UNIVERSITE DE NEUCHATEL — INSTITUT DE GEOLOGIE
FACULTE DES SCIENCES — CENTRE D'HYDROGEOLOGIE

THESE

Présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel
pour obtenir le titre de
DOCTEUR ÈS SCIENCES
par

Laurent EISENLOHR

VARIABILITÉ DES RÉPONSES NATURELLES DES AQUIFÈRES KARSTIQUES

De l'identification de la réponse globale vers la connaisssance de la structure de l'aquifère

Soutenue le 23 février 1995 devant la Commission d'Examen :

Professeur François ZWAHLEN, Université de Neuchâtel, Suisse	Directeur de thèse
Dr Mahmoud BOUZELBOUDJEN, Université de Neuchâtel, Suisse	Examinateur
Professeur László KIRALY, Université de Neuchâtel, Suisse	Co-Directeur de thèse
Professeur Jacques MUDRY, Université de Franche-Comté, France	Examinateur
Professeur Antonio PULIDO-BOSCH, Université de Grenade, Espagne	Examinateur
Dr Yvan ROSSIER, Ministère de l'Environnement, DIREN Dijon, France	Co-Directeur de thèse
Professeur Claude ROUSSET, Université d'Aix-Marseille I, France	Examinateur

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques. De l'identification de la réponse globale vers la connaissance de la structure de l'aquifère.

de M. Laurent Eisenlohr

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

Messieurs F. Zwahlen, L. Kiraly, M. Bouzelboudjen, Y. Rossier (Dijon), J. Mudry (Besançon), C. Rousset (Aix-Marseille) et A. Pulido-Bosch (Grenade).

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 18 septembre 1996

Le doyen:

R. Dändliker

R. Dändliker

Remerciements

Au terme de mon travail, il m'est agréable de remercier les personnes et les organismes qui ont contribué à la réalisation de cette étude.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord au Professeur François ZWAHLEN qui m'a accueilli en mars 1990 au Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Je le remercie de sa confiance et de son appui pour la bonne réussite de mon travail.

Je tiens à remercier pour le soutien financier le Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique (projet *Ishydro* subsides *N°* 2.834-0.88 et 20-31253.91).

Un grand merci à Madame Tong ETTLIN pour sa compétence et son efficacité qui depuis le lancement du projet *Ishydro* en 1985 effectue toutes les analyses chimiques des eaux souterraines.

Pour la relecture du manuscript et l'honneur qu'ils me font en faisant partie du jury je remercie le Dr Ing. Mahmoud BOUZELBOUDJEN, le Professeur László KIRALY et le Professeur François ZWAHLEN de l'Université de Neuchâtel, Suisse, le Professeur Jacques MUDRY de l'Université de Franche-Comté, France, le Professeur Antonio PULIDO-BOSCH de Université de Grenade, Espagne, le Dr Yvan ROSSIER du Ministère de l'Environnement, France et le Professeur Claude ROUSSET de l'Université d'Aix-Marseille I, France.

Un grand merci au Dr Yvan ROSSIER ainsi qu'au Dr Ing. Mahmoud BOUZELBOUDJEN pour avoir très largement contribué à cette thèse. Je les remercie également pour leurs générosités et pour le temps consacré depuis l'élaboration jusqu'à la finalisation de la thèse. Je tiens également à leur exprimer ma reconnaissance pour m'avoir fait partager leurs compétences scientifiques dans le domaine des écoulements en milieu saturé.

J'exprime ma gratitude au Professeur László KIRALY pour avoir mis à ma disposition les différents programmes de calcul et l'aide fournie durant ces dernières années.

Il m'est agréable de remercier le Dr Heinz SURBECK pour les moments agréables passés à la source vauclusienne de l'Areuse et pour le merveilleux voyage dans le monde des radionucléides et plus particulièrement du *Radon*.

Ma reconnaissance à Monsieur Wilhelm STIEFELHAGEN qui m'a introduit dans le monde LaTeX .

Enfin, je remercie toutes les personnes du *CHYN* et de l'Institut de Géologie qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

J'exprime ma plus profonde reconnaissance à mes parents et ma famille pour leur inestimable soutien durant toutes mes études, depuis 1984 à l'Université d'Aix-Marseille III jusqu'à aujourd'hui : je leur dédie ce mémoire.

Résumé

Les méthodes hydrogéologiques utilisées pour étudier les aquifères en milieu poreux continu ne sont pas applicables aux aquifères discontinus. Les caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques sont principalement tirées de l'étude des réponses globales issues de la source karstique (hydrogrammes, composition chimique et isotopique, etc.). Dans ce cas, la réponse globale est souvent utilisée pour faire des inférences sur l'infiltration et les écoulements souterrains mais également sur les paramètres hydrodynamiques. La vérification directe de ces inférences est très difficile.

Nous avons utilisé une méthode indirecte de vérification en introduisant une structure karstique théorique connue dans un modèle à éléments finis 2-D, 3-D et en analysant la réponse globale simulée selon les interprétations hydrologiques et statistiques. La consistance de ces interprétations peut être controlées immediatement car nous connaissons ce que l'on a introduit dans les modèles numériques construits.

Les résultats de nombreuses simulations numériques montrent que certaines interprétations généralement admises ne sont pas nécessairement correctes. En particulier, (i) la séparation de l'hydrogramme de récession en plusieurs composantes montre que les différentes exponentielles ne correspondent pas toujours à différents volumes de l'aquifère ayant des conductivités hydrauliques différentes, (ii) la partie non-exponentielle de l'hydrogramme ne donne pas toujours des informations acceptables sur les processus de l'infiltration, (iii) le coefficient de tarissement du *débit de base (i.e. la dernière exponentielle de l'hydrogramme de récession)* dépend de la configuration de l'aquifère karstique et pas seulement des propriétés hydrodynamiques des volumes à faible conductivité hydraulique.

De plus, les résultats obtenus dans l'étude hydrogéologique régionale dans le Jura suisse et des simulations numériques montrent qu'il est difficile de connaître les paramètres structuraux et hydrodynamiques à partir de l'interprétation des corrélogrammes (débits-débits et pluies-débits). Nous avons montré que l'allure des corrélogrammes est dépendante, en plus de la structure karstique, de plusieurs facteurs : (i) de la forme des crues c'est à dire du contraste décrue-tarissement, (ii) de la fréquence des événements hydrologiques et (iii) du mode d'alimentation c'est-à-dire du rapport entre alimentation diffuse et concentrée. La variabilité de l'hydrogramme karstique résulte de la combinaison de ces facteurs. Leurs distinctions n'est pas toujours visible sur l'hydrogramme et sur les corrélogrammes (débits-débits et pluies-débits).

Les simulations numériques des écoulements souterrains en milieu karstique réalisées ont permis d'écarter certaines interprétations tirées des méthodes globales pour appréhender la structure et le fonctionnement hydrodynamique des aquifères karstiques.

mots-cles : *Hydrogéologie karstique - Hydrogrammes de sources karstiques - Modèles globaux - Modèles déterministes - Structure de l'aquifère karstique*

Table des matières

I Définition de la problématique des réponses naturelles des aquifères karstiques dans l'étude de leurs fonctionnements 1

1 Introduction générale et définition du problème 3

1.1 Introduction 5

1.2 Mise en évidence du problème 6

1.3 Plan du mémoire 7

2 Caractéristiques des réservoirs karstiques; concept et fonctionnement hydraulique 9

2.1 Introduction 9

2.2 Caractéristiques générales des aquifères karstiques 9

2.2.1 Les caractères morphologiques 10

2.2.2 Les caractères hydrogéologiques des aquifères karstiques 11

2.2.3 Les données disponibles pour étudier l'hydrogéologie du karst 11

2.3 Les approches proposées pour l'étude quantitative des aquifères karstiques : leurs buts et leurs limites 15

2.3.1 Etude des aquifères karstiques par une approche hydrologique et statistique 15

2.3.2 Etude des aquifères karstiques selon un principe physique - déterministe- 18

2.4 Simulation des aquifères karstiques 19

2.4.1 Identification des aquifères 19

II Etude des hydrogrammes des sources karstiques dans l'identification du fonctionnement hydraulique par des méthodes hy-

drologiques et statistiques 25

3 Utilisation des hydrogrammes de décroissance des débits pour appréhender la structure du bassin et des différentes composantes de l'écoulement souterrain 27

