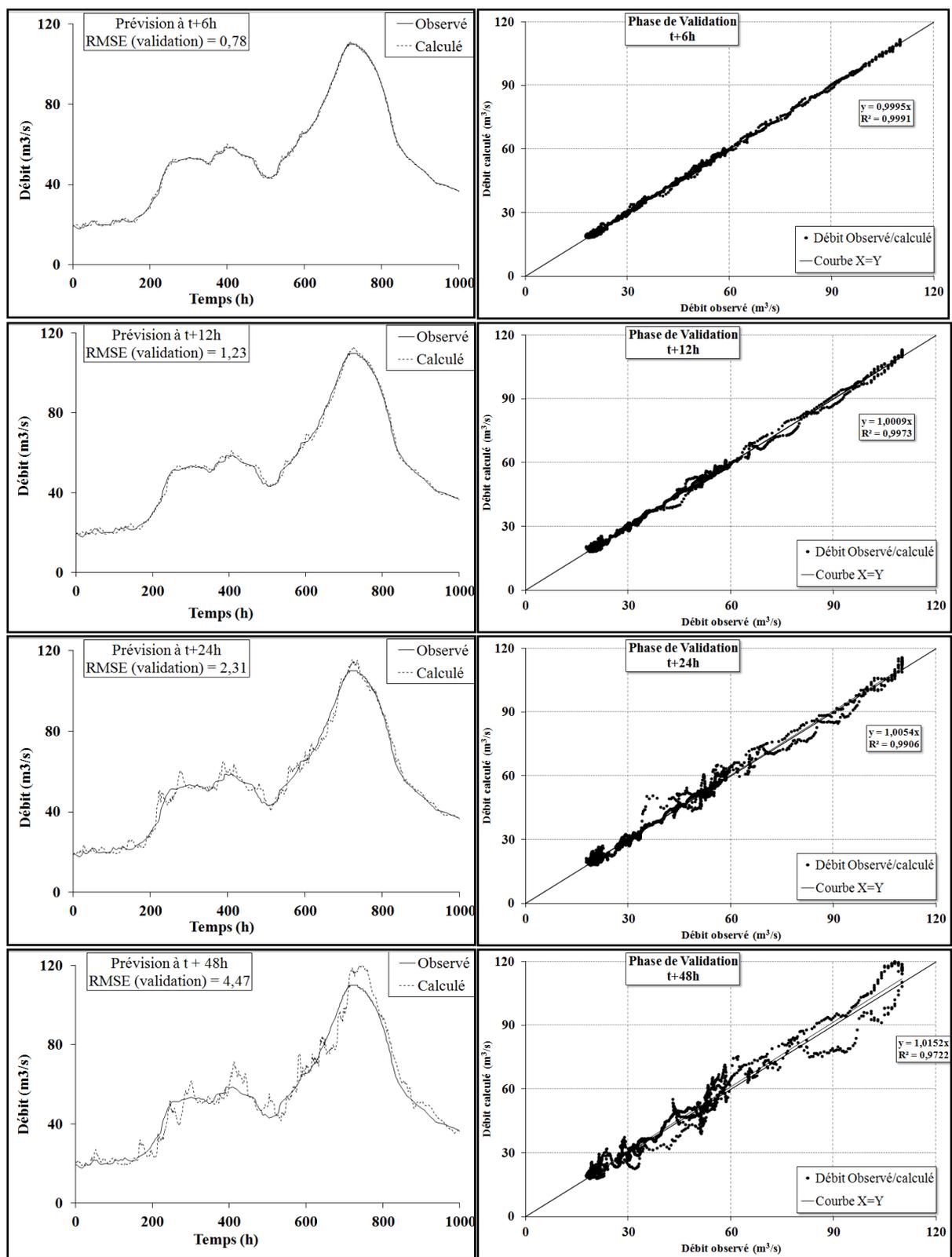


Figure C- 23 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (crues 12-1999 et 01-2000)

L'application directe des modèles de prévision des crues RNA sur une base de données extérieure à la base de calage montre une bonne stabilité des calculs en allant d'une

base à une autre. En effet, une comparaison entre les critères de performance calculés pour la première validation (avec 10 % de la base de données de calage) et la validation avec la crue de décembre-janvier 99-2000 (externe de la base de données de calage) indiquent que les modèles RNA produisent les mêmes quantités d'erreurs en passant d'une base à une autre et d'un horizon de prévision à un autre (figure C-24). Le critère de persistance marque une baisse minimale de l'ordre de 0,2 entre les deux validations des modèles, mais il indique des prévisions non naïves ainsi garde le pouvoir d'anticipation des crues entre T+6h et T+48h avec des valeurs supérieures à « 0 ».

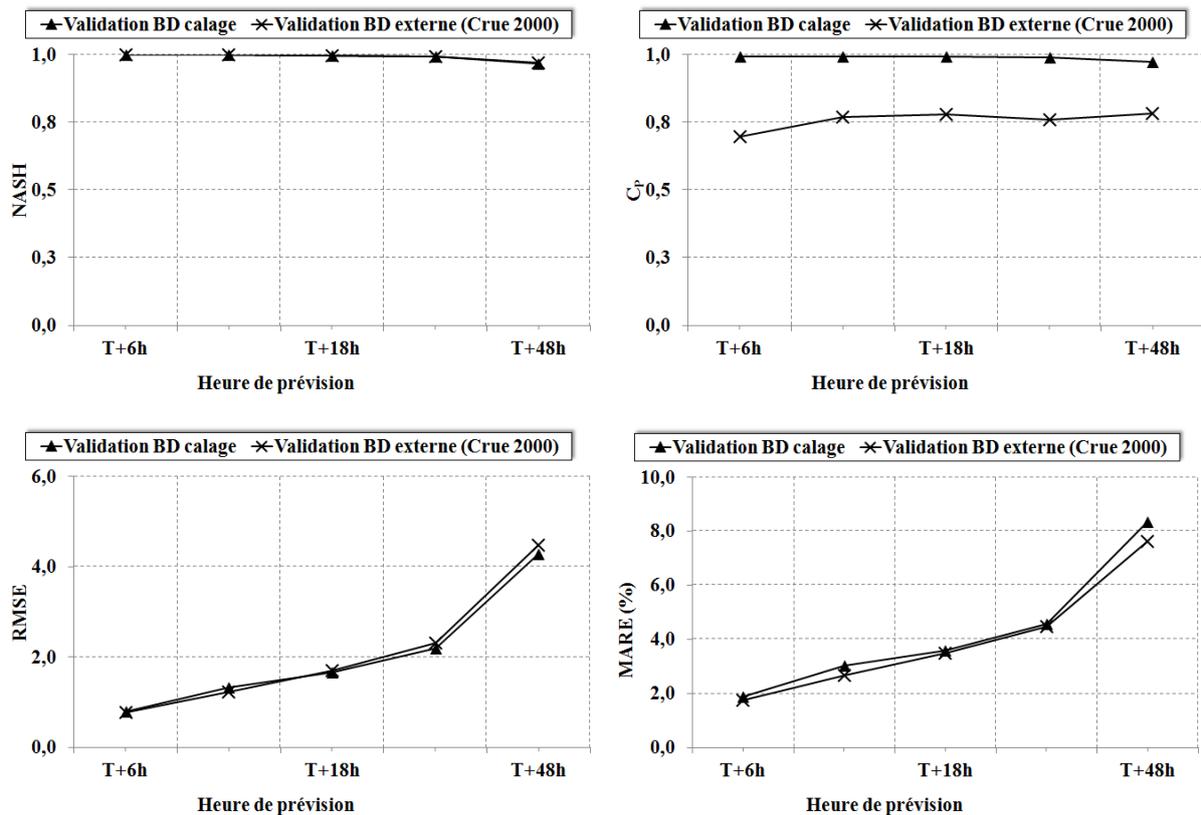


Figure C- 24 Comparaison entre les deux validations des modèles RNA de prévision (station Louviers)

L'évaluation de la modélisation RNA par niveau d'alerte pour la crue de 99-2000 passe par la détermination de la moyenne des erreurs relatives et absolues MARE afin de quantifier l'erreur produite dans chaque niveau (tableau C-14). De manière identique à ce que nous avons remarqué dans la phase de validation de calage, les résultats issus de l'application du modèle de prévision RNA sur une base externe montrent que la quantité d'erreurs est plus grande pour les débits de niveau d'alerte vert et jaune que pour le niveau orange. Le modèle RNA de prévision garde la tendance à mieux prévoir les débits extrêmes dans la station de Louviers. Par ailleurs, la prévision à T+48h produit, pour les trois niveaux d'alerte, quasiment

la même quantité d'erreurs qui reste inférieure à 10 %. Ce qui prouve une qualité de prévision relativement bonne.

	Niveau d'alerte	T+6	T+12	T+18	T+24	T+48
MARE (%)	Vert	1,78	2,82	3,69	4,74	7,28
	Jaune	1,12	2,29	2,87	3,93	6,72
	Orange	0,54	1,32	1,59	2,19	7,85

Tableau C- 14 Évaluation numérique des modélisations RNA selon les niveaux d'alerte : crues 12-1999 et 01-2000

5- Limites des modèles RNA

La base de données de calage du modèle RNA de prévision contient des débits avec des périodes de retour presque centennial (soit 142 m³/s). La validation et le test du modèle RNA pour la crue de décembre-janvier 99-2000 ont montré une fiabilité remarquable pour la modélisation des valeurs de débits appartenant à l'intervalle des débits de calage entre 16 m³/s et 142 m³/s. La question qui se pose maintenant est : est-ce que le modèle RNA a le pouvoir de prévoir les débits qui n'appartiennent pas à cet intervalle sachant que l'un des points forts des RNA est la connaissance du système à partir de son historique ?

Pour répondre à cette question, nous avons refait le calage du modèle RNA de prévision avec la même base de données, mais en retirant les données de crue 2001. Le nouveau calage se fait avec des débits entre 16 m³/s et 119 m³/s. Le calage se fait pour des modèles RNA de prévisions pour T+6h, T+12h, T+18h, T+24h et T+48h.

Horizon de prévision	Validation			
	RMSE	MARE	NASH	CP
T+6h	0,962	1,493	0,997	0,983
T+12h	1,193	2,154	0,996	0,989
T+18h	1,579	2,838	0,992	0,988
T+24h	1,887	3,435	0,989	0,986
T+48h	3,539	6,302	0,959	0,968

Tableau C- 15 Évaluation numérique de la modélisation RNA (phase de validation : 10% aléatoire des données du 2^e calage)

L'analyse des résultats de la phase de validation (tableau C-15) exprime des critères de performance acceptables, lors des différents horizons de prévision, indiquant ainsi des prévisions fiables jusqu'à T+48h.

La comparaison graphique entre les débits observés et les débits calculés forme un nuage de points qui se propage tout au long la droite linéaire Y=X (figure C-25). Les

tendances linéaires des nuages des points pour les prévisions entre T+6h et T+24h coïncident avec la droite $Y=X$. Pour la prévision T+48h, la droite linéaire de nuage des points marque une déviation au dessous de la droite d'orientation 45° . Elle dénote une légère sous-estimation des valeurs des débits. Malgré tout, en comparant les deux hydrogrammes calculés et observés, la prévision à T+48h garde un pouvoir d'anticipation des montées et des pics satisfaisant.

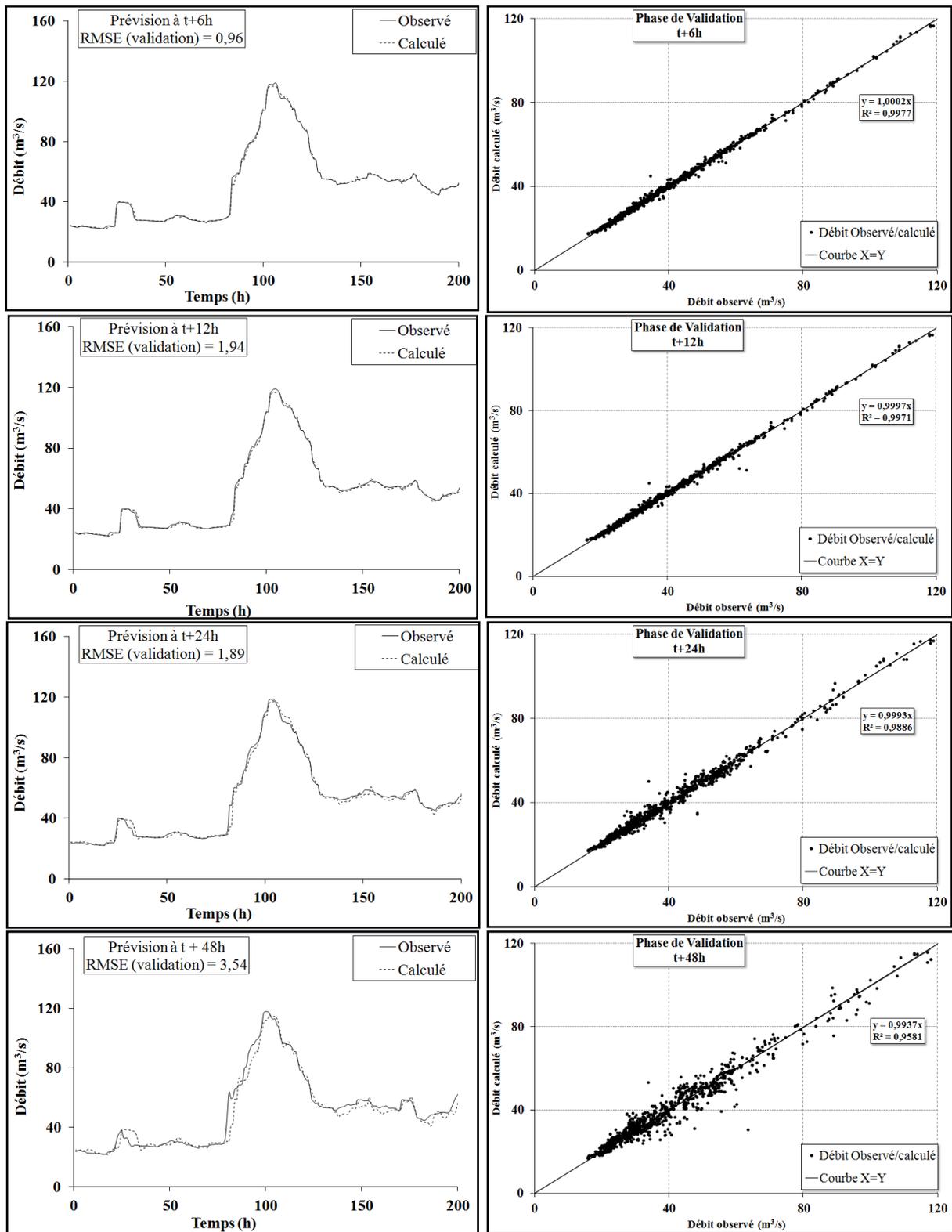


Figure C- 25 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (crue de Janvier 1995 de la base de validation : 10% aléatoire des données du 2^e calage)

Le modèle RNA de prévision montre une capacité de prévision remarquable pour le niveau d'alerte Orange. Il minimise les erreurs produites lorsque les débits sont plus importants (tableau C-16).

	Niveau d'alerte	T+6	T+12	T+18	T+24	T+48
MARE (%)	Vert	1,56	2,24	2,93	3,56	6,41
	Jaune	0,99	1,57	2,12	2,56	5,78
	Orange	0,85	1,08	1,88	2,13	4,49

Tableau C- 16 Évaluation numérique du modèle RNA par niveaux d'alertes (validation avec 10% des données du 2^e calage)

Le calage sans la crue de 2001 (la crue la plus importante enregistrée par la station de Louviers) produit des modèles RNA performants. Ils gardent une haute qualité de prévision pour les horizons de prévisions entre 6h et 48h.

Pour répondre à la question de départ, nous passons au test du modèle RNA de la prévision avec la crue de mars-avril 2001. Cette crue contient des valeurs de débits supérieures à 119 m³/s. la figure C-26 montre la comparaison entre les débits observés et ceux calculés par le modèle RNA pour la prévision à T+6h, T+12h, T+24h et T+48h. Nous notons une dispersion du nuage des points autour de la droite Y=X en augmentant le temps de prévision et une diminution du coefficient de corrélation jusqu'à atteindre 0,83 pour T+48h. Nous remarquons que lorsque les valeurs observées dépassent le niveau de 120 m³/s, les valeurs calculées restent sous ce niveau. Cependant, le modèle RNA garde le pouvoir de modéliser correctement les montées des crues. Donc si la base de calage contient les débits qui décrivent tous les différents niveaux d'alertes, le modèle RNA ainsi créer garantit la sureté des alertes qui est l'objectif principal du SPC SACN.