3.1 Introduction et objectif de l'étude 28

3.2 Historique des différents schémas utilisés pour l'analyse des hydrogrammes de récession des sources karstiques 29

3.2.1 Analyse des périodes de tarissement des sources karstiques 29

3.2.2 Analyse de la totalité des courbes de récession en une seule fonction hyperbolique 31

3.2.3 Décomposition des courbes de récession des sources karstiques en plusieurs fonctions exponentielles 33

3.2.4 Décomposition de la totalité des courbes de récession des sources karstiques en deux fonctions mathématiques différentes 35

3.2.5 Décomposition des hydrogrammes simples des sources karstiques : Application à une source du Jura neuchâtelois 38

3.3 Application : Analyse des hydrogrammes de récession de la source de la Milandrine par différents modèles (Canton du Jura, Suisse). 39

3.3.1 Décomposition de la courbe de récession en plusieurs fonctions exponentielles 41

3.3.2 Décomposition de la courbe de récession en une fonction hyperbolique . . 41

3.3.3 Décomposition de la courbe de récession en deux fonctions mathématiques 42

3.4 Conclusions 43

4 *Utilisation de la totalité des hydrogrammes des sources karstiques pour appréhender le fonctionnement hydrodynamique du karst* 47

4.1 Introduction 47

4.2 Les outils pour l'analyse des séries chronologiques 48

4.2.1 Analyse corrélatoire 48

4.2.2 Spectre de variance 48

4.3 Utilisation des analyses spectrales et corrélatoires pour inférer sur la structure et le comportement dynamique des aquifères karstiques 49

4.3.1 Introduction 50

4.3.2 Rappel des différentes fonctions et leurs significations hydrologiques . . . 50

4.3.3 Essais d'interprétation des analyses corrélatoire et spectrale 51

4.3.4 Analogie avec les hydrogrammes de sources karstiques 53

4.3.5 Application des analyses corrélatoires à deux aquifères karstiques suisses 56

III La simulation numérique comme outil pour contrôler l'interprétation des hydrogrammes des sources karstiques 63

5 Utilisation d'un modèle de simulation numérique pour contrôler l'influence de divers facteurs, climatiques, géologiques et hydrogéologiques sur l'allure de l'hydrogramme des sources karstiques 65

5.1 Démarche adoptée 65

5.2 Nature du modèle et des conditions imposées, présentation de l'aquifère théorique 66

5.3 Résultats des simulations et premières analyses 69

5.3.1 Influence de la densité du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques 69

5.3.2 Influence de l'extension du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques 75

5.3.3 Influence de la hiérarchisation du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques 77

5.3.4 Influence du coefficient d'emmagasinement du réseau sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques 79

5.3.5 Influence de l'extension du bassin d'alimentation sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques 81

5.3.6 Influence de la configuration de la fonction d'alimentation sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques 83

5.3.7 Influence d'une répartition spatiale hétérogène des alimentations distribuées sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques 86

5.4 Conclusions 89

6 Utilisation d'un modèle de simulation numérique pour vérifier les hypothèses émises lors du traitement par les analyses corrélatoires et spectrales 95

6.1 Résultats des simulations numériques des écoulements souterrains dans un aquifère karstique 95

6.1.1 Brève description des bassins karstiques théoriques 95

6.1.2 Simulation numérique 2-D d'une crue : interprétation statistique 95

6.1.3 Simulation numérique 2-D d'une chronique des débits : interprétation statistique 99

6.1.4 Simulation numérique 3-D d'une chronique des débits : interprétation statistique 100

6.2 Conclusion 102

7 Conclusions générales **105**

Partie I

Définition de la problématique des réponses naturelles des aquifères karstiques dans l'étude de leurs fonctionnements

Chapitre 1

Introduction générale et définition du problème

Avant-propos

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet du Fonds national de la recherche scientifique suisse : le projet *ISHYDRO* (ZWAHLEN *et al.*, 1990). Ce programme débuté en 1985 comporte deux étapes.

La *première* concerne la mise en place d'*un* réseau d'observations des eaux souterraines. Actuellement celui-ci regroupe une quinzaine de sources en milieu poreux et karstiques localisées dans différentes régions géographiques et géologiques de suisse occidentale (figure 1.1).

Depuis plusieurs années, les données récoltées sont principalement constituées par des séries chronologiques décrivant (i) l'évolution du débit aux exutoires ainsi que (ii) les variations de la composition chimique et isotopique de l'eau souterraine aux sources (les éléments mesurés régulièrement sont : pH, $T°C$, $K20°C$, HCO_3, Ca, Mg, SO_4, Cl, NO_3, Na, K, $Rn-222$, $O18$, T, D plus rarement, Ba, Li, Fe, SiO_2, Sr, F) (figure 1.2).

La deuxième étape de ce programme est destinée à mettre en évidence l'évolution dans le temps des paramètres hydrodynamiques, chimiques et pour partie isotopiques des eaux souterraines. Cette évolution pouvant être due à un changement de l'environnement de l'aquifère (climatiques, activités humaines) ou au fonctionnement lui-même de l'aquifère. Les réponses globales naturelles des aquifères représentent le principal type de données collectées dans le cadre du programme *ISHYDRO*.

Des études physico-chimiques, isotopiques et géophysiques, plus ciblées dans l'espace, permirent de collecter des données complémentaires. Parmi celles-ci, citons la thèse de THIERRIN (1990), les travaux de LAVANCHY (1986), LAVANCHY *et al.* (1987, 1988) et SURBECK et EISENLOHR (1993, 1995) qui ont permis de comprendre le comportement et la signification des traceurs naturels étudiés.

Faisant suite à ces travaux, notre objectif concernait l'étude du comportement hydrodynamique des aquifères karstiques du réseau *ISHYDRO*. Ceci nous conduisant, pour une grande partie, à l'application de divers outils pour analyser les réponses naturelles des aquifères karsti-

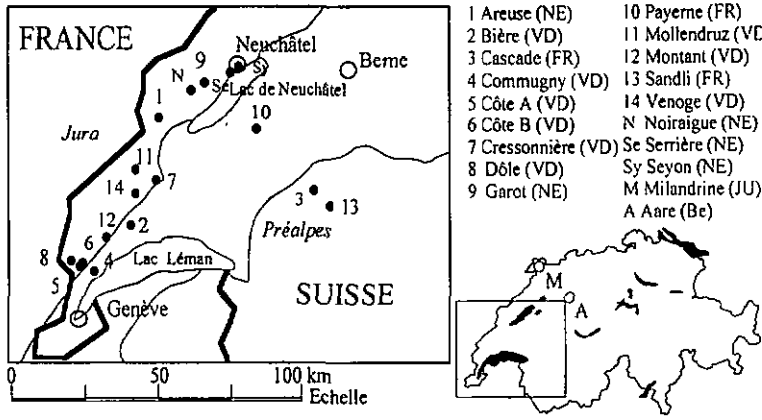


Figure 1.1: *Région d'investigation du projet ISHYDRO; localisation des sources appartenant au réseau de suivi à long terme des eaux souterraines et citées dans le mémoire*

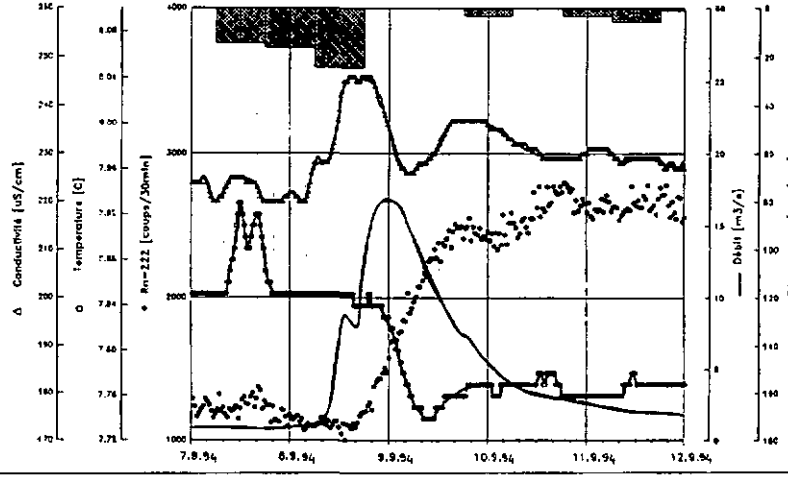


Figure 1.2: *Acquisition et traitement des données; l'exemple de la source de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse). Pour cette source karstique Vauclusienne, un échantillonnage est réalisé mensuellement (depuis 1989) pour les éléments chimiques majeurs (cf. premier paragraphe). L'enregistrement est en continu pour le débit (station Fédérale depuis 1959), la température et la conductivité électrique (depuis 1989) et le radon (depuis 1994 en collaboration avec la Section de Surveillance de la Radioactivité, Office Fédéral de la Santé Publique).*

ques : les hydrogrammes. On utilise des outils statistiques et d'autres provenant de l'hydrologie pour obtenir des informations quantitatives et qualitatives sur les aquifères karstiques à partir de l'étude des hydrogrammes. Ces techniques, dites "globales", sont utilisées pour inférer depuis l'hydrogramme les caractéristiques structurales de l'aquifère et appréhender certains mécanismes de son comportement hydrodynamique. L'interprétation des résultats, provenant de ces techniques, est basée sur des hypothèses hydrogéologiques. Dans le cadre de ce travail, nous aimerions tester certaines de ces techniques avant d'entreprendre l'étude des hydrogrammes des sources du réseau *ISHYDRO*.

1.1 Introduction

Qu'il travaille dans un milieu continu ou discontinu, pour pouvoir gérer ou protéger les quantités d'eau qu'il contient, l'objectif premier de l'hydrogéologue est d'améliorer ses connaissances sur l'aquifère. Il atteindra son but après avoir reconstitué les écoulements souterrains de l'eau et compris la répartition et les mouvements de l'eau au sein de l'aquifère. Pour commencer, il devra s'aider des observations de terrain : la géologie, la géomorphologie et recueillir toutes les informations disponibles : hydrauliques, chimiques, isotopiques, thermiques et bactériologiques. Quelles que soient les particularités reconnues du milieu, l'hydrogéologue dispose de deux méthodes pour mener à bien son interprétation. Dans le travail "réel" l'interaction entre les deux méthodes est inévitable et souhaitable.

1. La première consiste à développer une théorie, pour montrer dans un deuxième temps comment les faits observables (i.e. les observations de terrains) la corroborent;

2. La deuxième rassemble et compare de nombreuses observations de terrain tirées de contextes forts différents, puis dans un deuxième temps entreprend d'en dégager, d'un point de vue pratique, les structures communes et les conclusions utilisables.

Les observations de terrain ont valeur de preuves dans la première méthode et dans la deuxième, elles sont là pour expliquer "quelque chose". Il n'existe pas d'antagonisme entre ces deux méthodes. Elles sont complémentaires et nous le montrerons dans ce mémoire.

A partir d'une revue bibliographique, nous constatons que les études monographiques des aquifères karstiques ne sont pas réalisées de la même manière que celle des aquifères en milieu poreux ou même fissuré. Dans le cas des aquifères poreux, en roches meubles, la connaissance des paramètres dépendant du milieu comme la porosité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et les conditions aux limites, permettent, moyennant quelques précautions liées à l'évolution de ces paramètres d'un point à l'autre du bassin, d'interpoler et d'extrapoler à l'ensemble du site les caractéristiques du milieu. Ce travail effectué, il est ainsi possible de répondre à une grande partie des problèmes courants en hydrogéologie.

Dans le cas de l'aquifère karstique les paramètres physiques le caractérisant possèdent une forte hétérogénéité spatiale. La distribution des champs des différents paramètres (conductivité hydraulique K, coefficient d'emmagasinement S) est difficilement concevable, que ce soit par des mesures directes dans des forages ou des puits, voire indirectes par la géophysique, l'analyse

des hydrogrammes et des essais de traçages. Plus contraignant que cette hétérogénéité, qui est également présente dans les milieux poreux, il existe de brusques variations, des discontinuités dans la répartition de ces paramètres. Il y a hétérogénéité à toute échelle d'observation du monolithe de roche carbonaté au bassin d'alimentation. Mais ces discontinuités ne sont pas réparties de façon aléatoire, elles sont structurées et correspondent à un arrangement des vides plus ou moins connexe.

Les données disponibles concernant les aquifères karstiques, présentent également une caractéristique spécifique par rapport à celles dont on dispose pour les aquifères en milieu continu. Il s'agit principalement de données qui s'inscrivent dans un repère temporel. Les débits aux exutoires des bassins sont en général bien connus. Les hydrogrammes représentent souvent la quasi-totalité du terme sortie d'eau du bilan de l'aquifère.

Il ressort de ces particularités que "l'analyse précise" des écoulements des aquifères karstiques - i.e. l'objectif de l'hydrogéologue - est considérablement gênée par la difficulté que l'on rencontre à décrire leur structure interne - i.e. contraintes pragmatiques du karst -.

1.2 Mise en évidence du problème

Le praticien travaillant dans un milieu discontinu cherche à élaborer, utiliser, tester des outils d'application directe ou indirecte pour appréhender, même grossièrement, la distribution spatiale des caractéristiques physiques de l'aquifère à l'échelle du bassin hydrogéologique (K, T et S). Il cherchera à maîtriser les conditions aux limites hydrogéologiques, les liaisons entre les différentes parties de l'aquifère et son environnement, en bref de comprendre le fonctionnement du karst. Pour y arriver, l'hydrogéologue dispose d'un ensemble de moyens : (i) Des observations de terrain directes (e.g. la géologie, la topographie) et indirectes comme la géophysique dont l'apport est non négligeable dans la reconnaissance de la géométrie des aquifères; (ii) L'analyse des réponses globales naturelles et/ou provoquées des aquifères (hydrodynamique, chimique, isotopique, bactériologique et traçages artificiels) par diverses méthodes appropriées : statistiques, stochastiques et hydrologiques; (iii) La simulation numérique subordonnée aux lois physiques décrit l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de matières dissoutes. Ces modèles sont non seulement utilisés dans un but de "prévision" (gestion des ressources en eaux) mais également dans un but de "connaissances" (évaluation des hypothèses hydrogéologiques).

Toutes ces informations statiques, représentées par la géologie, la topographie, la géomorphologie, et dynamiques exprimées, entre autres, par les conditions climatiques et hydrodynamiques constituent la base du travail. En superposant ces différents niveaux d'informations, l'hydrogéologue tentera, en fonction de l'objectif de l'étude, d'obtenir une image aussi juste et exacte que possible du milieu naturel étudié. Cette image n'est pas figée, mais évoluera dans le temps en fonction des informations supplémentaires obtenues.