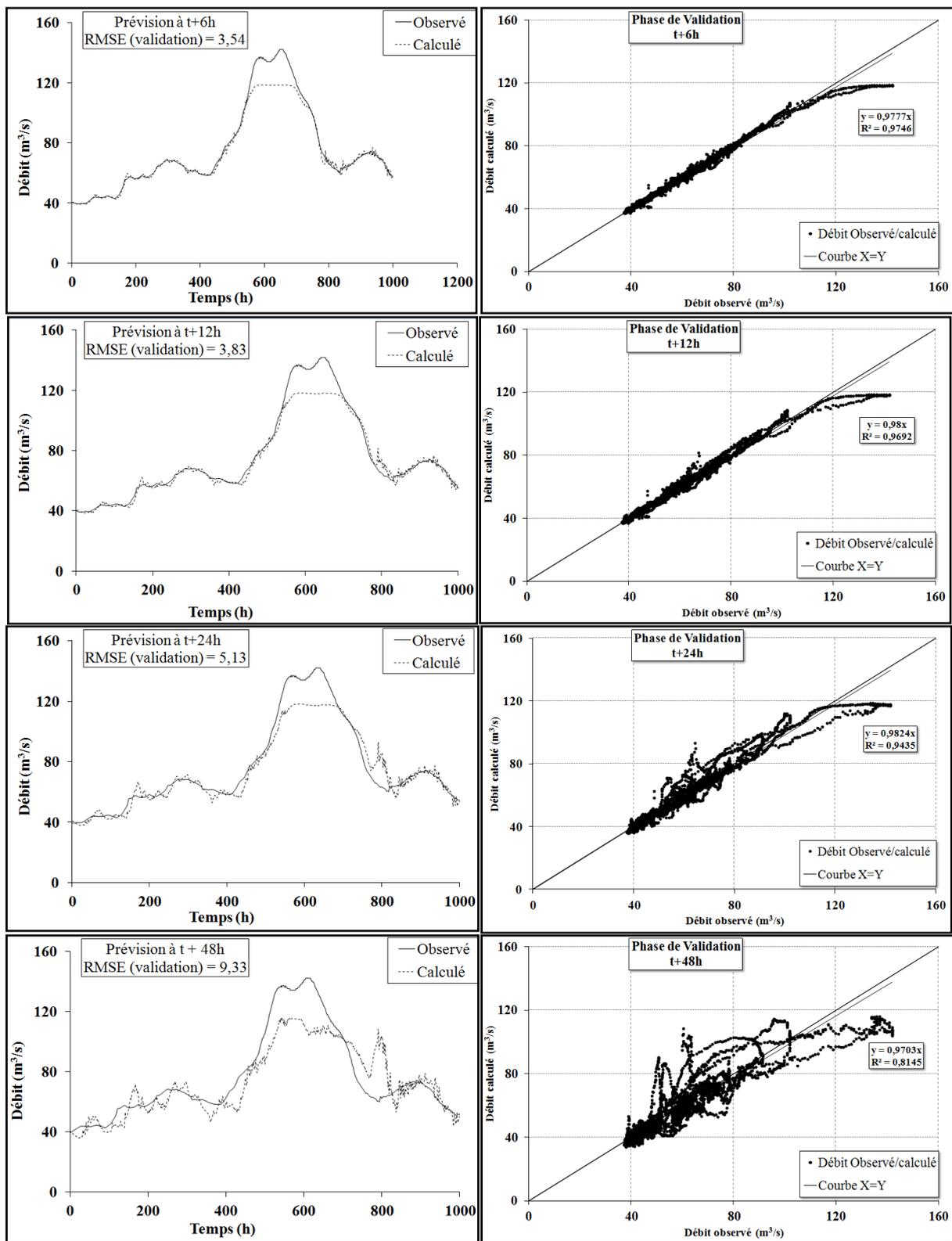


Figure C- 26 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (validation par la crue de mars-avril 2001)

L'évaluation des différents résultats de la prévision des crues selon les niveaux d'alertes montre que la quantité d'erreurs au niveau des alertes « Vert », « Jaune » et « Orange » (les alertes décrites par la base de données de calage) reste acceptable avec des

valeurs de MARE qui ne dépassent pas 11 % (tableau C-17). Ces valeurs deviennent supérieures à 12 % et atteignent 18,35 % lorsqu'on dépasse le seuil de 120 m³/s, la valeur maximale de la base de calage. Les erreurs de prévision s'accumulent au-delà du seuil « Rouge » et par conséquent le modèle RNA devient de plus en plus insatisfaisant dans la production des valeurs des débits futurs. Cette constatation ne remet pas en cause une information quasi sûre au niveau des alertes.

De ce fait, le calage d'un modèle RNA de prévision des crues avec une base de données qui décrit tous les niveaux d'alerte de la station Louviers assurera une bonne anticipation des crues même en cas de passage d'évènements extrêmes non enregistrés dans le passé.

	Niveau d'alerte	T+6	T+12	T+18	T+24	T+48
MARE (%)	Vert	1,17	1,87	2,7	3,72	8,12
	Jaune	1,53	2,39	3,57	5,03	10,69
	Orange	2,07	2,68	3,46	4,55	8,73
	Rouge	12,37	12,63	12,64	13,09	18,35

Tableau C- 17 Critère MARE de la modélisation RNA selon les niveaux d'alerte (validation avec la crue du mars-avril 2001)

Conclusion du troisième chapitre

L'utilisation des techniques des réseaux neurones artificiels (RNA ou ANN), sur des données pluvio-hydrométriques horaires du bassin versant de l'Eure à la station Louviers, a permis de créer un modèle exprimant la non-linéarité de la relation pluie-débit. La création du modèle RNA fiable a nécessité le passage par plusieurs étapes. Parmi ces dernières, celle permettant de déterminer son vecteur d'entrée est la plus importante dans une démarche de modélisation RNA. En effet, elle détermine les paramètres d'entrées dans un système permettant de comprendre la complexité hydrologique et produisant les informations nécessaires pour simuler le débit futur. L'ensemble des étapes a donné naissance à un modèle RNA capable de réaliser des prévisions des crues performantes jusqu'à 48 heures.

Le modèle RNA produit a été évalué par niveau d'alerte. Il a prouvé sa capacité opérationnelle pour une mission de déclenchement d'alertes. Son application à des événements externes à la base de calage prouve sa capacité de résoudre la non-linéarité même avec des événements non calés, ce qui montre son pouvoir prévisionnel important pour notre bassin d'étude. Ceci rend cette modélisation RNA, qui est basée sur des observations passées des débits et pluies, apte à devenir un outil performant de gestion hydraulique permettant une minimisation des risques d'inondation au sein du bassin versant de l'Eure. Cependant, l'incapacité du modèle RNA à prévoir des débits plus importants que ceux de la base de calage montre une limite importante à l'utilisation des techniques RNA. En effet, le modèle arrive à prévoir avec une bonne performance les débits au dessous du maximum de la base de calage, mais au-delà il plafonne à ce maximum. Cette limite reste toute relative dans notre cas, car tous les niveaux d'alerte sont présents dans la base de calage.

L'application de la méthode RNA sur la station Louviers (bassin versant de l'Eure) a permis de réaliser une modélisation performante pour des prévisions jusqu'à 48h. Cette méthode sera appliquée, dans la partie suivante, sur les bassins versants de l'Iton et l'Avre afin de vérifier sa capacité de généralisation.

**CHAPITRE IV. GÉNÉRALISATION DE LA
MÉTHODOLOGIE RNA : STATION NORMANVILLE ET
MUZY**

Cette partie est dédiée à l'application de la méthodologie RNA, développée dans la partie précédente, aux bassins versant de l'Iton et l'Avre (deux sous-bassins versants de l'Eure). Cette application permettra de tester et de vérifier l'efficacité de cette méthodologie sur les différents bassins versant de l'Eure afin de répondre aux objectifs du projet de recherche : la prévision des crues au niveau des stations hydrométriques du bassin versant de l'Eure. Pour rappel, la méthodologie comporte différentes étapes : la détermination de l'architecture RNA, le calibrage du modèle RNA de prévision de crue et l'application de ce dernier pour les temps de prévisions T+6h, T+12h, T+18h, T+24h et T+48h. Ces étapes sont appliquées aux bassins versants de l'Iton (station Normanville) et l'Avre (station Muzy).

I- Architecture optimale RNA

1- Cas du bassin versant de l'Iton : station Normanville

Le bassin versant de l'Iton est un sous bassin de l'Eure d'une superficie de 1035 km². Il s'agit d'un système hydrologique et hydrogéologique complexe qui se caractérise par une zone karstique remarquable⁵¹ ayant des conséquences sur les caractéristiques d'écoulements. Dans cette partie du travail, nous allons présenter les résultats des différentes démarches suivies pour créer et appliquer un modèle RNA de prévision des crues au niveau de la station de Normanville. Comme le modèle de la station Louviers, la création d'un tel modèle passe par la sélection des variables informatives (pluie et débit), la réalisation des diverses combinaisons afin d'assurer l'exploration du champ des possibles (différents vecteurs d'entrées) et enfin le choix de la structure RNA la plus représentative du système hydrologique (optimale). Cette phase de création de l'architecture du RNA optimale est suivie par une exploitation, ou nous allons appliquer et présenter les différents résultats de prévision par le modèle RNA.

1-1- Jeu de données du bassin versant de l'Iton

Dans cette partie, les réseaux de neurones artificiels sont appliqués pour le calage en premier lieu et l'exploitation en second lieu d'un modèle de prévision des crues. Ils utilisent les données horaires de pluie moyenne « P » et de débit « Q » du bassin versant de l'Iton (station Normanville). Le risque de débordement de la rivière Iton est mal identifié surtout avec la présence des réseaux karstiques qui perturbent l'écoulement surfacique ainsi que souterrain. Ce flou sur le risque d'inondation est marqué par un manque d'information au niveau d'alerte rouge et un minimum de crues avec un niveau d'alerte orange dans les

⁵¹ Ce point est détaillé dans le chapitre II-3-.

enregistrements hydrométriques de la station Normanville. En effet, les crues de niveau d’alerte jaune sont les plus présentes dans les enregistrements de débits et spécialement pendant les crues de 1995, 2000 et 2001 (tableau D-1).

Période de la crue	Valeur (m ³ /s)	Niveau d'alerte
Décembre 1994	6,4	Vert
Janvier 1995	10,2	Jaune
Février 1995	8,4	Jaune
Mars 1995	8,8	Jaune
Avril 1995	7,9	Vert
Janvier 1998	7,6	Vert
Novembre 2000	9	Jaune
Décembre 2000	9,8	Jaune
janvier 2001	14	Orange
Février 2001	12,7	Orange
Mars 2001	17,9	Orange
Mai 2001	9,4	Jaune
Décembre 2001	7,4	Vert
Janvier 2002	8,4	Jaune

Tableau D- 1 Base de données de modélisation RNA

Dans ce travail, la prévision des crues se fait en fonction des données de pluie et de débit⁵². Les données hydrométriques utilisées dans cette recherche ont été obtenues auprès du service de prévision des crues de la Haute-Normandie (SPC 76) comme celles du bassin versant de l’Eure. La base de données contient des observations horaires de la pluviométrie moyenne au niveau du bassin versant de l’Iton entre 1993-2010 et de débit au niveau de la station Normanville entre 1983-2010. À l’aide de ces données, nous avons créé la base de données de calage de la station Normanville. Les observations choisies expriment les crues et les décrues des évènements survenus en 1995, 1998, 2000, 2001 et 2002 (tableau D-1).

1-2- Sélection des variables informatives

Comme dans le cas du bassin versant de l’Eure (station Louviers), le choix des variables explicatives du système hydrologique de l’Iton passe par le calcul du coefficient de corrélation entre le débit $Q(t)$ (sortie du système) et les valeurs antérieures du même débit d’une part, et entre ce même débit et les valeurs antérieures de la pluie moyenne sur l’Iton d’autre part. Cette corrélation s’applique sur les données qui décrivent le début de la montée de la crue la plus importante au niveau de la station (mars 2001). L’estimation du coefficient

⁵² La modélisation en pluie-débit est l’une des exigences du SPC SACN.

de corrélation $C_{XY}(t_0)$ se fait à travers l'équation (Eq. C-10). La base de données a été normalisée entre 0 et 1 à travers l'équation (Eq. C-4).

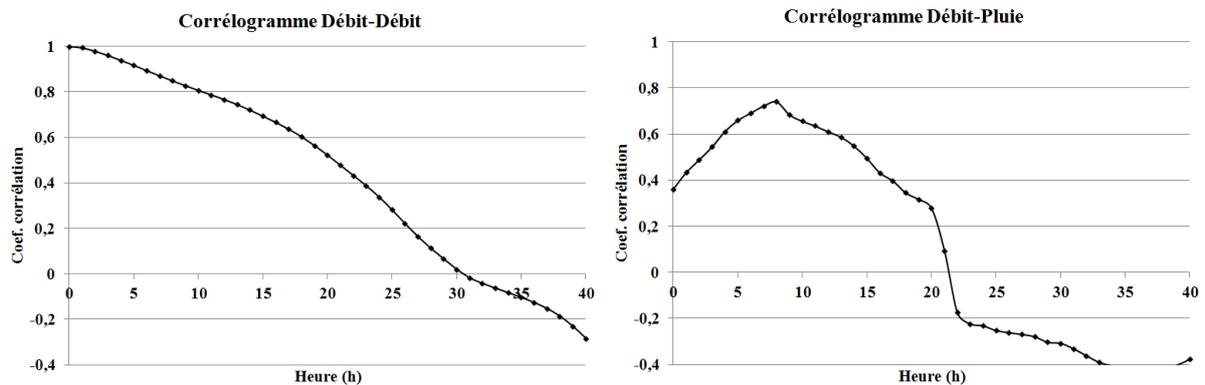


Figure D- 1 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie)

La figure D-1 présente les résultats des matrices de corrélation débit-débit et débit-pluie à la station Normanville. Les variables antérieures qui correspondent à des coefficients de corrélations positives sont : les vingt-deux antécédents horaires de pluie moyenne (de $P(t)$ jusqu'à $P(t-21)$) et les trente antécédents horaires du débit (de $Q(t)$ jusqu'à $Q(t-29)$). Ces variables sont celles qui ont la possibilité d'expliquer les débits présents et futurs de la station Normanville.

Une étape expérimentale succède à la sélection des variables explicatives. Elle consiste à réaliser différents scénarios de vecteurs d'entrées, à lancer et à évaluer des simulations afin de les classer. Comme pour la station Louviers, l'évaluation sera numérique pour les résultats de la phase de validation. Les différentes combinaisons sont des vecteurs d'entrées en pluies, en débits et en pluies-débits. La sortie de RNA testée est le débit à prévoir à 6h, l'une des échéances de la prévision des crues. Rappelons que le RNA utilisé est un PMC avec une seule couche cachée et la fonction d'activation est la sigmoïde (Eq. C-1).

1-2-1- Entrées en pluies

La réalisation des simulations avec des RNA en pluies moyennes en entrée nous mène à une compréhension plus avancée de la valeur informative des données de pluie et aide à choisir la bonne architecture RNA. La réalisation des RNA se base sur l'équation (Eq. D-1). Les calculs se font avec un pas de 6 neurones.

$$Q(t + 6) = f(P(t), \dots, P(t - n)) \quad (\text{Eq. D - 1})$$

Où « n » varie entre 1 et 21 ; Q est le débit à prévoir ; P est la pluie moyenne du bassin versant de l'Iton.

	22	19	13	7	1
NASH	<u>0,070</u>	0,064	0,049	0,032	0,021
RMSE	<u>2,829</u>	2,839	2,863	2,888	2,904
MARE	<u>59,813</u>	60,337	60,297	61,416	62,424
CP	<u>-14,623</u>	-14,741	-15,000	-15,290	-15,475

Tableau D- 2 Critères de performances des modélisations RNA (entrées en pluie) : validation avec 10% aléatoire de la base de calage)

Les critères de performance obtenus, pour la plupart des combinaisons de pluies antérieures, indiquent une modélisation RNA inacceptable (tableau D-2). Ils indiquent des prévisions insatisfaisantes avec des valeurs RMSE/MARE élevées et des valeurs de NASH/CP faibles. Ces critères montrent que l'utilisation des valeurs de la pluie moyenne antérieure à l'Iton influence faiblement la modélisation des débits futurs de la station Normanville. Cette influence s'améliore progressivement en augmentant le nombre d'entrées en pluies antérieures, mais reste inacceptable avec des RMSE de 2,83 (figure D-2). Les meilleurs critères correspondent à un vecteur d'entrée de 22 neurones en pluies antérieures.

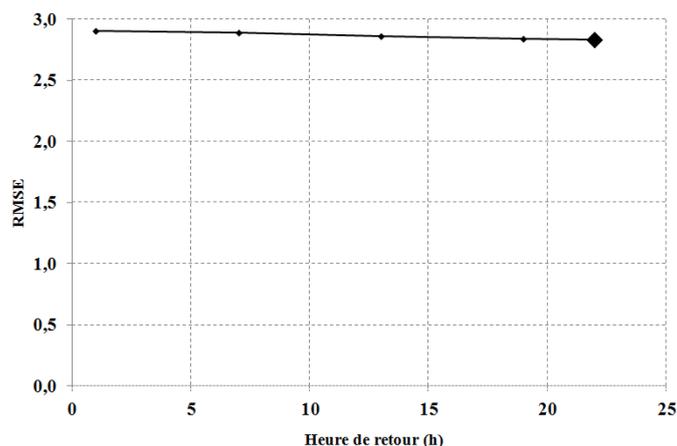


Figure D- 2 Évolution de la RMSE : vecteurs d'entrée en pluies

1-2-2- Entrées en débits

Comme pour les étapes appliquées aux différents vecteurs de variables pluies, la détermination des valeurs informatives des variables débits passe par une phase de calcul à travers l'équation (Eq. D-2). Les calculs comportent les trois phases de calibrage d'un modèle (apprentissage, test et validation).

$$Q(t + 6) = f(Q(t), \dots, Q(t - m)) \quad (\text{Eq. D - 2})$$

Où « m » varie entre 1 et 29 avec un pas de 6 neurones ; Q est le débit.

Les résultats trouvés ont des critères de performances satisfaisants (tableau D-3). Ces derniers indiquent que les différents vecteurs en débits antérieurs produisent une bonne qualité vis-à-vis de la prévision à 6h. Ils assurent que les données de débits antérieurs de la

station Normanville contiennent une quantité importante de valeurs informatives pour les débits à T+6h avec des critères RMSE et MARE faibles par rapport à ceux des vecteurs en pluies seules.

	30	25	19	13	7	1
NASH	0,9994	0,9994	0,9993	<u>0,9995</u>	0,9993	0,9982
RMSE	0,073	0,075	0,078	<u>0,067</u>	0,077	0,124
MARE	1,333	1,394	1,497	<u>1,191</u>	1,444	2,237
CP	0,990	0,989	0,988	<u>0,991</u>	0,988	0,970

Tableau D- 3 Critères de performances des modélisations RNA avec entrées en débits (validation avec 10% aléatoire de la base de calage)

L'irrégularité du critère de performance RMSE en fonction du nombre de neurones dans la couche d'entrée indique que l'augmentation de la quantité d'information débit en entrée ne garantit pas l'amélioration de la qualité de modélisation au niveau de la station Normanville (figure D-3). Cette irrégularité indique que le modèle RNA avec un vecteur à 13 neurones en entrée est le modèle le plus performant par rapport aux autres modèles testés. Cependant, ce modèle n'a pas de différence significative en erreur avec le modèle à 30 neurones d'entrées en débit antérieur, ce qui nous indique que la réalisation des différentes combinaisons pluie-débit peut engendrer une amélioration de la qualité de modélisation RNA vis-à-vis les débits futurs.