Dans l'état actuel des connaissances il n'existe pas de panacée. On reconnaît que la plupart des moyens sont délaissés au profit de techniques statistiques, hydrologiques et stochastiques. Ces techniques tentent d'inférer les caractéristiques structurales de l'aquifère et d'appréhender certains mécanismes du comportement hydraulique de celui-ci. Il s'agit d'une démarche implicite qui s'appuie (i) sur la décomposition d'une partie des hydrogrammes des sources karstiques

par differents modèles, (ii) sur l'analyse de la totalité des hydrogrammes par les fonctions corrélatoire et spectrale et (iii) l'évaluation d'un opérateur de transfert : l'hydrogramme unitaire. La finalité d'une telle étude est l'obtention de paramètres, tirés de l'hydrogramme, et interprétés en termes de structure et fonctionnement de l'aquifère, d'une typologie des systèmes karstiques. Cette classification étant établie à partir de systèmes connus (i.e. structure et fonctionnement) la caractérisation d'un nouvel aquifère étudié en sera facilitée. L'avantage d'une telle démarche est sa rapidité de mise en œuvre et le type de données nécessaires facilement accessibles.

Face à cette façon d'agir, de traiter un problème hydrogéologique, est-il possible d'inverser cette démarche en adoptant un raisonnement explicite ? Et dans ce cas, est-il possible de contrôler les hypothèses hydrogéologiques subordonnées à ces outils ou techniques ainsi que les interprétations ?

Les modèles de simulation numérique tels qu'ils sont développés par KIRALY (1978, 1985, 1988) tiennent compte de la physique des mécanismes du fonctionnement de l'aquifère. L'incomparable avantage de ces modèles est que dans le cadre d'une simulation l'utilisateur dessine lui-même une "structure" et impose en quelques points de l'aquifère les caractéristiques du milieu. Ainsi la réponse d'un bassin karstique théorique à une alimentation connue peut être analysée.

Dans le présent mémoire la mise en œuvre d'un modèle de simulation numérique fournit un moyen d'analyser la réponse hydrodynamique de divers bassins karstiques théoriques dont le but est de contrôler la cohérence des hypothèses hydrogéologiques sur le fonctionnement du milieu karstique.

1.3 Plan du mémoire

Le mémoire est subdivisé en trois partie. Dans la première, nous précisons certaines particularités des aquifères karstiques qui induisent son fonctionnement original. Il s'agit donc de concepts qui sont au coeur de ces premiers paragraphes.

Par la suite, les deux approches actuellement employées pour étudier le karst sont présentées. La première, et la plus usitée, étudie directement les réponses naturelles des aquifères karstiques (i.e. les hydrogrammes) pour inférer la structure de l'aquifère étudié; la seconde impose une structure interne de l'aquifère par l'introduction des champs de K et S et la modifie jusqu'à obtenir un résultat qui soit cohérent vis à vis des observations de terrains.

Après avoir définit un objectif et le milieu naturel que nous avons décidé d'étudier, il est utile de choisir un cadre cohérent dans lequel on puisse travailler . Il est donc essentiel de prendre du recul vis à vis de la réalité physique et de créer des schémas qui nous permettront de dépasser le stade du traitement des données : c'est le but des dernières page de cette première partie du mémoire.

La deuxième partie est, dans un premier temps, une étude critique des décompositions des hydrogrammes des sources karstiques. Nous présentons différents modèles d'analyse et/ou de décomposition de l'hydrogramme et les interprétations formulées par les auteurs. Nous

appliquons les différents modèles présentés, sur les hydrogrammes d'une source karstique du Jura. Dans un deuxième temps nous tentons d'apporter quelques éléments de réflexion sur les analyses corrélatoire et spectrale appliquées à la connaissance du comportement des aquifères karstiques.

Dans la troisième partie, nous utilisons la simulation numérique, comme outil, pour contrôler l'interprétation des hydrogrammes des sources karstiques (i.e. vérifier les hypothèses hydrogéologiques qui sont à la base de différentes techniques d'analyse des hydrogrammes).

Enfin, le dernier chapitre regroupe les conclusions du mémoire. Nous présentons les possibilités et les limites inhérentes dans l'identification et le fonctionnement des aquifères karstiques. Ceci permettant de replacer le cadre des données disponibles et celles "réellement" exploitables pour appréhender la structure et le comportement des aquifères karstiques.

Chapitre 2

Caractéristiques des réservoirs karstiques; concept et fonctionnement hydraulique

2.1 Introduction

Ce chapitre présente en premier lieu notre concept du karst. Cette vision "réaliste" que nous proposons est indispensable car c'est dans ce domaine du réel qu'un plan d'échantillonnage sera adopté en fonction, bien évidement, d'un objectif déjà défini. C'est toujours dans ce domaine du réel que les résultats provenant de la réalisation de divers schémas seront confrontés en vue d'être validés. L'interprétation des résultats (i.e. le retour des résultats numériques sur le milieu physique) représente la sanction de l'étude (voir fig. 2.8). Celle-ci est relative aux connaissances hydrogéologiques acquises sur le site étudié. En somme, le contact avec la réalité physique se situe en début et en fin de toute étude hydrogéologique. Ensuite, nous détaillerons les principales approches employées pour appréhender le fonctionnement du karst, elles-mêmes généralement liées aux types de techniques utilisés. Cela nous permettra de souligner le problème d'adopter une démarche d'étude implicite et, de proposer une solution plus soucieuse d'objectivité car reposant sur les fondements physiques des écoulements de l'eau souterraine en zone noyée.

Dans ce chapitre il s'agit donc essentiellement de mettre en place (i) notre schématisation du fonctionnement des aquifères karstiques et (ii) la méthode adoptée pour atteindre notre objectif, ainsi que les outils s'y rapportant. Cette démarche choisie constitue le principe directeur tout au long de ce mémoire et sera décrite en détail dans la dernière partie de ce chapitre.

2.2 Caractéristiques générales des aquifères karstiques

Avant de décrire le milieu naturel qui nous intéresse, il est important d'émettre un avertissement. Le karst peut rapidement circonscrire nos ambitions car le type de données recueillies

sera engendré par une structure qui peut réunir des éléments forts différents. Il convient donc d'être prudent et ne pas prétendre résoudre tous les problèmes liés à la connaissance de la structure des aquifères karstiques.

Le point de départ de toute étude hydrogéologique étant le cadre naturel, sa description est prioritaire. Il est indispensable de dégager les caractéristiques du milieu karstique, car elles donnent à l'aquifère ses particularités hydrogéologiques et lui conférant ainsi l'originalité de sa structure. Cette dernière étant souvent la source de confusions concernant le schéma adopté pour l'étudier.

2.2.1 Les caractères morphologiques

L'expression "terrains karstiques", désigne un paysage développé sur des roches carbonatées compactes qui ont été, dans un premier temps, fracturées lors des déformations successives et, dans un deuxième temps, dissoutes par les eaux météoriques. La physionomie de ces terrains résulte d'une longue confrontation des conséquences de la géologie et du travail de l'eau agressive ou incrustante. Le travail de dissolution est à l'origine des traits morphologiques de surface particuliers tels : la rareté des sols, l'absence d'un réseau hydrographique de surface, la présence de dépressions morphologiques, avens, etc. et souterrains comme l'existence de grottes, d'un réseau karstique fortement actif et connecté à de grandes sources. Le karst est donc le résultat d'une érosion tridimensionnelle, la karstification, qui affecte principalement les roches carbonatés. En effet, celles-ci se distinguent par une solubilité élevée, laquelle est propice à l'apparition des spécificités particulières détaillées ci-dessus.

L'omniprésence de fissures élargies en surface ou sub-surface et de cavités de dissolution en profondeur permettent à l'eau de s'infiltrer et de s'écouler rapidement vers un ou plusieurs exutoires d'un bassin. Par ce fait, ces milieux extrêmement vulnérables aux contaminations, réagissent d'ordinaire plus vite et plus fortement aux diverses agressions (qualitatives et / ou quantitatives) que les autres types de terrains. La présence d'une couverture pédologique joue un rôle non négligeable pour la protection des eaux souterraines (BURGER, 1979). En bref, le modèle karstique comprend deux types de formes issus de processus tridimensionnels :

- Les formes de surfaces qui ne s'étendent pas à plus de quelques mètres de profondeur et qui dépendent principalement des phénomènes d'altération et de désagrégation de la surface des continents.
- Les formes de plus grandes profondeurs conditionnées par la perméabilité des roches et de l'écoulement de l'eau souterraine.