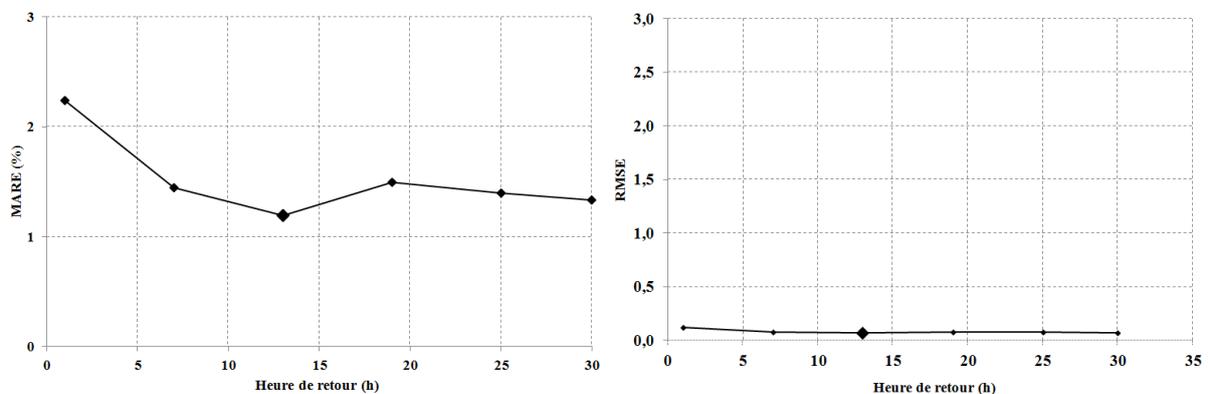
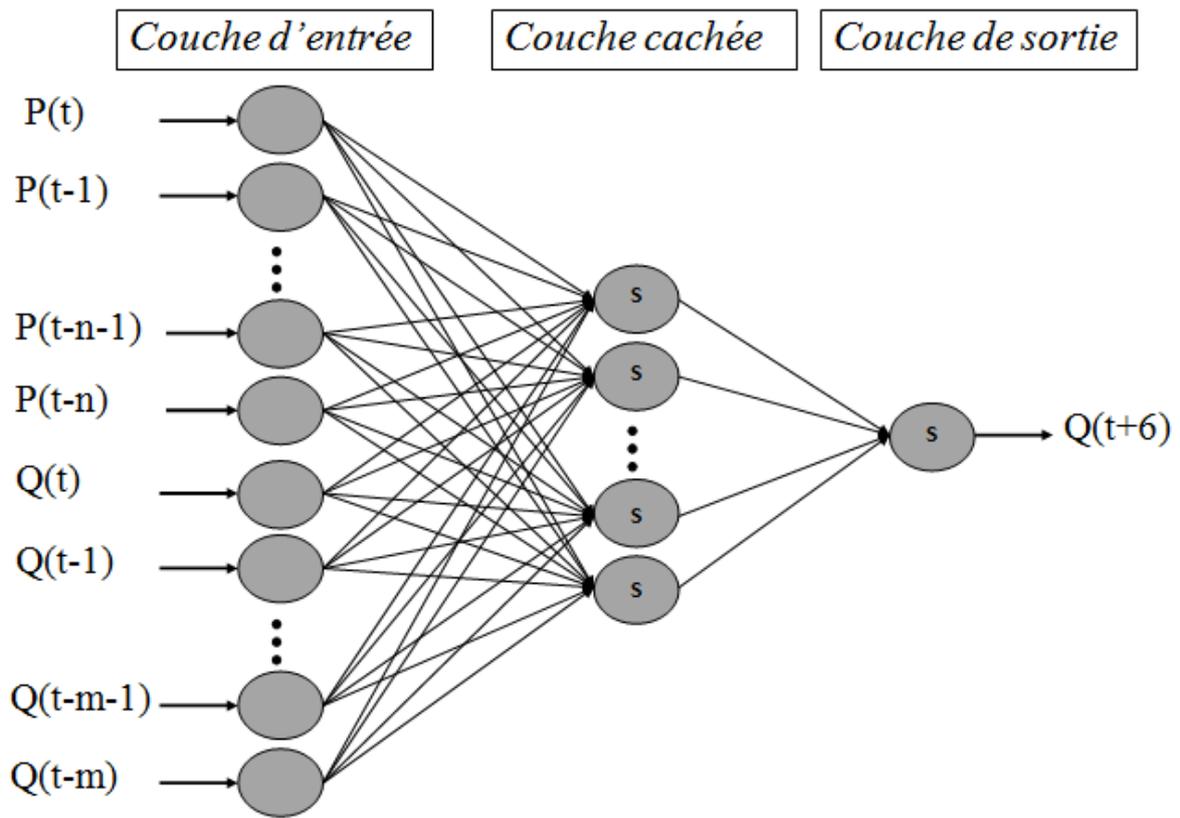


Figure D- 3 Évolution des critères de performances MARE et RMSE : station Normanville

1-2-3- Entrées en pluie-débit

Cette étape consiste à faire des combinaisons en entrées pluie-débit antérieures. La figure D-4 décrit les différents scénarios possibles pour les entrées pluies-débits antérieures. « n » varie entre 1-21 et « m » varie entre 1-29. Cette variation se fait avec un pas de 6 neurones.



Avec S : fonction d'activation sigmoïde

Figure D- 4 Architectures RNA (entrées en débit-pluie)

Entrée en Débit		Nash				
		Entrée en Pluie				
		22	19	13	7	1
	30	0,99398	<u>0,99406</u>	<u>0,99421</u>	0,99397	0,99383
	25	0,99394	0,99400	0,99377	0,99382	0,99364
	19	0,99399	<u>0,99406</u>	0,99383	0,99384	0,99386
	13	0,99405	0,99363	0,99374	0,99385	0,99397
	7	0,99368	0,99402	0,99398	0,99371	0,99384
	1	0,99343	0,99339	0,99363	0,99372	0,99323
		RMSE				
		Entrée en Pluie				
		22	19	13	7	1
	30	0,196	<u>0,194</u>	<u>0,192</u>	0,196	0,198
	25	0,196	0,195	0,199	0,198	0,201
	19	0,195	<u>0,194</u>	0,198	0,198	0,198
	13	0,195	0,201	0,200	0,198	0,196
	7	0,200	0,195	0,196	0,200	0,198
	1	0,205	0,205	0,201	0,200	0,208
		MARE				
		Entrée en Pluie				
		22	19	13	7	1
	30	2,181	2,202	2,221	2,198	2,176
	25	<u>2,121</u>	2,149	2,206	<u>2,138</u>	2,323
	19	<u>2,118</u>	2,146	2,208	2,143	2,189
	13	2,173	2,254	2,199	2,234	2,141
	7	2,211	2,239	2,150	2,249	2,227
	1	2,599	2,585	2,426	2,380	2,495
		CP				
	Entrée en Pluie					
	22	19	13	7	1	
30	0,9147	<u>0,9159</u>	<u>0,9180</u>	0,9146	0,9125	
25	0,9141	0,9149	0,9118	0,9125	0,9099	
19	0,9148	<u>0,9158</u>	0,9126	0,9127	0,9130	
13	0,9156	0,9097	0,9112	0,9127	0,9146	
7	0,9104	0,9153	0,9148	0,9109	0,9127	
1	0,9066	0,9063	0,9097	0,9110	0,9040	

Tableau D- 4 Critères de performance selon différentes combinaisons d'entrée débit-pluie au modèle RNA (validation avec 10% aléatoire des données de calage)

Le tableau D-3 révèle les critères de performance numérique (RMSE, MARE, NASH et C_p) pour la phase de la validation des différentes simulations RNA. Nous remarquons que les résultats sont admissibles pour toutes les combinaisons avec des critères de performance satisfaisants. La lecture des critères de NASH, RMSE et C_p renseigne sur la performance du

modèle. Le critère NASH, de même que pour la prévision des crues à la station Louviers, n'affiche pas une variation considérable pour les prévisions T+6h et, donc, est peu discriminant pour le classement de différents modèles RNA. Nous utiliserons donc le reste des critères numériques calculés pour la classification et la sélection de l'architecture optimale RNA. Selon le critère MARE, le modèle RNA le plus performant à T+6h est le modèle qui se compose de 41 neurones d'entrée (22 en pluies moyennes et 19 en débits). Cependant, les critères RMSE et C_p indiquent que le modèle RNA le plus performant à T+6h est le modèle qui se compose de 43 entrées (13 en pluies moyennes et 30 en débits). Ces résultats montrent que la combinaison des deux types de variables pluie-débit influence la performance de la modélisation RNA.

De ce fait, la structure adoptée du modèle RNA pour la prévision des crues à T+6h au niveau de la station de Normanville est 43-23-1 (figure D-5). Elle se compose de 13 variables de pluie antérieure ($P(t)$ jusqu'à $P(t-12)$) et 30 variables antérieures du débit ($Q(t)$ jusqu'à $Q(t-29)$), 23 neurones dans la couche cachée et un seul neurone dans la couche de sortie. La fonction sigmoïde est la fonction d'activation pour les deux dernières couches. Cette architecture RNA sera utilisée aussi pour la prévision des crues avec des horizons de prévision de 12h, 18h, 24h et 48h. La relation mathématique pour la modélisation RNA est la suivante :

$$Q(t + t_0) = f(P(t), \dots, P(t - 12), Q(t), \dots, Q(t - 29)) \quad (Eq. D - 3)$$

Avec $Q(t+t_0)$: débit à prévoir pour l'horizon de prévision t_0

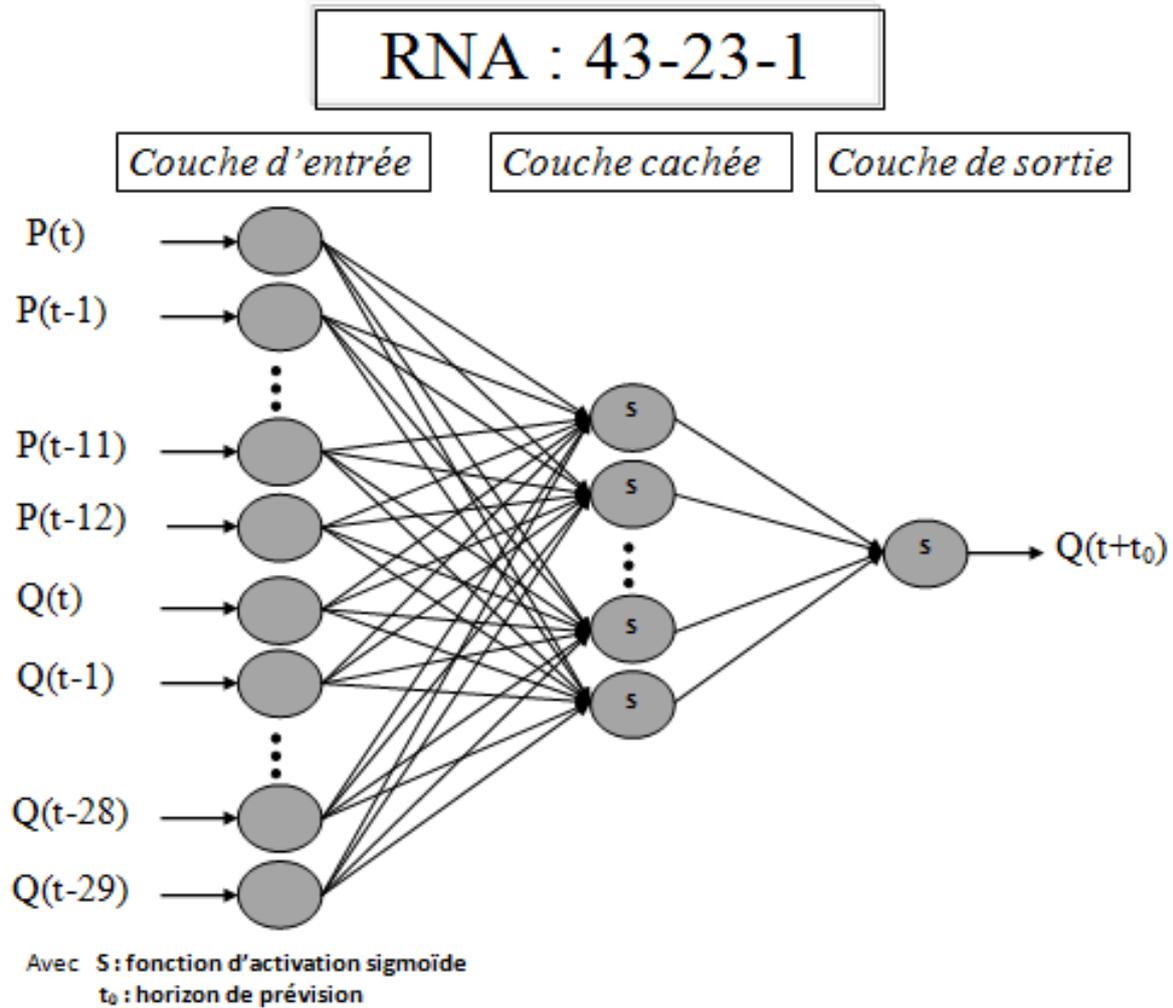


Figure D- 5 Architecture du modèle RNA de prévision des crues de la station Normanville

2- Bassin versant de l'Avre : station de Muzy

Le bassin versant de l'Avre est le deuxième sous bassin versant de l'Eure avec une superficie de 881,5 km² (station Muzy). C'est un système hydrologique et hydrogéologique ayant des caractéristiques d'écoulement différentes de celles de l'Iton et l'Eure. Son amont possède un relief assez marqué par des altitudes qui peuvent atteindre environ 300 m. Il se caractérise par une nappe de craie largement exploitée.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de l'application de la méthodologie RNA sur le bassin versant de l'Avre. Comme pour les deux autres bassins d'études (Eure et Iton), la création d'un tel modèle comporte : la sélection des variables informatives (pluie et débit), la simulation des diverses combinaisons qui explore le champ des possibles (différents vecteurs d'entrées) et enfin la sélection de l'architecture optimale RNA afin de caler un modèle RNA de prévision des crues au niveau de la station Muzy.

2-1- Jeu de données du bassin versant de l'Iton

Les RNA seront appliqués, après la sélection des variables informatives, tout au long des étapes de la méthodologie utilisée. Ils utilisent les données horaires de pluie moyenne « P » et de débit « Q » du bassin versant de l'Avre (station Muzy). Le risque de débordement de la rivière Avre est important surtout dans sa partie aval et en se rapprochant de la station Muzy⁵³. Les crues de 2001 sont les crues les plus marquantes au niveau de la station Muzy où les niveaux d'alerte ont été « Orange » et « Rouge » indiquant des zones urbaines touchées par des débordements et des dégâts matériels.

Période de la crue	Valeur (m ³ /s)	Niveau d'alerte
Novembre 2000	16,7	Jaune
Décembre 2000	17,7	Jaune
janvier 2001	29,4	Orange
Février 2001	25,5	Orange
Mars 2001	30,9	Rouge
Avril 2001	17,5	Jaune
Mai 2001	14,4	Vert
Décembre 2001	8	Vert

Tableau D- 5 Base de données de modélisation RNA

Dans ce travail, la prévision des crues se fait en fonction des données de pluie et de débit. Les données hydrométriques utilisées dans cette recherche ont été obtenues auprès du service de prévision de crue de la Haute-Normandie (SPC 76) comme celle du bassin versant de l'Eure et de l'Iton. La base de données contient des observations horaires de la pluviométrie moyenne au niveau du bassin versant de l'Avre entre 1993-2010 et de débit au niveau de la station Muzy entre 1971-2010. La limitation des données de la pluviométrie nous oblige à créer une base de calage entre 1993 et 2010. Cependant, cette période comporte un manque d'enregistrement de débits entre 1995 et 1998. Par conséquent, l'une des crues les plus intenses au niveau de la station Muzy (1995) est manquante. À travers ces enregistrements, nous avons créé la base de données de calage de la station Muzy. Comme dans le cas des autres stations étudiées, cette base contient des observations horaires antérieures de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Avre et du débit au niveau de la station Muzy. Ces observations choisies expriment les crues et les décrues des évènements survenus en 2000 et 2001 (tableau D-5).

⁵³ Le risque de débordement a été abordé dans le chapitre I II-1.

2-2- Structure optimale du RNA

Pour déterminer la structure du modèle RNA la plus adaptée pour le système hydrologique de l'Avre, nous nous sommes servis de la même démarche que précédemment. Nous avons le RNA qui se compose d'une couche d'entrées, d'une seule couche cachée et d'une couche de sortie avec des fonctions d'activations de type sigmoïde pour les deux dernières couches. La figure D-6 présente les résultats des matrices de corrélation débit-débit et débit-pluie à la station Muzy (exutoire de l'Avre). Selon cette figure, les variables explicatives sont les trente antécédents horaires de pluie (de $P(t)$ jusqu'à $P(t-29)$) et les trente-six antécédents horaires du débit (de $Q(t)$ jusqu'à $Q(t-35)$).

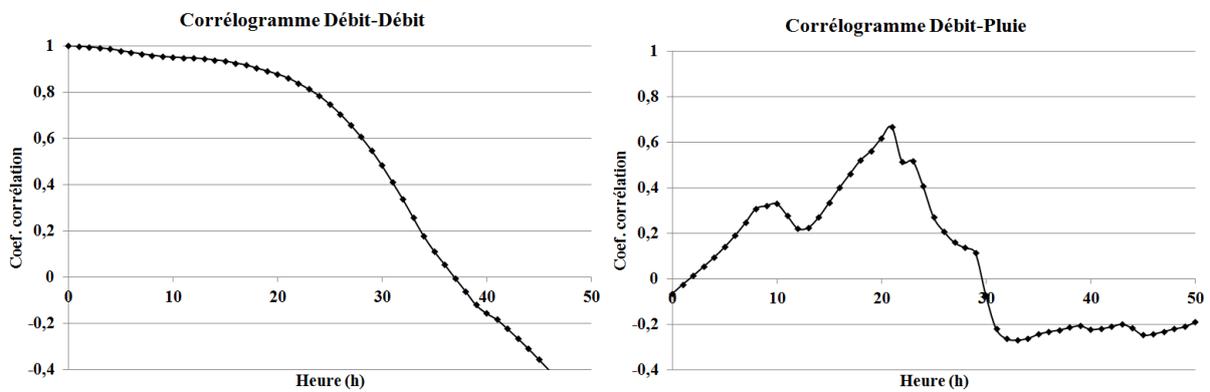


Figure D- 6 Corrélation croisée (Débit-Débit et Débit-Pluie)

Comme précédemment, une étape expérimentale (essais-erreurs) succède la sélection des variables explicatives. Elle consiste à réaliser, lancer et évaluer les différents scénarios possibles de vecteurs d'entrées. Comme pour les autres stations d'études, l'évaluation sera numérique pour les résultats de la phase de la validation. Les différentes combinaisons sont des vecteurs d'entrées en pluie, en débit et en pluie-débit. La sortie de RNA testée est le débit à prévoir à 6h. Le RNA utilisé est un PMC avec une seule couche cachée et la fonction d'activation est la fonction sigmoïde (Eq. C-1).