En première image le karst apparaît comme un volume de roche carbonatée compacte découpé par des faisceaux de fissures d'écartement, de densité et de direction variables. Même si à l'échelle de la vie humaine ces caractères morphologiques nous semblent figés, ils évoluent dans le temps. La mise en place des formes spécifiques, ainsi que leurs évolutions, sont directement dépendantes des possibilités de circulation de l'eau et donc de la perméabilité des roches.

2.2.2 Les caractères hydrogéologiques des aquifères karstiques

Le karst est indissociable de la fracturation. Envisager les écoulements au sein de l'aquifère karstique revient d'abord à relever et comprendre la fracturation. Mais la fracturation ne peut déterminer à elle seule la direction des conduits qu'emprunteront les écoulements d'eau souterraine. C'est la direction du gradient hydraulique régional qui conditionne les écoulements dans les différents systèmes de fissures aux dimensions variables.

L'effet couplé du débit et de l'agressivité de l'eau engendre une concurrence entre les voies d'écoulement, aboutissant à une prépondérance croissante de certaines d'entre elles. L'aquifère karstique est donc évolutif (KIRALY, 1975) : (i) Les vitesses d'écoulement et le débit dépendent de la perméabilité et du gradient hydraulique; (ii) La perméabilité est fortement influencé par l'agrandissement des fractures soumises à la karstification; (iii) Cet agrandissement est fortement influencé par la direction et la grandeur du vecteur vitesse pendant les états antérieurs.

Le système karstique apparaît donc être partiellement autorégulateur. L'état actuel résulte de réglages successifs entre le champ des vecteurs vitesse, le champ des caractères physiques de la roche et les conditions aux limites. Ces interdépendances sont illustrées par la boucle de retour (feed-back) de la figure 2.1 (KIRALY, 1975). Du fait de la discontinuité et de l'hétérogénéité de la distribution des vides, la perméabilité d'un volume de calcaire est également hétérogène et discontinue; elle s'accroît avec les dimensions horizontale de celui-ci conférant ainsi un effet d'échelle sur la perméabilité en fonction du volume pris en considération (figure 2.2).

La figure 2.3 fournit une assez bonne idée de l'influence des caractéristiques précédemment citées sur la physionomie de la zone noyée de l'aquifère karstique. Il s'agit d'une coupe de 300 mètres de long, située dans le Jura suisse (Canton du Jura, Suisse). La structure géologique a été établie selon des profils géologiques, géophysiques et calée à partir de six forages de 40 à 80 mètres de profondeur (TURBERG, 1993). On constate que les gradients hydrauliques peuvent être forts élevés, notamment entre les zones peu et très perméables de l'aquifère. La surface supérieure de la zone noyée est irrégulière. Ces caractéristiques hydrogéologiques trouvent une explication plausible en invoquant la structure originale de la porosité de l'aquifère karstique.

La structure de ce milieu hétérogène et discontinu est également à l'origine de phénomènes typiques, comme l'allure spécifique des hydrogrammes des sources karstiques représentée par des crues violentes et rapides suivies d'une période de tarissement lente sur une longue période, le passage rapide des traceurs artificiels ou biologiques dénotant ainsi des axes à écoulement de l'eau souterraine rapide vers l'exutoire, la dépendance de la variation du chimisme de l'eau vis à vis des modulations du débit des sources.

2.2.3 Les données disponibles pour étudier l'hydrogéologie du karst

La distribution des caractéristiques hydrogéologiques dans le réservoir n'est en général connue que par points isolés et peu nombreux. Les paramètres structuraux : transmissivité, coefficient d'emmagasinement, géométrie, conductivité et capacité des réseaux karstiques sont rarement mesurables sur l'ensemble du site étudié. De plus, l'interpolation des paramètres obtenus dans les puits et les forages est difficile. La comparaison de la variation du niveau d'eau entre deux forages recoupant des zones à perméabilité très différente nous renseigne sur le contraste existant

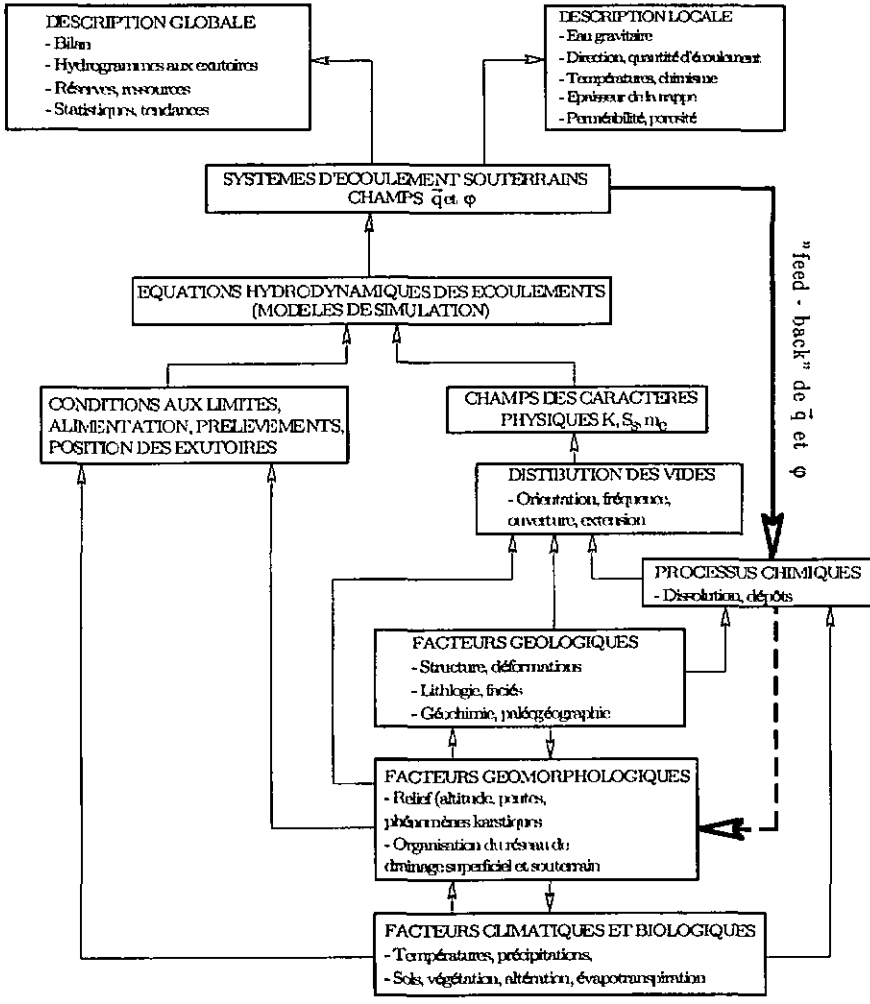


Figure 2.1: *Schéma des relations entre facteurs géologiques, propriétés physiques de l'aquifère et caractères géologiques dans le karst (d'après* KIRALY, *1975)*