La réalisation des scénarios possibles des RNA, avec les seules variables de type pluie en vecteur d'entrée, se base sur l'équation Eq. D-4. Le tableau D-6 indique leurs résultats des simulations.

$$Q(t + 3) = f(P(t), \dots, P(t - n)) \quad (\text{Eq. D} - 4)$$

Où : « n » varie entre 1 et 21 avec un pas de 6 neurones ; Q est le débit à prévoir ; P est la pluie moyenne du bassin versant de l'Avre.

Nous remarquons que les données de pluie moyennes antérieures du bassin versant de l'Avre ont une influence minime sur la prévision des crues à T+6h au niveau de la station

Muzy. Ces données produisent des modélisations RNA insatisfaisantes au niveau de cette station avec des critères NASH et CP faibles, et des RMSE et MARE fortes. Ces critères montrent que l'utilisation des valeurs de la pluie moyenne antérieure à l'Avre influence peu la modélisation des débits futurs de la station Muzy. Cette influence accroit avec l'augmentation du nombre d'entrées en pluies antérieures, mais reste inacceptable avec des RMSE de 2,79. Les meilleurs critères enregistrés pour les vecteurs en pluie correspondent à un vecteur d'entrées de 30 neurones en pluies antérieures.

	30	25	19	13	7	1
NASH	0,096	0,076	0,063	0,046	0,027	0,020
RMSE	2,792	2,820	2,840	2,867	2,895	2,905
MARE	58,317	59,225	60,198	60,808	62,043	62,601
CP	-14,218	-14,527	-14,745	-15,050	-15,366	-15,492

Tableau D- 6 Évaluation des modélisations RNA avec des vecteurs d'entrées en pluie (validation avec 10% aléatoire des données de calage)

Nous passons maintenant à la vérification des valeurs informatives des variables de débits antérieurs dans le vecteur d'entrée du RNA. À cet effet, nous avons effectué différentes combinaisons de vecteur d'entrée en débit afin d'évaluer leurs valeurs informatives vis-à-vis de la prévision des crues à T+6h (Eq. D-5).

$$Q(t + 3) = f(Q(t), \dots, Q(t - m)) \quad (\text{Eq. D - 5})$$

Où : m varie entre 1 et 29 avec un pas de 6 neurones ; Q est le débit.

	36	31	25	19	13	7	1
NASH	0,9989	0,9991	0,9990	0,9990	<u>0,9991</u>	0,9990	0,9971
RMSE	0,093	0,087	0,093	0,089	<u>0,084</u>	0,089	0,156
MARE	0,848	0,756	0,891	0,784	<u>0,691</u>	0,730	1,351
CP	0,995	0,996	0,995	0,995	<u>0,996</u>	0,995	0,986

Tableau D- 7 Évaluation des modélisations RNA avec des vecteurs d'entrées en débits (validation avec 10% aléatoire de la base de calage)

Les critères de performance obtenus, pour la plupart des combinaisons des débits antérieurs, indiquent une modélisation RNA satisfaisante et un pouvoir informatif important des débits antérieurs vis-à-vis le débit à T+6h (tableau D-7). Ils indiquent un pouvoir fort d'anticipation avec des RMSE/MARE faibles et des valeurs de NASH/CP élevées. Ce pouvoir d'anticipation varie irrégulièrement en fonction du nombre de neurones d'entrées. Les meilleurs critères sont enregistrés pour un vecteur d'entrées de 13 neurones de débit antérieur.

Cependant, le passage à la modélisation avec des vecteurs mixtes (pluie-débit) indique que l'intégration des variables pluies au vecteur des débits influence les résultats de la modélisation RNA au niveau de Muzy (tableau D-8). Les différentes productions sont améliorées par l'ajout des variables pluies et engendrent des modèles RNA Pluie/Débit meilleurs pour une prévision à T+6h. Selon les critères de performances RMSE et MARE, le modèle le plus performant est le modèle RNA avec 30 entrées pluie antérieure et 36 entrées débit antérieur. La structure optimale alors adoptée du modèle RNA pour la prévision des crues à T+6h ainsi que les autres échéances de prévision des crues (+12h, +18h, +24h et +48) au niveau de la station de Muzy est 66-11-1 (figure D-7). Elle se compose de 30 variables de pluies antérieures (P(t) jusqu'à P(t-29)) et 36 variables de débit antérieur (Q(t) jusqu'à Q(t-35)), onze neurones dans la couche cachée et un seul neurone dans la couche de sortie. La fonction sigmoïde est la fonction d'activation pour les deux dernières couches. Cette architecture RNA sera utilisée pour la prévision des crues à la station Muzy et pour les horizons de prévision étudiés (+6h, +12h, +18h, +24h et +48h).

La relation mathématique pour la modélisation RNA est la suivante :

$$Q(t + t_0) = f(P(t), \dots, P(t - 29), Q(t), \dots, Q(t - 35)) \quad (Eq. D - 8)$$

Avec Q (t+t₀) : débit à prévoir pour l'horizon t₀

Entrée en Débit		Nash					
		Entrée en Pluie					
		30	25	19	13	7	1
	36	<u>0,99933</u>	0,99918	0,99912	0,99911	0,99898	0,99895
	31	0,99923	0,99929	0,99931	0,99904	0,99927	0,99919
	25	0,99920	0,99907	0,99920	0,99928	0,99904	0,99905
	19	0,99923	0,99924	0,99929	0,99924	0,99904	0,99901
	13	0,99925	0,99916	0,99913	0,99904	0,99912	0,99892
	7	0,99890	0,99905	0,99891	0,99924	0,99905	0,99891
	1	0,99758	0,99675	0,99757	0,99682	0,99613	0,99708
		RMSE					
		Entrée en Pluie					
		30	25	19	13	7	1
	36	<u>0,074</u>	0,082	0,085	0,086	0,092	0,093
	31	0,079	0,076	0,075	0,089	0,077	0,081
	25	0,081	0,088	0,081	0,077	0,089	0,089
	19	0,079	0,079	0,076	0,079	0,089	0,090
	13	0,079	0,083	0,084	0,089	0,085	0,095
	7	0,095	0,089	0,095	0,079	0,088	0,095
	1	0,141	0,164	0,143	0,162	0,178	0,156
		MARE					
		Entrée en Pluie					
		30	25	19	13	7	1
	36	<u>0,652</u>	0,785	0,823	0,800	0,846	0,848
	31	0,775	0,714	0,685	0,838	0,668	0,662
	25	0,761	0,844	0,781	0,672	0,783	0,771
	19	0,757	0,770	0,774	0,676	0,813	0,820
	13	0,768	0,830	0,785	0,838	0,747	0,887
7	0,909	0,753	0,939	0,715	0,819	0,929	
1	1,185	1,509	1,239	1,599	1,759	1,381	
	CP						
	Entrée en Pluie						
	30	25	19	13	7	1	
36	<u>0,9968</u>	0,9960	0,9958	0,9957	0,9951	0,9949	
31	0,9963	0,9966	0,9967	0,9954	0,9965	0,9961	
25	0,9961	0,9955	0,9961	0,9965	0,9954	0,9954	
19	0,9963	0,9963	0,9966	0,9963	0,9953	0,9952	
13	0,9964	0,9959	0,9958	0,9954	0,9958	0,9947	
7	0,9946	0,9954	0,9947	0,9963	0,9954	0,9947	
1	0,9883	0,9842	0,9880	0,9845	0,9813	0,9857	

Tableau D- 8 Critères de performance des résultats de la modélisation RNA Pluie-Débit (validation avec 10% des données de calage)

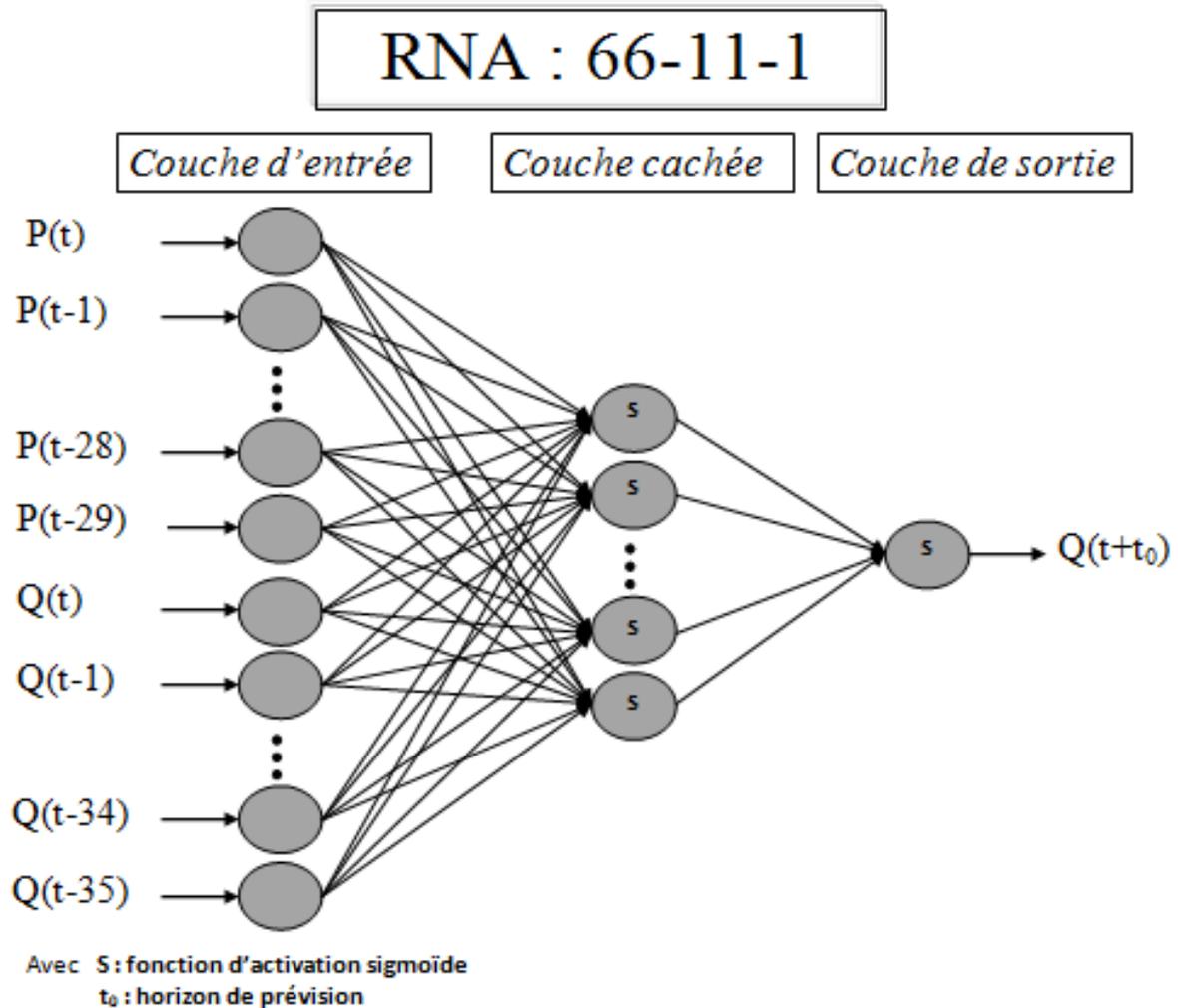


Figure D- 7 Architecture du modèle RNA de prévision des crues de la station Muzy

II- Application du modèle RNA : Prévision des crues

Dans cette partie nous allons nous intéresser au calage des modèles RNA de prévision des crues (+6h, +12h, +18, +24h et +48h) au niveau des stations Normanville et Muzy. Après l'application des modèles RNA et l'évaluation des résultats, nous allons les comparer avec celles de la station Louviers afin d'identifier le pouvoir de généralisation de la méthodologie RNA de prévision des crues.

1- Évaluation des résultats des modèles RNA de prévision des crues

1-1- Cas de la station Normanville

Le calage du modèle RNA au niveau de la station Normanville a été réalisé avec la même base de données que celle utilisée précédemment. Malheureusement, cette base de données ne comporte pas des débits décrivant une alerte Rouge sur la station Normanville. De plus, le manque de crue d'alerte orange au niveau de cette station nous ne permettra pas

d'effectuer deux validations. Nous n'effectuerons donc l'évaluation de la prévision que sur les résultats d'une seule validation (10 % aléatoire de la base de calage).

Le calage du modèle RNA de prévision des crues comporte trois phases : apprentissage, test et validation. Sa structure optimale déterminée précédemment (RNA : 43-23-1) est appliquée pour tous les modèles de prévision des crues. Pour évaluer le pouvoir de modélisation RNA sur la station Normanville, nous nous concentrerons sur les résultats de la validation.

Horizon de prévision	Station Normanville (Validation 10% aléatoire)			
	RMSE	MARE	NASH	C _p
T+6h	0,279	3,589	0,989	0,929
T+12h	0,343	4,513	0,983	0,946
T+18h	0,437	5,412	0,971	0,939
T+24h	0,501	6,097	0,962	0,929
T+48h	0,73	8,39	0,918	0,887

Tableau D- 9 Évaluation des résultats de la modélisation RNA de prévision

Le tableau D-9 illustre les critères de performance de la phase de validation. L'évaluation numérique de la modélisation, à travers les critères de performance NASH, RMSE, MARE et C_p, indique une qualité élevée des estimations de débits futurs par les modèles RNA pour les prévisions (T+6h, T+12h, T+18, T+24h et T+48h). Ils montrent que ces modèles sont performants en produisant des débits proches de la réalité avec de faibles erreurs (RMSE (validation T+6h) = 0,28). Les valeurs du C_p indiquent des prévisions non naïves entre T+6h et T+48h avec des valeurs proches de « 0 ». D'autre part, comme pour la station Louviers, la performance de la modélisation RNA au niveau de la station Normanville diminue en augmentant l'horizon de prévision indiquant une augmentation d'erreurs produites, alors une perte de précision dans les calculs. Cette perte de précision reste satisfaisante avec des erreurs faibles (RMSE (validation T+48) = 0,73) et un fort pouvoir d'anticipation (C_p (validation T+48h) = 0,89).

Les résultats de la prévision des débits au niveau de la station Normanville ont été évalués graphiquement. La figure D-8 présente une comparaison des débits observés et ceux calculés pour les horizons de prévision (+6h, +12h, +24h et +48h). Les nuages des points, qui présentent les débits calculés en fonction des débits observés, coïncident avec la droite Y=X pour les horizons de prévision (+6h, +12h, +24h et +48h) indiquant la présence d'une bonne corrélation entre les données observées et celles calculées surtout pour les valeurs élevées de débit. Ces bonnes corrélations sont traduites par une quasi-coïncidence des hydrogrammes des

crues observées et celles calculées indiquant donc des anticipations satisfaisantes avec un décalage temporel faible pour la totalité des allures et des pics.

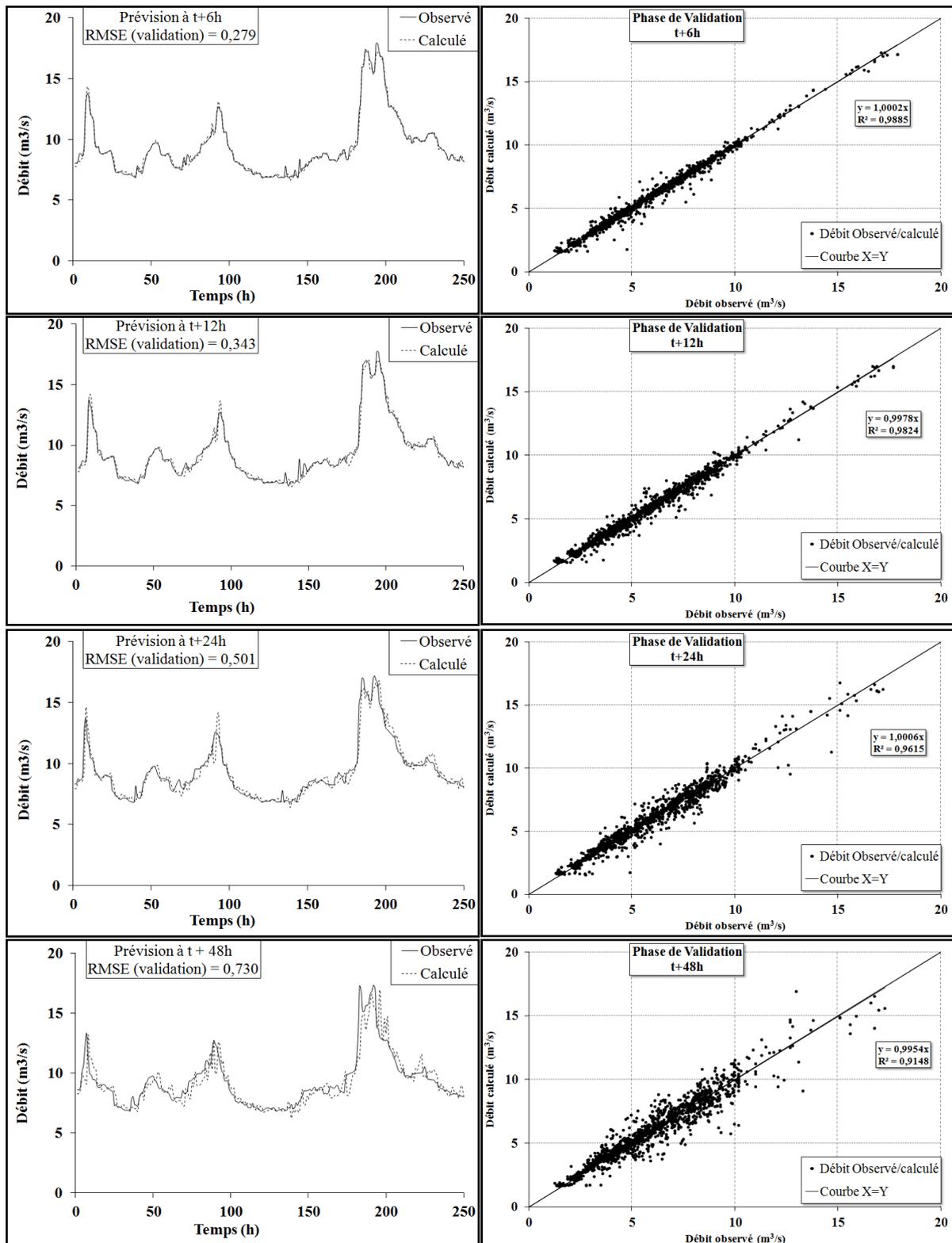


Figure D- 8 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (événements entre janvier 2001 de la base de validation -10% aléatoire des données de calage)

L'analyse des résultats de prévision des crues par niveau d'alerte montre une convergence plus élevée du modèle RNA lorsque nous augmentons les débits et nous passons d'un niveau d'alerte à un autre supérieur (tableau D-10). Entre T+6h et T+18h, nous enregistrons moins d'erreurs de modélisation RNA en passant du niveau vert au jaune et orange. À partir de T+24h, les prévisions au niveau d'alerte orange enregistrent des erreurs supérieures aux autres enregistrées au niveau vert et jaune. Ces erreurs peuvent être expliquées par la faible quantité d'information contenue dans la base de calage vis-à-vis des crues extrêmes (orange et rouge). Cependant, ces erreurs restent acceptables (MARE (T+48h) = 10,29 %) et indiquent une bonne qualité de prévision des crues jusqu'à T+48h.

	Niveau d'alerte	T+6	T+12	T+18	T+24	T+48
MARE (%)	Vert	4,01	4,94	5,83	6,46	8,48
	Jaune	1,59	2,48	3,16	3,97	7,52
	Orange	1,58	2,53	4,94	6,69	10,29

Tableau D- 10 Critère MARE selon les niveaux d'alertes (validation avec 10% aléatoire des données de calage)

1-2- Cas de la station de Muzy

Nous allons nous servir, pour l'application du modèle RNA, de la même base de données de la station Muzy que celle utilisée précédemment. Malheureusement, cette base de données ne comporte pas assez d'évènements importants : les débits qui décrivent les crues importantes entre 1995 et 1998 sont absents (pendant cette période la station Hydrométrique a cessé de fonctionner suite à son endommagement par la forte crue de 1995). De ce fait, nous ne pouvons pas effectuer une double validation du modèle RNA au niveau de la station Muzy. Nous n'allons donc analyser que les résultats d'une seule validation.

Le calibrage du modèle RNA de prévision des crues comporte trois phases : apprentissage, test et validation. Sa structure optimale déterminée dans la partie précédente (RNA : 66-11-1) est appliquée pour tous les modèles de prévision des crues (T+6h, T+12h, T+18h, T+24h et T+48h). L'évaluation du pouvoir de modélisation RNA sur la station Muzy va être faite selon les résultats de la validation.

Horizon de prévision	BV AVRE (Validation avec 10% aléatoire)			
	RMSE	MARE	NASH	C _p
T+6h	0,252	1,507	0,997	0,995
T+12h	0,433	2,481	0,993	0,994
T+18h	0,689	3,615	0,981	0,988
T+24h	0,887	4,609	0,969	0,98
T+48h	2,083	10,857	0,836	0,914

Tableau D- 11 Évaluation des résultats des modèles RNA de prévision des crues (Station Muzy)

L'évaluation numérique de la modélisation, à travers les critères de performance NASH, RMSE, MARE et C_p, indique une fiabilité élevée des modèles RNA de prévision des crues pour toutes les échéances de prévision (tableau D-11). Ces critères montrent que ces modèles sont performants en produisant des débits proches de la réalité avec de faibles erreurs. Les erreurs de calcul augmentent avec l'augmentation de l'horizon de prévision, mais reste admissibles avec des RMSE qui ne dépassent pas 2,08 pour T+48h et avec un fort pouvoir d'anticipation (C_p (validation T+48h) = 0,91).

Les résultats de la prévision des débits au niveau de la station Normanville ont été évalués graphiquement. La figure D-9 présente une comparaison des débits observés et ceux calculés pour les prévisions T+6h, T+12h, T+24h et T+48h. Les nuages des points, qui présentent les débits calculés en fonction des débits observés, coïncident avec la droite Y=X pour les horizons de prévision (+6 h, +12 h, +24 h) indiquant la présence d'une bonne corrélation entre les données observées et celles calculées surtout pour les valeurs élevées de débits. Cependant, l'évaluation de la prévision des crues à T+48h montre une légère sous-estimation des débits observés. Cette sous-estimation reste satisfaisante surtout avec une quasi-coïncidence des hydrogrammes des crues observées et celles calculées et un décalage temporel faible pour la totalité des allures et des pics.

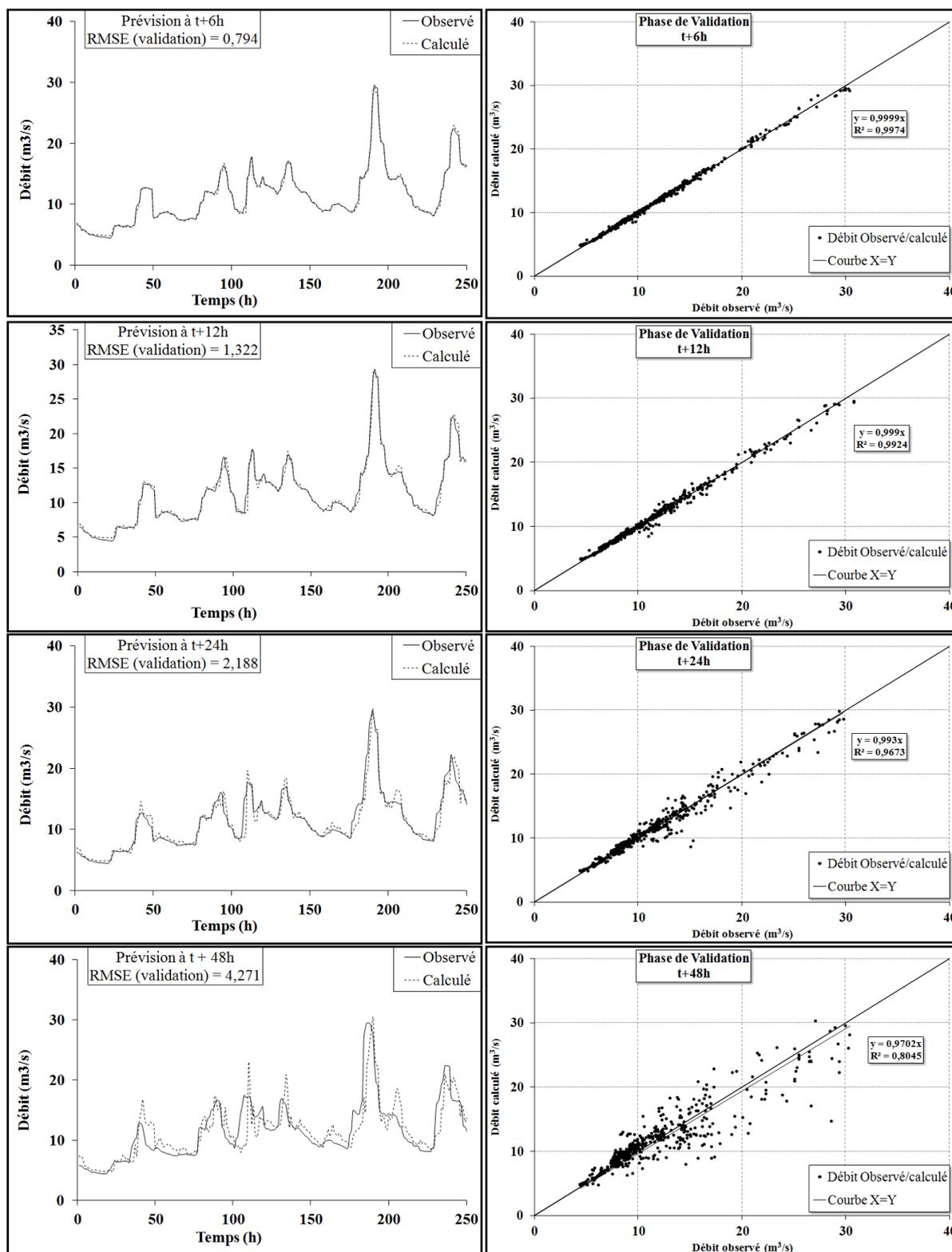


Figure D- 9 Comparaison entre les débits observés et les débits calculés par le modèle RNA (événements entre janvier 2001 de la base de validation -10% aléatoire des données de calage)

Le tableau D-10 illustre le critère de MARE pour les différents niveaux d'alerte pendant les différents horizons de prévision. Globalement, nous remarquons que la quantité d'erreurs, au niveau d'alerte rouge, est inférieure à celle des autres niveaux d'alerte. Cette

quantité d'erreurs montre une amélioration de la qualité de prévision pour les crues extrêmes. Cependant, la prévision des crues à T+48h produit plus d'erreurs pour les niveaux d'alertes jaune et orange. Puis, elle note une amélioration de la modélisation RNA pour le niveau d'alerte rouge avec une MARE (Rouge T+48) = 7,58 %. Cette anomalie provient certainement du manque d'informations disponibles.

	Niveau d'alerte	T+6	T+12	T+18	T+24	T+48
MARE (%)	Vert	2,11	3,1	4,2	5	8,47
	Jaune	1,52	2,45	3,89	6,15	16,86
	Orange	1,95	2,57	4,1	4,22	12,24
	Rouge	2,49	2,26	2,73	3,12	7,58

Tableau D- 12 MARE des prévisions RNA entre 3h et 48 h selon les niveaux d'alertes (validation avec 10% aléatoire des données de calage)

2- Comparaison des résultats avec la station Louviers

La comparaison des résultats de la modélisation RNA, au niveau des stations Louviers, Normanville et Muzy, est réalisée à travers le critère de performance MARE des phases de validation (figure D-10). Le critère MARE enregistre une légère différence pour les stations Normanville et Muzy par rapport à celle de Louviers entre T+6h et T+48h. Il affiche une légère augmentation de l'erreur au niveau de la station Muzy surtout pour la prévision à T+48h. Cette légère augmentation reste acceptable et ne met pas en doute la qualité de prévision des crues par les modèles RNA au niveau des différentes stations hydrométriques. Cette augmentation peut être expliquée par la richesse de la base de données de calage de la station Louviers par rapport aux autres stations (Normanville et Muzy). La base de données de calage de la station Louviers contient suffisamment des crues (de types vert, jaune, orange et rouge) et ces crues sont décrites suivant plusieurs scénarios ce qui résulte un apprentissage d'un maximum de cas de crue contrairement aux bases de données des autres stations. En effet, le manque d'évènement extrême dans la base de données de Normanville et la faible quantité de données au niveau de la station Muzy engendre un calage de modèle entaché d'erreurs supplémentaires par rapport au modèle RNA de la station Louviers. Cependant, ces différences restent légères et les modèles RNA des deux stations produisent des prévisions satisfaisantes comme pour le cas de la station Louviers avec de bonnes corrélations jusqu'au T+48h.

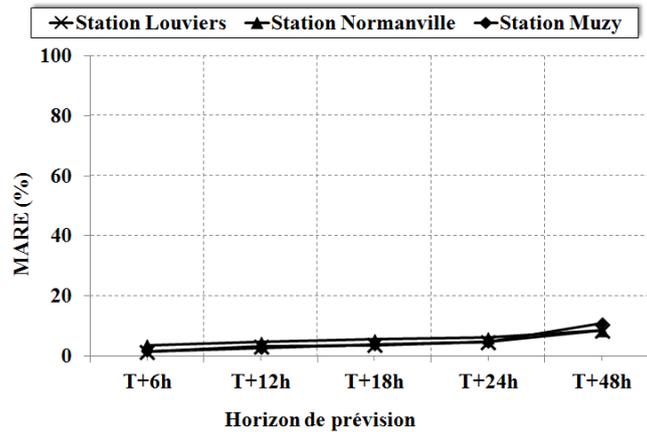


Figure D- 10 Comparaison de la fiabilité des modèles RNA de prévision des crues des stations Louviers, Normanville, Muzy

La comparaison de la modélisation RNA, au niveau d’alertes orange et rouge, montre que la quantité d’erreurs est quasiment la même au niveau des trois stations Louviers, Normanville et Muzy (figure D-11). En effet, les modèles RNA de prévision des crues produisent quasiment les mêmes erreurs entre T+6h et T+24h avec une légère dégradation au niveau de la station Muzy à T+48h. Cette dégradation reste minimale et garde une bonne qualité de prévision. Cette comparaison nous prouve que l’application de la modélisation RNA se caractérise par une stabilité relative en passant d’une station à une autre et garde les mêmes qualités de prévision même pour les débits extrêmes.

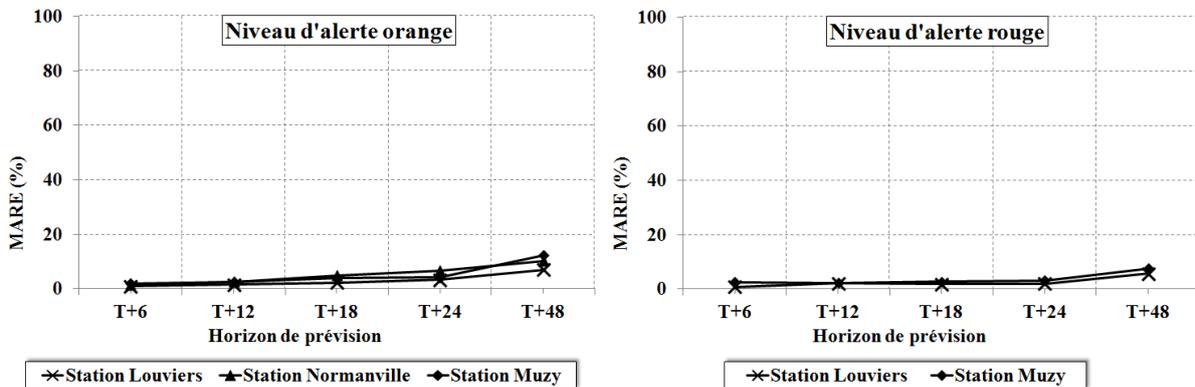


Figure D- 11 Comparaison des prévisions des crues extrêmes

Conclusion du quatrième chapitre

L'application de la méthodologie RNA aux stations Normanville et Muzy a permis de connaître son efficacité vis-à-vis de la prévision des crues au niveau d'autres entités hydrologiques. En effet, cette application a permis des prévisions fiables des débits futurs en gardant quasiment la même qualité de modélisation en passant d'une station à une autre. Cette stabilité de calcul a été enregistrée aussi au niveau des débits extrêmes (de niveau d'alerte orange et rouge). Elle nous assure une application stable et fiable de la méthodologie RNA, proposée dans ce travail, sur les stations de Normanville et de Muzy pour une mission de prévision des crues extrêmes durant les événements hydrologiques. Ces résultats sont très encourageants quant à la probable généralisation de la méthodologie développée à d'autres bassins versants. Nous avons aussi montré que la qualité des prévisions dépend de la qualité de la base de données de calage. Cette dernière doit décrire toutes les alertes et avec le maximum des scénarios possibles afin de caler des poids inter-neuronaux proches de la réalité et qui présentent les interconnexions entre les différents paramètres d'entrée du système hydrologique. Une mise à jour de la base de calage avec de nouvelles données des crues devrait améliorer les résultats de la modélisation RNA et produire des prévisions de plus en plus fiables. Toutefois, nous avons démontré la stabilité des processus calculatoires mis en œuvre, car la dégradation de la qualité des bases d'apprentissage n'entraîne pas, in fine, une dégradation sensible de la prévision.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La prévision des crues est un problème hydrologique ancien et difficile à résoudre. Beaucoup de projets de recherche continuent l'étude de cette question et l'amélioration des réponses scientifiques à cette problématique qui se complique davantage avec les enjeux du changement climatique attendu et l'augmentation de la vulnérabilité des sociétés modernes. De fait, la demande sociale pour une prévision des crues fiable est de plus en plus pressante. C'est dans cette optique que nous avons mené la présente recherche afin de répondre à cette demande, avec une approche prenant en compte les usages des praticiens. Pour cela, nous avons cherché à limiter d'une manière efficace les erreurs de prévisions des débits en développant des modèles opérationnels à base de RNA basés sur des données Hydro-climatologiques gérées en temps réel par le SPC SACN. Ces modèles doivent être fiables, robustes, rapides et simples d'usage pour offrir les meilleurs résultats aux hydrologues dans des contextes d'exploitation différents. Notre domaine d'expérimentation est la prévision des crues au niveau des trois stations hydrométriques de Louviers sur l'Eure, de Normanville sur l'Iton et de Muzy sur l'Avre. Ces prévisions se font en fonction des données pluviométriques mesurées en temps réel pour un horizon de prévisions de 48 heures.

Pour atteindre cet objectif, une description du cadre physique des bassins versants de l'Eure, de l'Iton et de l'Avre a été menée afin d'identifier les différents paramètres influençant leurs fonctionnements hydrologiques. Cette description a permis l'identification d'une complexité résultante de l'intervention directe ou indirecte des paramètres physiques (topographiques, climatologiques et géologiques) dans le déroulement du phénomène hydrologique des trois bassins versants. La topographie semblable, au niveau de ces trois entités géographiques, ne cache pas la variabilité de l'écoulement entre les trois rivières (Eure, Iton et Avre). En effet, l'interrelation des différents paramètres physiques engendre une variabilité hydrologique en passant d'un bassin versant à un autre. Cette interrelation a pour résultat un fonctionnement hydrologique non stable dépendant essentiellement des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques peu identifiables (comme les réseaux karstiques). Cette non-stabilité du fonctionnement hydrologique rend difficile l'exercice de prévision.