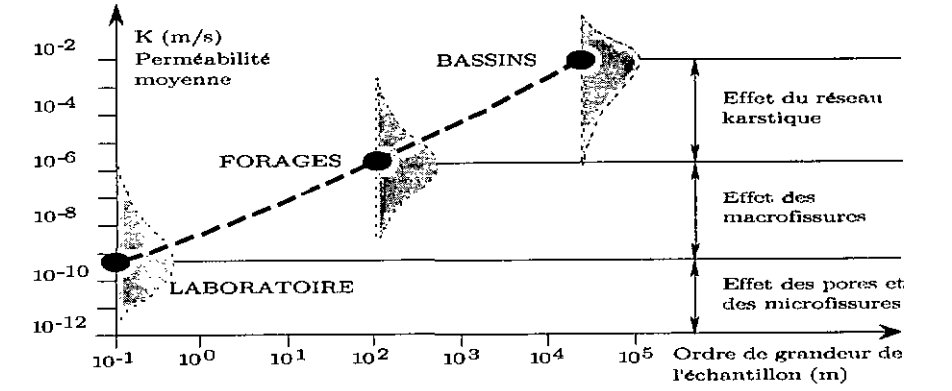


Figure 2.2: *Représentation schématique de l'effet d'échelle sur la perméabilité dans le karst (d'après* KIRALY, *1975)*

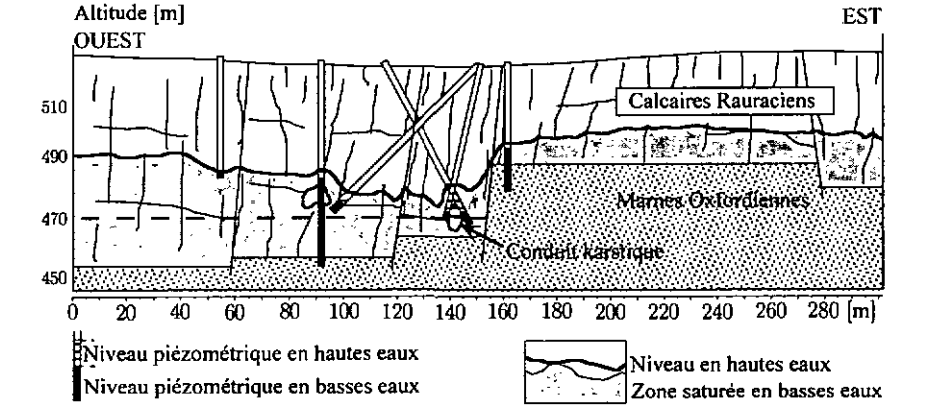


Figure 2.3: *Profil schématique avec observation des niveaux d'eau dans les forages et interprétation de l'allure de la zone noyée. Site de Bure en Ajoie (Canton du Jura, Suisse) (d'après* TURBERG, *1993)*

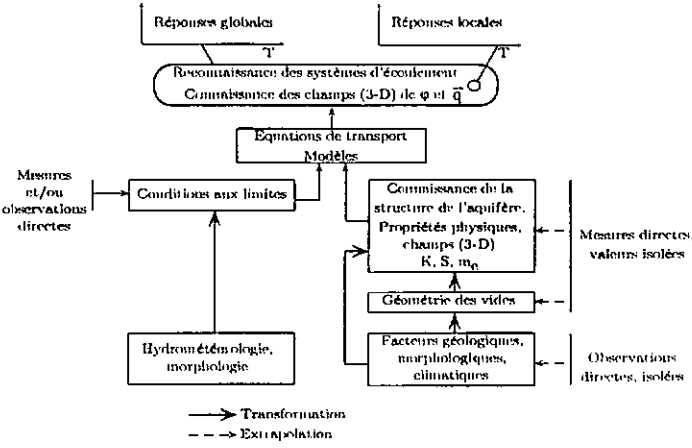


Figure 2.4: *Tableau synoptique représentant les problèmes à résoudre pour la reconstruction des systèmes d'écoulement (d'après* KIRALY, *1975)*

entre ces deux zones. Ces résultats ne peuvent être, en aucune façon, étendus à l'ensemble du bassin étudié.

Sur le plan régional, l'identification de l'aquifère se heurte à des problèmes pratiques dont le principal est la connaissance de la structure (KIRALY, 1975) et, le second à la régionalisation des mesures et/ou des observations (interpolation et extrapolation dans l'espace et dans le temps (cf. figure 2.4). L'étude régionale passe par une synthèse de tous les résultats empiriques et théoriques que nous avons sur l'aquifère : la géologie, la chimie des eaux, les relevés de fissuration, les traçages, etc.). Cette richesse des informations présentée sous forme de cartes et de coupes apporte une vision dynamique tridimensionnelle de l'aquifère.

Les manifestations de surface observables nous renseignent sur la position et l'altitude des exutoires naturels des systèmes aquifères. Les débits sortant par les exutoires sont en général bien connus, nettement mieux que les exfiltrations des nappes en milieux poreux qui sont diffuses. Pour les aquifères karstiques les données les plus facilement accessibles et les moins coûteuses, donc le plus souvent recueillies, sont les débits aux exutoires, en plus des précipitations atmosphériques et de la température de l'air. Ces trois paramètres rendent compte de l'environnement de l'aquifère, et sont mesurés dans la réalité au niveau de stations de mesures permettant l'élaboration de chroniques temporelles. La mesure des débits aux sources représentés par l'hydrogramme caractérise la réponse des aquifères et constitue la sortie du système étudié.

Les réponses globales hydrodynamiques des sources karstiques constituent les données de base dans cette étude. Nous nous attacherons à montrer la "représentativité" de la variabilité de ces paramètres et les possibilités de l'interprétation de l'hydrogramme.

D'un point de vue hydraulique, quelle que soit leur structure, tous les aquifères karstiques présentent un certain nombre de modalités de comportement et donc de fonctionnement qui concernent notamment : le mode d'alimentation, le mode de drainage et les conditions aux limites.

Au sein du milieu naturel qui nous importe, s'individualise une géométrie particulière (champ 3-D de K, S). La matrice rocheuse carbonatée peu perméable est drainée par des vides de dimensions variables plus ou moins bien interconnectés et aboutissant à l'exutoire du bassin. Cette structure particulière est le siège de contraste de deux ordres :

1. Le premier concerne le mode d'alimentation. Il coexiste une infiltration efficace dispersée à travers la zone non saturée et une alimentation concentrée par engouffrement dont les manifestations sont principalement tous les regroupements des eaux de ruissellement de cours d'eau de surface et sub-surface (épikarst).

2. Le deuxième concerne la perméabilité qui est fort contrastée d'un point à l'autre d'un bassin. Elle est élevée dans les conduits karstiques (ordre de grandeur de $K \succ 10^{-1}\ m \cdot s^{-1}$) et beaucoup plus faible dans l'encaissant rocheux (ordre de grandeur de $10^{-3}\ m \cdot s^{-1} \prec K \prec 10^{-9}\ \mathrm{m} \cdot s^{-1}$). Ainsi, le réseau karstique est alimenté par des conduits verticaux à transit rapide (cf. point (1)) et par les micro-fissures peu perméables l'entourant. Les eaux qui s'écoulent dans les chenaux principaux sub-horizontaux sont en relation dynamique avec les parties saturées de la roche encaissante poreuse (blocs peu perméables capacitifs). L'eau contenue dans les blocs est mise à contribution pour maintenir un débit d'étiage durant une longue période.

Parmi les conditions aux limites prédominent les limites étanches, géologiques mais aussi hydrauliques. Certaines limites ne peuvent être considérées comme stables et impliquent donc souvent un domaine d'extension variable de l'aquifère en fonction des événements hydrologiques (e.g. une partie de l'aquifère karstique, la zone noyée, peut se dénoyer en période de bas débit).

2.3 Les approches proposées pour l'étude quantitative des aquifères karstiques : leurs buts et leurs limites

Selon les techniques employés, découlent deux approches (NEVEN- KRESIC, 1993). Celles-ci correspondent à des schématisations différentes de l'aquifère. Les schémas conçus peuvent également être différents au sein d'une même approche.