Dans la deuxième partie, une analyse statistique des données pluviométriques, débitmétriques et piézométriques permet une étude de la variabilité temporelle et spatiale de

l'hydrologie des bassins d'étude. Cette analyse a prouvé que leurs fonctionnements hydrologiques dépendent fortement de la variation hydrogéologique annuelle et saisonnière. En effet, la nappe sous-jacente joue le rôle d'intermédiaire entre les pluies et les écoulements. Suite à des phénomènes d'infiltrations importantes dans les plateaux et jusqu'à obtention de la saturation, elle provoque et soutient l'augmentation des débits dans les cours d'eau.

Une analyse fréquentielle des maxima annuels a été réalisée pour quantifier le risque d'inondation et connaître sa tendance future. Elle permet aussi une classification des différents événements dans la base de données hydrométrique afin d'identifier la richesse des différentes bases potentielles de données de calage des modèles de prévisions des crues. Cette analyse fréquentielle a permis d'ajuster les périodes de retour des crues sur les trois stations hydrométriques Louviers, Normanville et Muzy suivant la loi statistique de Gumbel.

L'analyse statistique des données est une étape préliminaire à la modélisation hydrologique par RNA. Elle offre un apport d'informations spécifiques concernant le fonctionnement hydrologique au sein des trois bassins d'études. Cet apport nous amène vers des bases de données de calage des modèles RNA de prévision des crues qui contiennent la plupart des informations sur les relations pluie-débit non linéaires au sein des différentes entités hydrologiques. La construction de ces bases est une étape de grande importance vers une modélisation fiable des crues par les RNA.

L'utilisation des techniques des réseaux neurones artificiels (RNA) dans le domaine de la prévision a permis de dépasser les limites physiques du système hydrologique. En effet, l'application de cette technique à des données pluie-débit du bassin versant de l'Eure (station de Louviers) a dessiné un modèle RNA de prévision des crues fiable dont la conception comporte plusieurs étapes. Tout d'abord, il faut définir l'architecture optimale du RNA, une architecture englobant le nombre de neurones dans chaque couche et leurs fonctions d'activations. Puis, il est nécessaire de sélectionner les neurones d'entrées (étape très sensible). La sélection des neurones d'entrée a été effectuée selon la méthode des corrélations croisées. En effet, l'application de la corrélation croisée sur le début de la montée de la crue la plus importante de la base de données, où nous avons une variation nette après une stabilité hydrologique, nous permet de produire des résultats plus performants que ceux produits à travers une application classique de la corrélation croisée (application sur toute la base de données). Nous obtenons au final un modèle RNA capable d'effectuer des prévisions satisfaisantes des débits futurs jusqu'à un horizon de prévision de 48h. Cette modélisation a

été évaluée selon les quatre niveaux d'alertes (vert, jaune, orange et rouge). Elle a prouvé que les prévisions sont plus satisfaisantes pour les niveaux d'alertes orange et rouge que pour les niveaux d'alertes vert et jaune. Cependant, cette performance décline lorsque l'horizon de prévision augmente et ceci est valable pour tous les niveaux d'alertes.

Les modèles RNA produits de prévision de crues pour la station de Louviers ont été appliqués sur une base de données extérieure à celle utilisée pour le calage décrivant les événements d'alerte jaune de décembre 1999 et d'alerte orange de janvier 2000. Il a gardé quasiment la même quantité d'erreurs produite donc les mêmes satisfactions pour les prévisions. Par contre, le modèle RNA présente une limite de modélisation marquante. En effet, les modèles produits n'arrivent pas à prévoir les débits qui dépassent l'intervalle d'apprentissage. Autrement dit, les modèles n'arrivent pas à prévoir les débits supérieurs à la valeur maximale d'apprentissage ($142 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Louviers). En revanche, ils gardent le pouvoir de modéliser correctement les montées des crues. Donc si la base de calage contient les débits qui décrivent tous les différents niveaux d'alertes, les modèles RNA ainsi créés garantissent la sûreté des alertes qui est l'objectif principal du SPC SACN.

La méthodologie RNA a montré une capacité marquante de prévoir les débits au niveau de la station Louviers ainsi que sur les deux autres stations hydrométriques étudiées (Normanville et Muzy). Elle a produit des résultats remarquables au niveau des stations Normanville et Muzy. Elle perd de sa qualité de modélisation en augmentant le temps de prévision, mais reste satisfaisante jusqu'à T+48h. La comparaison de ces résultats avec ceux de la station de Louviers a montré que la méthodologie RNA, proposée dans cette recherche, garantit une stabilité de résultats et garde la même performance spécialement pour les débits de niveau d'alerte orange et rouge.

La méthodologie RNA appliquée dans ce travail produit des modèles qui pourront être utilisés dans les domaines de prévisions des crues afin d'alerter contre les inondations et de protéger les personnes et les biens. À priori, elle est généralisable à une application sur d'autres bassins versants. Cela demande d'être testé et conforté afin de définir le réel domaine de validité de la méthode. En effet, les bassins versants étudiés étaient peu artificialisés et nous pouvons nous poser la question du portage de la méthode pour des réseaux hydrologiques fortement modifiés (par exemple avec des rivières canalisées du Nord de la France).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abrahart R. J., See L. et Kneale P. E. (1999). Using pruning algorithms and genetic algorithms to optimize network architectures and forecasting inputs in a neural network rainfall-runoff model. *Journal of hydroinformatics*, 01.2. 103-114.
- Afchain C., Labesse B., Pomerol C., Rampon G., Renard M., Fédoroff N., Rampon G., Bournérias M., Jovet P., Cavelier C., Perreau M., Le Calvez Y. et Pomerol C. (1975) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Rambouillet (218). Orléans : BRGM, 19 p.
- Aguilera, P.A., Garrido Frenich, A., Torres, J.A., Castro, H., Martinez Vidal, J.L., Canton, M.(2001). Application of the Kohonen neural network in coastal water quality management: Methodological development for the assessment and prediction of water quality. *Water Res.*, 35, pp. 4053-4062.
- Andréassian, V., 2005. Pourquoi les rivières débordent-elles ? "Les Petites Pommes du Savoir". Editions Le Pommier, 63 p.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology (2000b). Artificial neural networks in hydrology, II: hydrologie applications. / *Hydrol. Engng ASCE* 5 (2), 124-137.
- Assemblée-Nationale, 2001. Rapport sur les causes des inondations répétitives ou exceptionnelles et sur les conséquences des intempéries. Rapport n°3386, Commission d'enquête, Paris.
- Beltrando G., 2011. Les climats : processus, variabilité et risques. Armand Colin, Coll. U, 270p. (2e édition), 286p.
- Berthet, L. (2010). Préviation des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de doctorat. L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech. 603 p.
- Bobée B. et Ashkar F. (1991). The gamma family and derived distributions applied in hydrology. Water Ressource Publications, Colorado, USA, 205p.
- Boucher M. A., Laliberte J. P., and Anctil F. (2010). An experiment on the evolution of an ensemble of neural networks for streamflow forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 603–612.
- Bowden, G.J., Dandy, G.C., Maier, H.R., (2005). Input determination for neural network models in water ressources applications part 1 – background and Methodology. *Journal of Hydrology* 301, 75–92.

- Brunet R. et Auriac F. avec la coordination scientifique de Wieber J.-C., (1995). Atlas de France, milieux et ressources. Reclus 1995, Montpellier. 144 p.
- Chang F. J., Chiang Y. M. & Chang L. C. (2007). Multi-step-ahead neural networks for flood forecasting. *Hydrological Sciences Journal*, 52:1, 114-130
- Changjun, Z., Qin, J. (2009) United grey system-neural network model and its application in prediction of groundwater level. *International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, ICIMA 2009*, art. no. 5156656, pp. 434-437.
- Chiang Y. M., Chang L. C. et Chang F. J. (2004). Comparaison of static-feedforward and dynamic-feedback neural networks for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology* 290 (2004), 297-311.
- Chokmani K., Ouarda T. B. M. J., Hamilton S., Ghedira M. H. & Gingras H. (2008). Comparaison of ice-affected streamflow estimates computed using artificial neural networks and multiple regression techniques. *Journal of Hydrology* 349, 383-396.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Bobée, B., (2000). Coulibaly, P., Anctil, F. & Bobée, B. (2000). Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach, *J. of Hydrology* 230, 244-257.
- David P-Y. (2009)-Inventaire régional Haute-Normandie des bétouilles, itinéraires souterrains des eaux (traçages) et des exutoires- Rapport final Année 1. Rap. BRGM/RP-57188-FR, 130 p. 71 ill., 3 ann.
- Dawson C. W., Abrahart R. J., Shamseldin A. Y, Wilby Y. R. and See L. M. (2005). Neural network modeling of the 20-year flood Event for 850 catchments across the UK. *Proceedings of international joint conferences on neural networks, Montréal, Canada, july 31-august 4*. 2637-2641.
- Dewolf Y., Helluin M., Lautridou J.-P. Vazart M. (1981). Les lœss d'iville (Eure), faciès régional de transition entre deux provinces lœssiques majeures du bassin de Paris. *Bull. l'AFEQ*, vol. 3-4, pp. 159-172.
- Dewolf Y., Mathieu C. et Callot G. (1983). Les argiles à silex du bassin de Paris. Nouvelle mise au point. *Bull. Soc. Géol. Fr. Paris*, T. XXV, n°1, pp. 25-29.
- Ducharne, A., Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E. et Déqué, M, (2003). Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]*, Volume 4 Numéro 3 | décembre 2003, mis en ligne le 15 décembre 2003. URL : <http://vertigo.revues.org/3845> ;
- Elshorbagy A., Simonovic S.P. & Panu U.S., (2000). Performance evaluation of artificial neural networks for runoff prediction. *ASCE Journal of hydrologic Engineering* 5 (4), 242-427.

- Equilbey E., Normand M., Schomburgk S. (2004) – Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure. Volet bilan quantitatif de l'aquifère de la craie. Rap. BRGM/RP-52988-FR, 148 p., 44 fig., 17 tabl., 3 ann.
- Eslamian S., Lavaei N. (2009). Modelling nitrate pollution of groundwater using artificial neural network and genetic algorithm in an arid zone. *International Journal of Water*, 5 (2), pp. 194-203.
- Estain Abessolo O. (2010). Analyse fréquentielle appliqué au dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales. Thèse de doctorat. L'Université Lille1. 226 p.
- Ferrey E. (1894) – Les rivières du département de l'Eure qui disparaissent, leurs cours souterrains, leurs points de réapparition. AFAS, 23e session, Caen, séance du 13 aout 1894, 2e partie, éditée en 1895 in R, Farm (édit), L'Eure souterraine T.3, Evreux 1984, pp 17-43.
- Fourmigué P. et Lavabre J. (2005). Prévission de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. Adaptabilité aux incertitudes sur la pluie. *Rev. Sci. Eau* 18 (1) : 87-102.
- Funahashi K. (1989). On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks* 2, 183-214.
- Gigot C, avec la collaboration de Scanvic J.Y., Monciardini C, Maget P., Vinchon C. (1990) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Courville-sur-Eure (254) — Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 35 p. Carte géologique par GIGOT C. (1990).
- Hani A., Lallahem S., Mania J. et Djabri L. (2006). On the use of finite-difference and neural-network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol. Process.* 20, 4381-4390 (2006).
- Haykin S. (1994). *Neural Networks, A comprehensive foundation*. Macmillan College Publishing Company, Inc. USA. 696 p.
- Haykin S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, N.J., 2nd edition, 842p.
- Hecht-Nielsen, R., (1990). *Neuro-computing*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. Solution for a distributed hydrological model and applications, pp. 89-93.
- Hornik K., Stinchcombe M. & White H. (1989). Multiplayer feedforward neural networks are universal approximators. *Neural Networks* 2, 359-366.
- Hreiche A. (2003). Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen. Thèse Université Montpellier II et Université Saint-Joseph. 257p.

- Hsu, K.L, Gupta, H. V. & Sorooshian, S. (1997). Application of a recurrent neural network to rainfall-runoff modeling. Proc., Aesthetics in the constructed Envir., ASCE, New York, 68-73.
- Hsu, K.L., Gupta, H.V. & Sorooshian, S. (1995). Artificial neural network modelling of the rainfallrunoff process. Water Ressour. Res. 31 (10), 2517-2530.
- Immediato H. (2010). Cours de statistique 2e partie. Université de Lyon1. 57p.
- Institute of Hydrology (1980). Low Flow studies. Institute of Hydrology, Wallingford; Oxon, Ox10 8BB. In four volumes.
- Jafar R., Shahrour I. & Juran I. (2010). Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains. Mathematical and computer modeling. Volume: 51 Issue: 9-10 Pages: 1170-1180.
- JORF (2003). La prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages, loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003.
- JORF (2004). Modernisation de la sécurité civile, loi n° 2004-811 du 13 août 2004.
- JORF (2005). Les schémas directeurs de prévision des crues et aux règlements de surveillance et de prévision des crues et à la transmission de l'information correspondante, arrêté du 15 février 2005.
- Khorchani M., Blanpain O. (2005). Development of a discharge equation for side weirs using artificial neural networks. Journal of Hydroinformatics, Ed. International Water Association, Vol. 7, n°1, 31-39.
- Kitanidis P. K. & Bras, R. L. (1980). Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model. 2. Application and results. Water Resources Research, 16(6), 1034-1044.
- Kuntz G. avec la collaboration de : Dewolf Y., Frileux P.-N., Monciardini C., De La Quérière Ph., Verron G. (1982) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Breteuil-sur-Iton (179). Orléans : BRGM, 38 p.
- Kuntz G. avec la participation de Dewolf Y., Wyns R., De La Quérière Ph., Lavergne D., Bock Ch., Verron G. (1977) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Saint-André-de l'Eure (180). Orléans : BRGM, 45 p.
- Kurup U., Dudani P. & Nitin K. (2002). Neural networks for profiling stress history of clays from PCPT data. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Juillet 2002, V.128, n°7, 569-579.
- Laignel B. (1997) – Les altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris : caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Thèse de doctorat de l'université de Rouen, Département de géologie, 224 p.

- Lallahem S. & Mania J. (2003). Anonlinear Rainfall-Runoff Model using Neural Network Technique: Exemple in Fractured Porous Media. *Mathematical and Computer Modelling* 37. 1047-1061.
- Lallahem S. (2003). Structure et modélisation hydrodynamique des deux eaux souterraines : application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. *Société Géologique du Nord. Publication n° 32*, 217 p.
- Lebret P., Ménillet F., Béguin P., Charnet F., Fauconnier D., Gardin S., Koeniguer J.C., Monciardini C. (1996) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Verneuil (215). Orléans : BRGM, 82 p. Carte géologique par P. Lebret et al. (1996).
- Lippmann R. P. (1987). An introduction to computing with neural nets. *IEEE Acoustics, Speech and Signal Processing Magazine*, no 3, 1987, p. 4-22.
- Liu J., Savenije H.H.G., Xu J. (2003). Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Physics and Chemistry of the Earth* 28, 219-224.
- Loganathan G. V., Mattejat P., Kuo C. Y. et Diskin M. H. (1986). Frequency analysis of low flows: Hypothetical distribution methods and a physically based approach. *Nordic hydrology*, 17, pp 126-150.
- Luck K. C., Ball J. E. & Sharma A. (2001). An application of Artificial Neural Networks for rainfall forecasting. *Mathematical and computer modelling*, 33, 683-693.
- Maier H.R., Dandy G.C. (2001). Neural network based modelling of environmental variables: a systematic approach. *Mathematical and Computer Modelling* 33, 669–682.
- Maier, H. R., and Dandy, G. C. (1996). “The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters.” *Water Resour. Res.*, 32(4), 1013–1022.
- Marchandise, A. (2007). Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse de doctorat. Université Montpellier II. 214 p.
- Masson E., Les conséquences des crues dans le bassin versant de l'Eure : le risque inondation dans un hydrosystème anthropisé, thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2002, 2 vol., 447 et 246 p.
- Matheron G. (1978). Estimer et choisir. Essai sur la pratique des probabilités, cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, 7, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, ENSSMP, Fontainebleau, 175p.
- Mégnién C. (1976). Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. Thèse d'état de l'Université de Paris VI, 2 vol. 607p.

- Ménillet F. avec la collaboration des différents services du B.R.G.M. Orléans et de Crahet M. (1971) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Nogent-le-Roi (217). Orléans : BRGM, 33p.
- Ménillet F. avec la collaboration des différents services du B.R.G.M. Orléans et de R.VERMEIRE. (1971) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Chartres (255) — Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 35 p. Carte géologique par F. Ménillet (1971).
- Menillet F., avec la collaboration de Duguey E., Frobert L., Havlicek P., Isambert M., Monciardini C, Maget P., Pierret A. (1994) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Dreux (216). Orléans : BRGM, 67 p. Carte géologique par F. Menillet et al. (1994).
- Ménillet F., Lebret P., Béguin P., Charnet F., Hérard B., Lemoine B., Perron C. (1998) – Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille L’Aigle (214). Orléans : BRGM, 114 p. Carte géologique par F. Ménillet et al. (1998).
- Metzger P. et D'Ercole R. (2011). Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion. EchoGéo [En ligne], 18 | 2011, mis en ligne le 06 décembre 2011, consulté le 13 mars 2013. URL : <http://echogeo.revues.org/12640> ; DOI : 10.4000/echogeo.12640
- Meylan P., Favre A-C et Musy A. (2008) : Hydrologie fréquentielle Une science prédictive.PPUR - Collection : Science et ingénierie de l'environnement, 184 p.
- Moguedet G., avec la collaboration de Charnet F., Gresselin F., Lemoine B. (1998) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Mortagne-au- Perche (252). Orléans : BRGM, 87 p. Carte géologique par G. Moguedet et al. (1998).
- Moguedet G., Marchand Y., Masson V., Papin H., Vauthuer S., Charnet F., Le Moine B. (2000) – Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille La Loupe (253). Orléans : BRGM, 102 p. Carte géologique par Moguedet G., Marchand Y., Masson V., Papin H., Vauthier S. (2000).
- Musy A. & Laglaine V. (1992). Hydrologie générale. Cours polycopié, section génie rural, environnement, mensuration, EPFL, Lausanne.
- Musy A. (2003). Cours hydrologie générale. Laboratoire d’Hydrologie et Aménagement (HYDRAM), Institut des sciences et Technologies de l’environnement (ISTE), Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL).
- Najjar Y., Basheer I. & Hajmeer M. (1997). Computational Neural Network for predictive microbiology : Methodology. International Journal of food microbiology volume 34, 27-49.

- Najjar, Y. and Zhang, X. (2000). Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors), 43-57.
- Nash J. E., Sutcliffe J. V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models. Part I. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, vol 10, 282-290.
- National Hydrologic Warning Council (2002). Use and benefits of the National Weather Service River and Flood Forecasts. Rapport technique, EASPE, Inc.
- Pagney P. (1988). *Climats et cours d'eau de France*. Masson, Paris, 248 p.
- Pang B., Guo S., Xiong L. et Li C. (2006). A nonlinear perturbation model based on artificial neural network. *Journal of hydrology* (2007) 333, 504-516.
- Piechowiak S. (2004). Intelligence Artificielle et diagnostic. In *Techniques De L'ingénieur* (Ed.), Collection des Techniques de l'Ingénieur, Techniques de l'Ingénieur, Paris, 1-20.
- Polarski M. (2008). Fitting distributions to annual minimum flows of different durations. *Friends in Hydrology*, vol. 187, IAHS Publication. pp 97-104.
- Pomerol B. et Ch., Renard M., Wyns R., Lavergne M., Monciardini C., Le Calvez Y., Andrieu S., Blanc Ph., De La Quérière Ph., Pascaud P., Pomerol Ch. (1977) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Evreux (150). Orléans : BRGM, 20 p.
- Querriere D. L. P. (1999) - Aquifère crayeux de Haute-Normandie, version provisoire, 4p.
- Quesnel F. (1997). Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Thèse de doctorat de l'université de Rouen. 255p.
- Rajurkar M. P., Kothiyari U. C. and Chaube U. C. (2002). Artificial neural networks for daily rainfall-runoff modeling/ Modélisation pluie-débit journalière à base de réseau de neurones artificiel. *Hydrological sciences Journal*, 47 :6, 865-877.
- Rapport « eaufrance » (2011). Évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI), bassin Seine-Normandie-Annexes. 166 p.
- Rapport de diagnostic Egis-eau (2009). Étude d'aménagement et de gestion durable de la Seine aval entre le barrage de Poses et le pont de Tancarville, 261 p.
- Reed R.D. & Marks R.J. (1998). *Neural Smithing. Supervised learning in feedforward Neural Networks*. A Bradford Book MIT Press, 346p.
- Riad S. (2003). Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse de doctorat. Université des sciences et de technologies de Lille, 154p.

- Rodet J. (1992). La craie et ses karsts. Centre Normand d'étude du karst et des cavités du sous-sol et Groupe Seine. Conseil Général de l'Eure, 560 p.
- Roux C. (1996). Analyse des précipitations en hydrologie urbaine exemple Seine Saint Denis. Thèse de doctorat de Ecole des Ponts ParisTech – Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts. 291 p.
- Rumelhart D. E., Hinton G. E. & Williams R. J. (1986). Learning internal representations by error propagation. *Parallel distributed processing*, vol. 1, MIT Press, Cambridge, Mass., 318-362.
- Shamseldin, A.Y., (1997). Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology (Amsterdam)*, 199, 272-294.
- Siou L. K. (2011). Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). Thèse de doctorat. Université de Montpellier II. 230 p.
- Siou L. K. A., Johannet A., Borrell V., Pistre S. (2011). Complexity selection of a neural network model for karst flood forecasting: The case of the Lez basin (southern France). *J. Hydrol.* 403, 367–380.
- Sivakumar B., Jayawardena A. W. and Fernando T. M. K. G., (2002). River flow forecasting : use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches, *Journal of Hydrology*, Volume 265, Issues 1-4, 30 August, pp. 225-245.
- Smith J. and Eli R. (1995). Neural-Network Models of Rainfall-Runoff Process. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 121(6), 499–508.
- Statsoft (2007). STATISTICA electronic manual.
- Sudheer K. P., Gosain A. K. & Ramasastri K. S. (2002). A data-driven algorithm for constructing artificial neural network rainfall-runoff models. *Hydrol. Process.* 16, 1325 - 1330.
- Sudheer K.P., Gosain A.K., Ramasastri K.S. (2002). A data-driven algorithm for constructing artificial neural network rainfall–runoff models. *Hydrological Processes* 16, 1325–1330.
- TANGUY J-M., CARRIERE J-M., LE TRIONNAIRE Y., SCHOEN R.(2005) Réorganisation de l'annonce des crues en France, *La Houille Blanche*, n° 2, mars-avril 2005, p. 44-48.
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H. et de Roo, A. (2009). The European Flood Alert System - Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2):125-140.
- Thiria S., Lechevallier Y., Gascuel O. & Canu S. (1997). *Statistique et méthodes neuronales*. Paris. 311p.

- Thomas A. et Dupont J. P. (1995). Les bétouilles en Hautes-Normandie. 120ème congr. Nat. Soc. Hist. Scient., Aix-en Provence, sect. Géogr., pp 131-143.
- Tokar A. and Johnson P. (1999). Rainfall-Runoff Modeling Using Artificial Neural Networks. *J. Hydrol. Eng.*, 4(3), 232–239.
- Toukourou S. M. (2010) Prédiction des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de doctorat. École nationale supérieure des mines de Paris. 182 p.
- Touzet C. (1992). Les réseaux de neurones artificiels : introduction au connexionnisme. Préface de Jeanny Hérault, EC2 éd., Paris, 150 p.
- Uvo, C.B., Tölle, U. and Berndtsson, R., (2000). Forecasting discharge in Amazonia using neural networks. *Int. J. Climatol.* 20, pp. 1495-1507.
- Vinet F. (2007). Approches nationales de la prévention des risques et besoins locaux : le cas de la prévision et de l'alerte aux crues dans le Midi méditerranéen, *Géocarrefour*, vol. 82/1-2, 2007, p. 35-42.
- Wang J., Liu W., Qian J., Sun S. (2002). Grey Model of Groundwater Quality Assessment Based on Single Factor Contaminant Index. *Journal of Hefei University of Technology*, 25 (5), pp. 697-702.
- World Meteorological Organisation (WMO) (1975). Inter-comparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting, World meteorological Organisation, Technical report N° 429, Geneva, Switzerland.
- Zaier I., Shu C., Ouarda T.B.M.J., Seidou O. & Chebbana F. (2010). Computational Neural Network for predictive microbiology : Methodology. *Journal of Hydrology* Volume 383, 330-340.
- Zaniolo C. (2008). Notice descriptive du bassin versant de l'Avre. Rouen-Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. 42 p
- Zaniolo C. (2008). Notice descriptive du bassin versant de l'Eure. Rouen-Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. 42 p
- Zhang Q. & Stanley S.J. (1997). Forecasting raw-water quality parameters for the North Saskatchewan River by neural network modelling. *Water Resources Research*, 31 (9), 2340-2350.
- Zhang Z. (2002). Application of Artificial Neural Network in the prediction of Variation of Groundwater. *Journal of Liaoning Technical University*, 21 (4), pp. 504-506.
- Zuo J. (2008). Estimation of nitrogen removal effect in groundwater using artificial neural network. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries *Lecture Notes in*

Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 5264 LNCS (PART 2), pp. 276-283.

www.vigicrue.gouv.fr

<http://france.meteofrance.com/vigilance/Accueil>

<http://infoterre.brgm.fr/>

www.adeseaufrance.fr/

www.prim.net

www.recensement.insee.fr

GLOSSAIRE

Aléa

L'aléa, ou évènement ou processus, doit être défini par une intensité (pourquoi et comment ?), une occurrence spatiale (où ?) et temporelle (quand ?, durée ?). L'intensité traduit l'importance d'un phénomène (Dauphiné, 2001). Elle peut être mesurée (hauteur d'eau pour une inondation, magnitude d'un séisme) ou estimée (durée de submersion, vitesse de déplacement). La probabilité d'occurrence spatiale est conditionnée par des facteurs de prédisposition ou de susceptibilité (géologique par exemple). L'extension spatiale de l'aléa est plus difficile à estimer (avalanche ou mouvement de terrain par exemple). La probabilité d'occurrence temporelle dépend de facteurs déclenchant naturels ou anthropiques. Elle peut être estimée qualitativement (négligeable, faible, forte) ou quantitativement (période de retour de 10 ans, 30 ans, 100 ans). La durée du phénomène doit être également prise en compte (durée considérée pour les précipitations pluvieuses). Il est souvent nécessaire de dresser un tableau à double entrée pour caractériser l'aléa (intensité, durée).

Apprentissage

L'apprentissage est un terme qui désigne le calage d'un réseau de connexion pour les réseaux de neurones artificiels.

Calage

Processus d'estimation des valeurs des connexions entre les paramètres par confrontation du modèle par des données de système étudié.

Enjeu

Les enjeux et la vulnérabilité sont la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité à surmonter la crise provoquée par l'aléa (Dauphiné, 2001). Dans ce contexte, il est important de caractériser la résistance (sa capacité à résister face à un évènement non souhaité) et la résilience (sa capacité à récupérer un fonctionnement normal suite aux conséquences d'un évènement non souhaité) du système. La résilience mesure la capacité du système à absorber le changement et à persister au-delà d'une perturbation (une catastrophe par exemple). La vulnérabilité d'un système sera d'autant plus faible que sa résilience sera grande.

Évapotranspiration

L'évapotranspiration est l'émission de la vapeur d'eau (exprimée en mm), résulte de deux phénomènes : l'évaporation, qui est un phénomène purement physique, et la transpiration des plantes. La recharge des nappes phréatiques par les précipitations tombant en période d'activité du couvert végétal peut être limitée. En effet, la majorité de l'eau est évapotranspirée par la végétation. Elle englobe la perte en eau due au climat, les pertes provenant de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes.

Fiabilité (modèle de prévision)

La fiabilité caractérise la pertinence des intervalles de confiance (spécifiés dans le cahier de charge du projet) calculés sur l'ensemble des prévisions.

Horizon de prévision

Durée H séparant l'instant t auquel la prévision est émise du pas de temps t+H pour lequel cette prévision est donnée.

Karst

Selon Bakalowicz (2003), le mot Karst est le nom allemand de la région des plateaux calcaires à l'est de Trieste, en Slovénie. Le karst est toujours défini, à tort, uniquement comme un type particulier de morphologie. Or le paysage du karst résulte des écoulements souterrains particuliers qui se mettent en place progressivement dans les roches carbonatées (calcaires et dolomies) et dans les roches salines (gypse et parfois sel gemme). Le karst est donc également un aquifère puisque l'eau souterraine est totalement impliquée dans sa formation et dans son fonctionnement.

Dans ces roches, la dissolution et l'écoulement souterrain créent des conduits parfois pénétrables par l'homme; ces conduits sont organisés en réseau hiérarchisé de l'amont (les points d'infiltration d'eau dans la roche) vers l'aval (la source). En dehors du réseau karstique, les vides dans la roche sont constitués par des cavités et par les discontinuités de la roche (fissures, fractures et plans de stratification plus ou moins élargis par la dissolution) ; tous ces vides sont mal connectés hydrauliquement aux conduits. Cette organisation (= réseau karstique ou réseau de drainage) se fait à la manière de celle des fleuves et des rivières, en fonction de la pente générale et de la résistance opposée par la roche (perméabilité) ; elle peut être plus ou moins linéaire et simple, ou très complexe.

Risque

Le risque est un rapport des aléas aux enjeux dans un milieu géographique. Son étude passe donc par l'étude de l'aléa, probabilité d'occurrence et d'intensité d'un phénomène dommageable, et de l'enjeu, estimation des pertes potentielles d'un territoire. Cette question de « ce que nous pouvons perdre » est obligatoire dans une étude de risque sinon il n'y a pas de risque (Metzger, 2011).

Vulnérabilité

La vulnérabilité désigne la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité à surmonter la crise provoquée par l'aléa (Dauphiné, 2001) . Dans ce contexte, il est important de caractériser la résistance (sa capacité à résister face à un évènement non souhaité) et la résilience (sa capacité à récupérer un fonctionnement normal suite aux conséquences d'un évènement non souhaité) du système. La résilience mesure la capacité du système à absorber le changement et à persister au-delà d'une perturbation (une catastrophe par exemple). La vulnérabilité d'un système sera d'autant plus faible que sa résilience sera grande.

ANNEXES

**ANNEXE 1 : CRITÈRES DE PERFORMANCES
OBTENUS DES PHASES DE CALAGES POUR LES
TROIS BASSINS VERSANT ÉTUDIÉS**

Tableau Critère de performances de calage du modèle de prévision des crues : Station Louviers, bassin versant de l'Eure.

Horizon de prévision	Apprentissage				Test				Validation			
	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP
T+6h	0,527	1,269	0,999	0,927	0,583	1,307	0,999	0,969	0,546	1,297	0,999	0,991
T+12h	1,336	3,047	0,997	0,850	1,384	3,065	0,996	0,979	1,322	3,019	0,997	0,993
T+18h	1,689	3,724	0,994	0,878	1,763	3,852	0,994	0,981	1,659	3,590	0,995	0,993
T+24h	2,047	4,476	0,992	0,889	2,236	4,730	0,991	0,979	2,188	4,556	0,991	0,990
T+48h	3,924	8,160	0,970	0,866	4,338	8,567	0,964	0,959	4,271	8,344	0,966	0,973

Tableau Critère de performances de calage du modèle de prévision des crues : Station Normanville, bassin versant de l'Iton.

Horizon de prévision	Apprentissage				Test				Validation			
	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP
T+6h	0,267	3,463	0,989	0,419	0,252	3,331	0,990	0,872	0,279	3,589	0,989	0,929
T+12h	0,360	4,588	0,981	0,492	0,336	4,410	0,983	0,888	0,343	4,513	0,983	0,946
T+18h	0,439	5,432	0,971	0,518	0,408	5,309	0,974	0,894	0,437	5,412	0,971	0,939
T+24h	0,517	6,185	0,960	0,517	0,498	6,025	0,962	0,882	0,501	6,097	0,962	0,929
T+48h	0,786	8,661	0,909	0,478	0,747	8,406	0,914	0,838	0,730	8,390	0,918	0,887

Tableau Critère de performances de calage du modèle de prévision des crues : Station Muzy, bassin versant de l'Avre.

Horizon de prévision	Apprentissage				Test				Validation			
	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP	RMSE	MARE	NASH	CP
T+6h	0,246	1,422	0,998	0,892	0,262	1,501	0,997	0,987	0,252	1,507	0,997	0,995
T+12h	0,377	2,245	0,995	0,931	0,445	2,502	0,992	0,985	0,433	2,481	0,993	0,994
T+18h	0,575	3,252	0,988	0,920	0,702	3,739	0,981	0,977	0,689	3,615	0,981	0,988
T+24h	0,808	4,317	0,976	0,900	0,970	4,950	0,965	0,968	0,887	4,609	0,969	0,980
T+48h	2,015	10,154	0,851	0,748	2,239	10,870	0,817	0,879	2,083	10,857	0,836	0,914

ANNEXE 2 :

**COMPARAISON ENTRE LES PARAMÈTRES
STATISTIQUES DES DONNÉES OBSERVÉES ET
CELLES SIMULÉES DES TROIS BASSINS
D'ÉTUDES.**

Bassin versant de l'Eure : Station Louviers

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,12	36,13
Écart type	22,67	22,62
3* Écart type	68,00	67,87
Minimum	7,18	8,82
Maximum	142,00	139,61
Coefficient de variation	0,63	0,63

Paramètre statistique (phase de test T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,07	36,08
Écart type	22,99	22,92
3* Écart type	68,97	68,76
Minimum	7,18	8,82
Maximum	142,00	139,26
Coefficient de variation	0,64	0,64

Paramètre statistique (phase de validation T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	37,11	37,10
Écart type	23,25	23,23
3* Écart type	69,76	69,70
Minimum	7,18	8,59
Maximum	142,00	139,19
Coefficient de variation	0,63	0,63

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,12	36,16
Écart type	22,68	22,64
3* Écart type	68,03	67,92
Minimum	7,18	9,05
Maximum	142,00	138,95
Coefficient de variation	0,63	0,63

paramètre statistique (phase de test T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,07	36,12
Écart type	22,99	22,87
3* Écart type	68,97	68,62
Minimum	7,18	9,05
Maximum	142,00	138,83
Coefficient de variation	0,64	0,63

paramètre statistique (phase de validation T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	37,11	37,11
Écart type	23,25	23,13
3* Écart type	69,76	69,39
Minimum	7,18	8,98
Maximum	142,00	137,12
Coefficient de variation	0,63	0,62

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,12	36,14
Écart type	22,67	22,55
3* Écart type	68,00	67,65
Minimum	7,18	8,99
Maximum	142,00	138,77
Coefficient de variation	0,63	0,62

paramètre statistique (phase de test T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,07	36,08
Écart type	22,99	22,77
3* Écart type	68,97	68,32
Minimum	7,18	8,99
Maximum	142,00	138,29
Coefficient de variation	0,64	0,63

paramètre statistique (phase de validation T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	37,11	37,09
Écart type	23,25	23,20
3* Écart type	69,76	69,60
Minimum	7,18	8,42
Maximum	142,00	140,35
Coefficient de variation	0,63	0,63

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,12	36,14
Écart type	22,67	22,53
3* Écart type	68,00	67,60
Minimum	7,18	8,68
Maximum	142,00	139,91
Coefficient de variation	0,63	0,62

paramètre statistique (phase de test T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,07	36,09
Écart type	22,99	22,80
3* Écart type	68,97	68,41
Minimum	7,18	8,68
Maximum	142,00	139,51
Coefficient de variation	0,64	0,63

paramètre statistique (phase de validation T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	37,11	37,16
Écart type	23,25	23,15
3* Écart type	69,76	69,46
Minimum	7,18	8,69
Maximum	142,00	138,35
Coefficient de variation	0,63	0,62

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,12	36,12
Écart type	22,67	22,31
3* Écart type	68,00	66,92
Minimum	7,18	8,56
Maximum	142,00	141,05
Coefficient de variation	0,63	0,62

Paramètre statistique (phase de test T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	36,07	36,15
Écart type	22,99	22,62
3* Écart type	68,97	67,87
Minimum	7,18	8,56
Maximum	142,00	140,99
Coefficient de variation	0,64	0,63

Paramètre statistique (phase de validation T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	37,09	37,06
Écart type	23,41	22,96
3* Écart type	70,24	68,89
Minimum	7,18	8,61
Maximum	142,00	140,52
Coefficient de variation	0,63	0,62