2.3.1 Etude des aquifères karstiques par une approche hydrologique et statistique

Cette approche utilise les séries chronologiques de divers paramètres enregistrées à l'entrée et à la sortie des aquifères. La majorité des techniques exploités furent établis et testés en hydrologie. Citons par exemple la décomposition des hydrogrammes de récession (BOUSSINESQ,

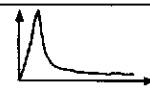
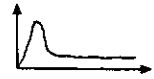
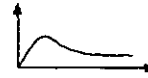
Type d'aquifère	Effet mémoire r=0.1-0.2	Bande spectrale (F. de coupure)	Temps de régulation	Hydrogramme unitaire
Aliou (France)	réduit (5 j.)	très large (0.30)	10 à 15 j.	
Baget (France)	petit (10 à 15 j.)	large (0.20)	20 à 30 j.	
Fontestorbes (France)	grand (50 à 60 j.)	étroite (0.10)	50 j.	
Torcal (Espagne)	considérable (70 j.)	très étroite (0.05)	70 j.	

Tableau 2.1: *Classification des aquifères karstiques en fonction des résultats des analyses corrélatoires et spectrales (d'après* MANGIN, *1984)*

1904; MAILLET, 1905; BURGER, 1956; SCHOELLER, 1967; FORKASIEWICZ et PALOC, 1967; MIJATOVIC, 1968, 1974; TRIPET, 1972; MANGIN, 1975), le calcul d'un hydrogramme unitaire, l'apport quantitatif des essais de traçage (ZOETL, 1989), les bilans d'eau et les analyses corrélatoire et spectrale (MANGIN, 1981a,b). Avec ces techniques on considère l'aquifère et son environnement dans sa totalité comme un "système". Il peut donc être assimilé à une "boîte noire". L'aquifère est le siège d'un processus, possède une entrée, un parcours et une sortie. On analyse la fonction de transfert qui transforme l'impulsion d'entrée : les précipitations atmosphériques en réponse : le débit issu du "système". Il est clair que d'autres fonctions de transferts affectent la température de l'eau, le contenu chimique, isotopique et biologique, etc. A partir des décompositions des hydrogrammes et d'analyses statistiques des hydrogrammes, une classification des aquifères karstiques est possible (tableau 2.1).

Cette typologie des aquifères est dressée selon différents degrés "d'organisation des écoulements" MANGIN, (1975, 1982). Elle décrit également l'évolution des réserves de l'aquifère. Pour son interprétation l'auteur considère que la structure des vides et le fonctionnement de l'aquifère sont organisés et hiérarchisés d'amont en aval. On apprécie dans sa globalité "l'organisation des écoulements". La schématisation employée est représentée par la figure 2.5 (MANGIN, 1975).

Une application de cette approche est donnée dans les travaux de MANGIN, (1975, 1982); DODGE, (1983); MONDAIN, (1991); MUET, (1989); SCHOUWEY, (1989); GRASSO, (1993); MEUS, (1993); TISSOT et TRESSE, (1978); JEANBLANC et SCHNEIDER, (1981); LEPILLER et MONDAIN, (1988); CROCHET *et al.*, (1992), etc.

Subordonné aux décompositions des hydrogrammes des auteurs ont présentés d'autres schémas de l'aquifère (FORKASIEWICZ et PALOC, 1967; DROGUE, 1972). Les schémas des aquifères karstiques conçus avec ces techniques conservent le caractère de modèles de type "boîte noire".

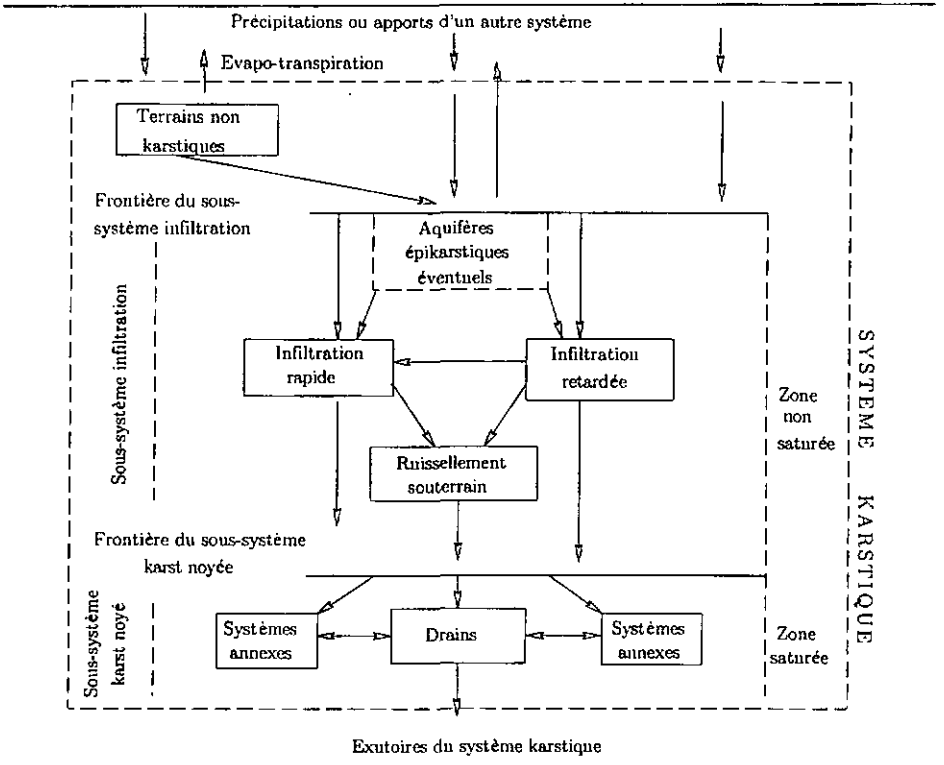


Figure 2.5: *Schématisation d'un système karstique (d'après* MANGIN, *1975).*

Dans ce cas, l'approche utilisée fournit des renseignements descriptifs. Ils peuvent être utiles pour la prévision des écoulements aux exutoires naturels d'un aquifère ou pour reconstituer des valeurs manquantes dans une série de mesures, mais toujours sous l'hypothèse que les conditions de fonctionnement restent inchangées.

2.3.2 Etude des aquifères karstiques selon un principe physique -déterministe-

Pour cette approche les outils se basent sur les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, porosité, conditions aux limites). C'est sur la base des équations décrivant l'écoulement de l'eau dans la zone non-saturée, la zone noyée, le transport de substances dissoutes dans l'eau souterraine, etc. que le karst est schématisé. L'exploitation d'un schéma, basé sur des lois physiques peut se faire à deux niveaux :

1. L'équation peut servir à dresser un cadre d'étude grâce aux lois physiques décrivant la dynamique du milieu. En fonction de ce support théorique les résultats des différentes techniques (statistiques, probabilistes, etc.) ou observations sont analysés (SAUTER, 1992; KIRALY et MUELLER, 1979; ROSSIER et EISENLOHR, 1993; WILKINSON et COOPER, 1993).

2. La structure et la distribution des différents champs des paramètres hydrogéologiques n'étant jamais connues à l'échelle d'un bassin karstique, la modélisation des écoulements, ou tout autre phénomène physique, dans un aquifère karstique fait appel à une démarche inverse. L'utilisateur dresse lui-même une forme, une structure de complexité variable, impose les caractéristiques essentielles du bassin karstique. En simulant la réponse à une alimentation connue on peut tester les valeurs introduites dans le modèle jusqu'à obtenir *une réponse proche de celles des milieux naturels* (KIRALY, 1975, 1985; BONNET *et al.*, 1976; KIRALY et MOREL, 1976a,b; PULIDO-BOSCH et PADILLA-BENITEZ, 1988; KIRALY *et al.*, 1992).

Les modèles déterministes permettent de simuler les effets de conditions nouvelles sur le milieu liés à des évolutions naturelles ou artificielles.

Dans ce mémoire, nous utiliserons l'approche déterministe pour tester l'effet hydrodynamique de certaines hypothèses "émises" sur la structure des aquifères karstiques et pour pallier aux connaissances fragmentaires des sites étudiés.