Bassin versant de l'Iton : station Normanville

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,89	5,90
Écart type	2,59	2,57
3* Écart type	7,76	7,72
Minimum	1,13	1,53
Maximum	17,90	17,33
Coefficient de variation	0,44	0,44

Paramètre statistique (phase de test T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,85	5,87
Écart type	2,56	2,55
3* Écart type	7,68	7,66
Minimum	1,21	1,52
Maximum	17,80	17,21
Coefficient de variation	0,44	0,44

Paramètre statistique (phase de validation T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,94	5,96
Écart type	2,62	2,60
3* Écart type	7,85	7,81
Minimum	1,26	1,52
Maximum	17,90	17,31
Coefficient de variation	0,44	0,44

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,89	5,88
Écart type	2,59	2,56
3* Écart type	7,77	7,67
Minimum	1,13	1,54
Maximum	17,90	17,21
Coefficient de variation	0,44	0,44

Paramètre statistique (phase de test T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,85	5,85
Écart type	2,56	2,54
3* Écart type	7,67	7,61
Minimum	1,18	1,54
Maximum	17,90	17,24
Coefficient de variation	0,44	0,43

Paramètre statistique (phase de validation T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,93	5,94
Écart type	2,60	2,58
3* Écart type	7,80	7,75
Minimum	1,23	1,54
Maximum	17,70	17,01
Coefficient de variation	0,44	0,44

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,89	5,89
Écart type	2,59	2,55
3* Écart type	7,77	7,65
Minimum	1,15	1,58
Maximum	17,90	17,22
Coefficient de variation	0,44	0,43

Paramètre statistique (phase de test T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,85	5,85
Écart type	2,55	2,53
3* Écart type	7,66	7,59
Minimum	1,13	1,58
Maximum	17,70	17,25
Coefficient de variation	0,44	0,43

Paramètre statistique (phase de validation T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,93	5,94
Écart type	2,59	2,57
3* Écart type	7,76	7,71
Minimum	1,28	1,59
Maximum	17,40	16,86
Coefficient de variation	0,44	0,43

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,89	5,90
Écart type	2,60	2,54
3* Écart type	7,79	7,62
Minimum	1,13	1,53
Maximum	17,90	17,23
Coefficient de variation	0,44	0,43

Paramètre statistique (phase de test T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,86	5,87
Écart type	2,55	2,52
3* Écart type	7,64	7,56
Minimum	1,23	1,53
Maximum	17,90	17,25
Coefficient de variation	0,43	0,43

Paramètre statistique (phase de validation T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,92	5,95
Écart type	2,57	2,56
3* Écart type	7,71	7,67
Minimum	1,33	1,54
Maximum	17,20	16,79
Coefficient de variation	0,43	0,43

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,89	5,89
Écart type	2,60	2,48
3* Écart type	7,80	7,43
Minimum	1,16	1,63
Maximum	17,90	16,51
Coefficient de variation	0,44	0,42

Paramètre statistique (phase de test T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,87	5,86
Écart type	2,54	2,47
3* Écart type	7,63	7,41
Minimum	1,13	1,63
Maximum	17,90	16,67
Coefficient de variation	0,43	0,42

Paramètre statistique (phase de validation T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	5,91	5,94
Écart type	2,54	2,50
3* Écart type	7,63	7,49
Minimum	1,28	1,63
Maximum	17,30	16,92
Coefficient de variation	0,43	0,42

Bassin versant de l'Avre : station Muzy

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,23	11,23
Écart type	5,28	5,27
3* Écart type	15,84	15,81
Minimum	4,42	4,79
Maximum	30,90	29,66
Coefficient de variation	0,47	0,47

paramètre statistique (phase de test T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,18	11,19
Écart type	5,07	5,07
3* Écart type	15,22	15,22
Minimum	4,42	4,85
Maximum	30,80	29,69
Coefficient de variation	0,45	0,45

paramètre statistique (phase de validation T+6h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,15	11,16
Écart type	5,01	4,99
3* Écart type	15,03	14,97
Minimum	4,42	4,86
Maximum	30,40	29,58
Coefficient de variation	0,45	0,45

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,22	11,22
Écart type	5,28	5,26
3* Écart type	15,83	15,79
Minimum	4,42	4,77
Maximum	30,90	29,75
Coefficient de variation	0,47	0,47

paramètre statistique (phase de test T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,19	11,19
Écart type	5,09	5,08
3* Écart type	15,28	15,23
Minimum	4,44	4,84
Maximum	30,50	29,81
Coefficient de variation	0,45	0,45

paramètre statistique (phase de validation T+12h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,14	11,15
Écart type	5,01	4,97
3* Écart type	15,04	14,92
Minimum	4,45	4,86
Maximum	30,80	29,53
Coefficient de variation	0,45	0,45

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,21	11,25
Écart type	5,27	5,22
3* Écart type	15,81	15,67
Minimum	4,42	4,88
Maximum	30,90	29,99
Coefficient de variation	0,47	0,46

paramètre statistique (phase de test T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,22	11,22
Écart type	5,12	5,05
3* Écart type	15,37	15,16
Minimum	4,42	4,94
Maximum	30,80	30,10
Coefficient de variation	0,46	0,45

paramètre statistique (phase de validation T+18h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,15	11,18
Écart type	5,01	4,94
3* Écart type	15,03	14,81
Minimum	4,43	4,98
Maximum	30,40	29,51
Coefficient de variation	0,45	0,44

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,21	11,20
Écart type	5,26	5,16
3* Écart type	15,78	15,49
Minimum	4,42	4,76
Maximum	30,90	30,15
Coefficient de variation	0,47	0,46

paramètre statistique (phase de test T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,24	11,19
Écart type	5,16	5,01
3* Écart type	15,47	15,04
Minimum	4,42	4,83
Maximum	30,60	30,25
Coefficient de variation	0,46	0,45

paramètre statistique (phase de validation T+24h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,15	11,15
Écart type	5,02	4,89
3* Écart type	15,07	14,66
Minimum	4,42	4,85
Maximum	29,80	29,83
Coefficient de variation	0,45	0,44

Paramètre statistique (phase d'apprentissage T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,18	11,20
Écart type	5,22	4,86
3* Écart type	15,67	14,57
Minimum	4,42	4,73
Maximum	30,90	30,59
Coefficient de variation	0,47	0,43

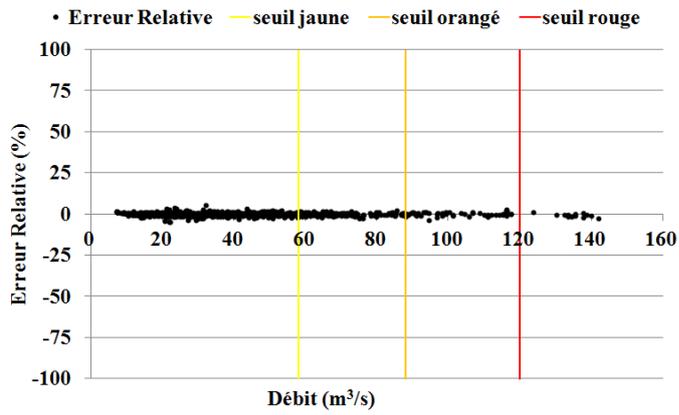
paramètre statistique (phase de test T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,28	11,24
Écart type	5,24	4,80
3* Écart type	15,73	14,39
Minimum	4,42	4,77
Maximum	30,50	30,54
Coefficient de variation	0,46	0,43

paramètre statistique (phase de validation T+48h)		
	débit observé (m3/s)	débit simulé (m3/s)
Moyenne	11,19	11,21
Écart type	5,16	4,64
3* Écart type	15,47	13,93
Minimum	4,42	4,75
Maximum	30,40	30,27
Coefficient de variation	0,46	0,41

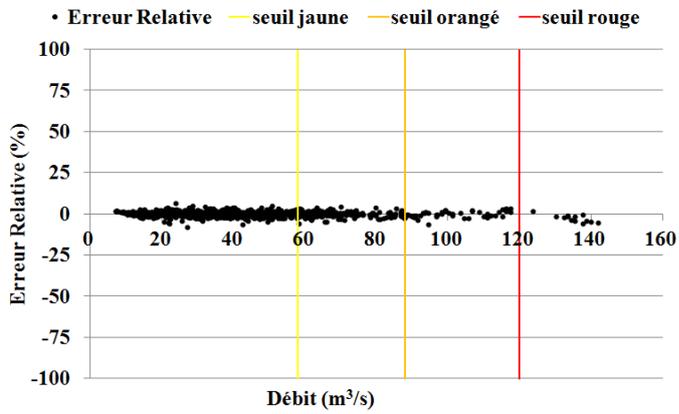
ANNEXE 3 :

DISTRIBUTION DE L'ERREUR RELATIVE PAR RAPPORT AUX SEUILS D'ALERTE

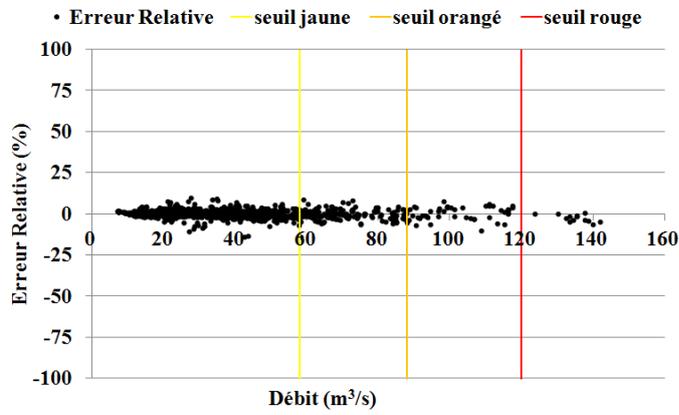
Bassin versant de l'Eure : Station Louviers



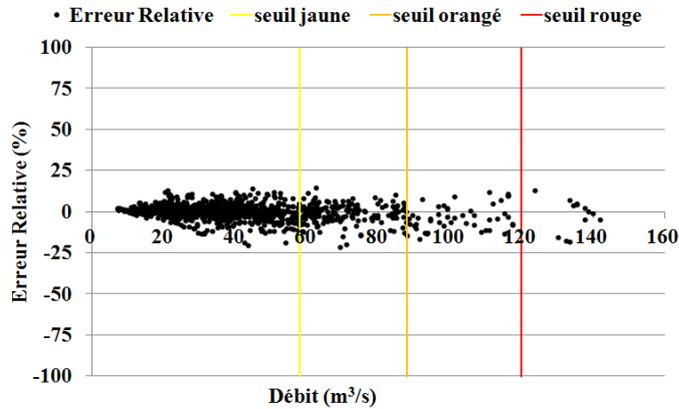
T+6h



T+12h

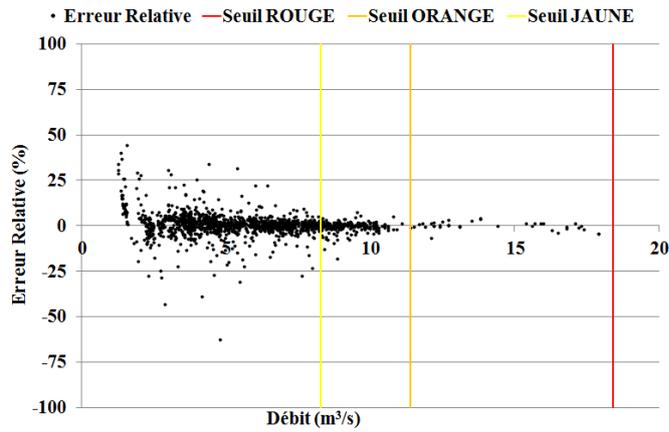


T+24h

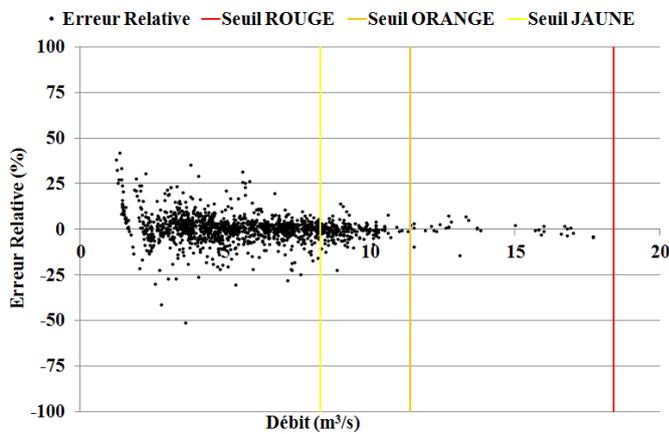


T+48h

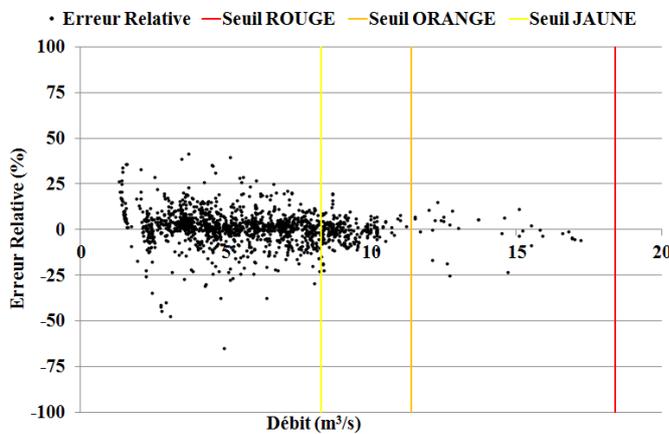
Bassin versant de l'Iton : Station Normanville



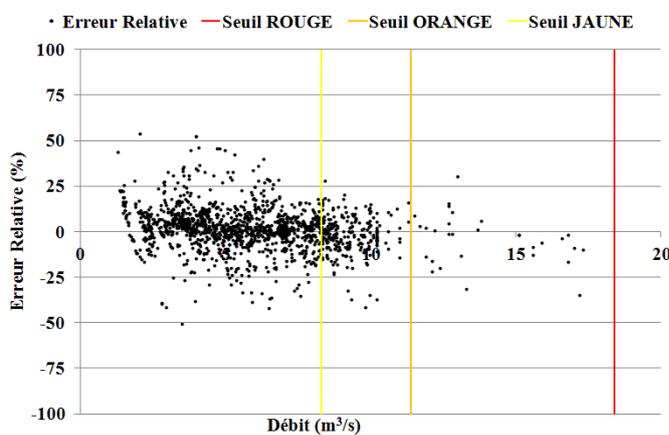
T+6h



T+12h

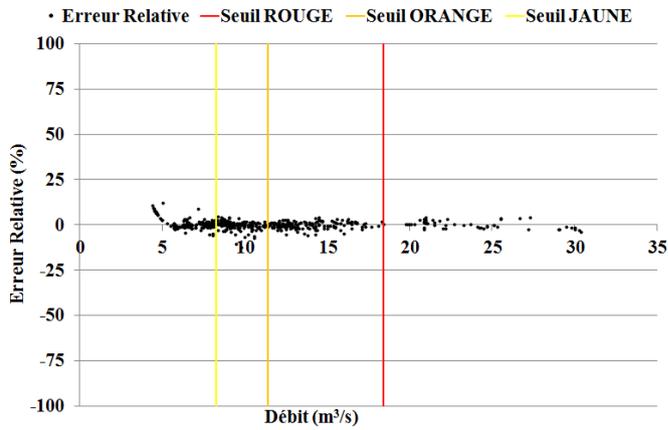


T+24h

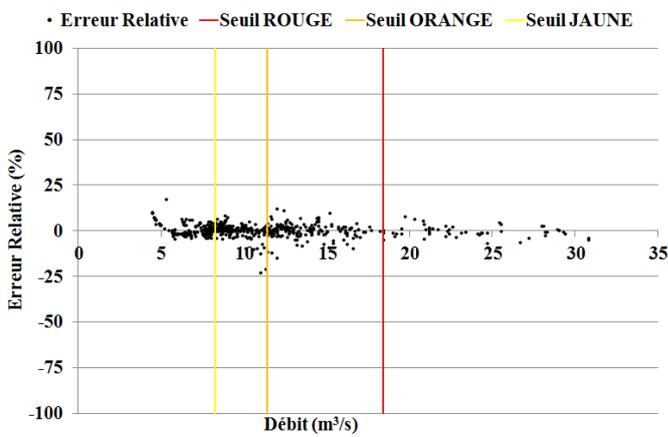


T+48h

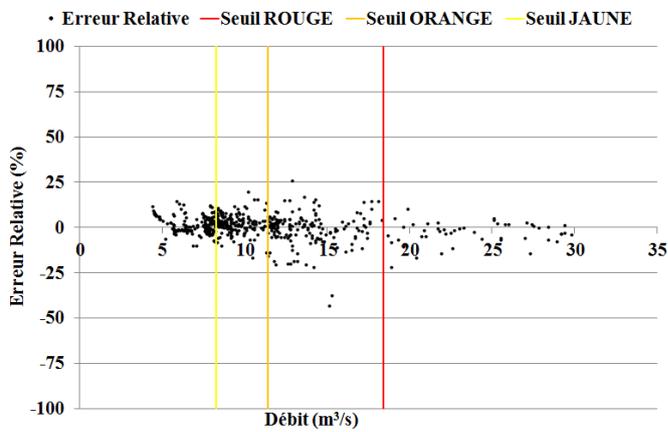
Bassin versant de l'Avre : Station Muzy



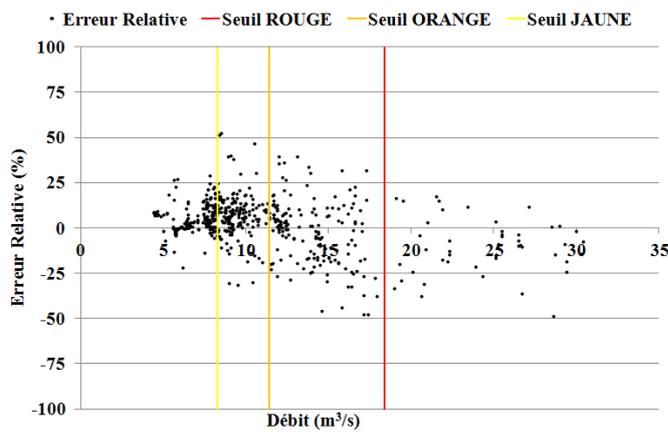
T+6h



T+12h



T+24h



T+48h