Les modèles hydrométéorologiques appliqués au karst (BEZES, 1976; JACQUEMIN, 1984; DROGUE et GUILBOT, 1977; MANIA et RAMON, 1980) s'insèrent entre les approches citées précédemment : globale (paragraphe **2.3.1**) et déterministe (paragraphe **2.3.2**). Le fonctionnement de l'aquifère, est schématisé par plusieurs réservoirs. Chaque réservoir est caractérisé par des paramètres tirés de l'hydrogramme "réel", des propriétés physiques des sols, de la géologie. Le modèle est calé à partir des observations hydroclimatologiques d'une période considérée par comparaison des volumes calculés de la pluie efficace avec les volumes écoulés mesurés à la source.

2.4 Simulation des aquifères karstiques

L'acquisition des données ne permet pas à elle seule la compréhension d'un phénomène, car les valeurs numériques ne sont pas le "réel", mais déjà une première image de la réalité qui se trouve être structurellement très pauvre à nos yeux. Si la récolte des données s'élabore effectivement dans le domaine du réel, c'est également dans ce domaine que doivent se résoudre les questions posées. Le problème est donc d'adjoindre une information supplémentaire à ces données pour en tirer le maximum d'informations "réalistes". Avant toute étude il est indispensable de mettre au point une démarche, un cadre cohérent dans lequel on puisse travailler. Ainsi il est essentiel de prendre du recul vis à vis de la réalité physique et de créer des schémas abstraits donc restrictifs de la réalité, qui permettront de dépasser le stade du traitement des données. Dans ces schémas seule une partie de la réalité physique est prise en compte.

2.4.1 Identification des aquifères

L'aquifère, système réel, ne peut pas être reconnu tel quel. Le passage à un schéma nous fourni un moyen de cerner une définition de l'aquifère. A travers le schéma nous ne prenons en considération qu'une partie de la réalité que nous traduisons en paramètres compatibles avec le modèle que nous choisissons. Le modèle choisi décrit l'écoulement de l'eau souterraine. Il permet de donner en tout point d'un volume délimité la valeur du potentiel (charge hydraulique), variable hydrogéologique de référence et ensuite de calculer des lignes de courant. Il suppose la connaissance de caractéristiques physiques (champ de perméabilités, coefficient d'emmagasinement) et de conditions aux limites hydrogéologiques. Ce modèle permet de délimiter, partitionner le volume en systèmes d'écoulement, unité hydrogéologique fondamentale.

2.4.1.1 Définition des systèmes d'écoulement souterrain

Hydrogéologue, nous nous intéressons aux écoulements souterrains, aux aquifères. Celui-ci est défini au regard d'une superposition et juxtaposition des systèmes d'écoulement.

Proposés par TOTH (1962, 1963), ils constituent un cadre cohérent pour étudier le mouvement des eaux souterraines dans un bassin hydrogéologique. Il s'agit d'un domaine fini dont toutes les parties sont en liaison hydraulique continue, c'est un ensemble de lignes de courant reliant une aire d'alimentation à une zone d'exutoire. TOTH (1962, 1963), définit le système d'écoulement (flow system) comme l'ensemble des lignes d'écoulement fictives dans lequel deux lignes d'écoulement, voisines en un point quelconque du bassin, restent voisines à travers toute la région d'écoulement, c'est à dire entre la région alimentaire et la région d'exutoire. Chaque système d'écoulement possède ainsi une région d'alimentation continue, connexe et une région d'exutoire continue (figure 2.6).

Illustré par la figure 2.6, dans un système d'écoulement local, la région d'alimentation et la région d'exutoire sont voisines. Dans un système d'écoulement intermédiaire, la région alimentaire et la région d'exutoire peuvent être séparées, sur la carte, par un ou plusieurs systèmes locaux : donc les lignes d'écoulement passent au-dessous des systèmes locaux. Enfin, le

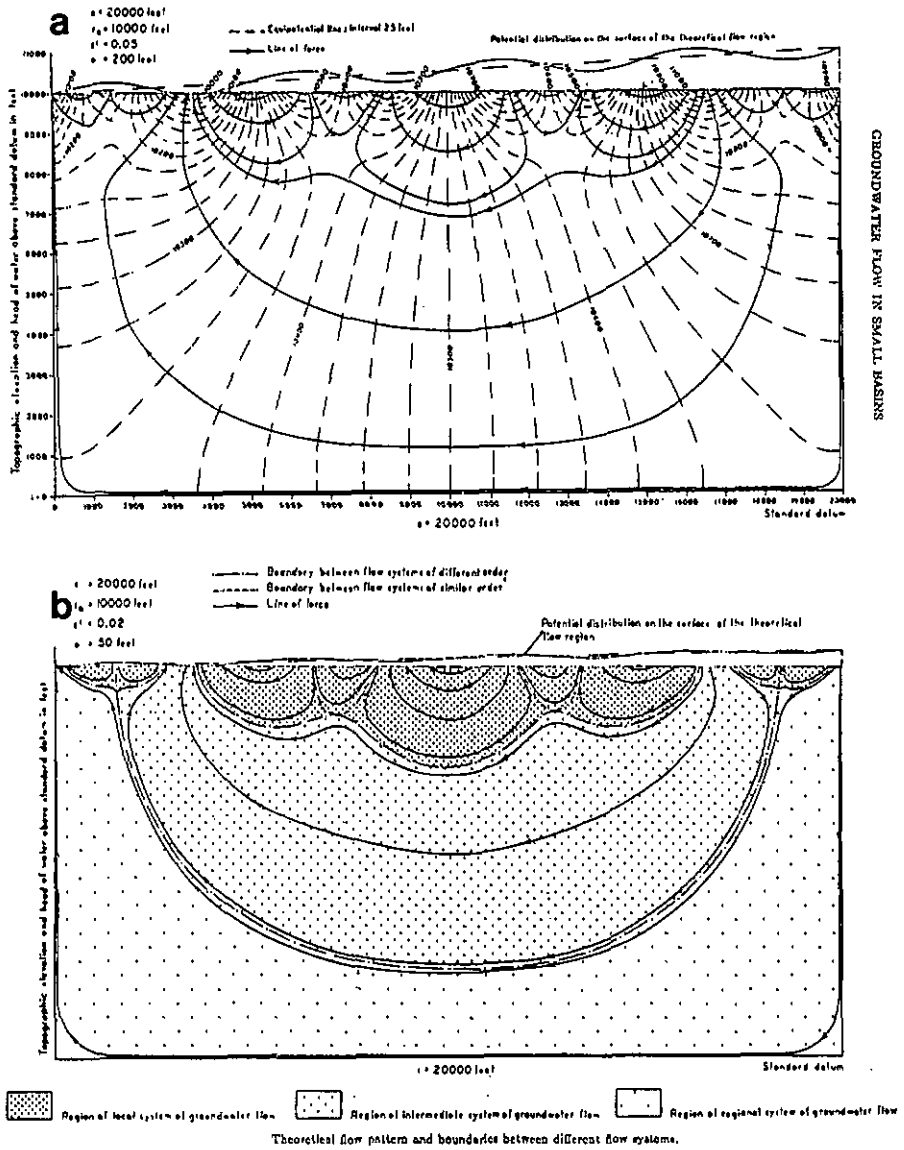


Figure 2.6: **a, b** : *Juxtaposition et superposition des systèmes d'écoulement : l'aquifère (d'après* TOTH, *1962, 1963)*

système d'écoulement est considéré comme régional si la zone d'alimentation s'étend jusqu'aux limites supérieures du bassin hydrogéologique et si la région d'exutoires occupe les limites inférieures du bassin, les lignes d'écoulement passant au-dessous des systèmes intermédiaires et locaux (KIRALY, 1978). Appliqué au karst, l'unité hydrogéologique est représentée par un volume de roche peu perméable délimité dans l'espace par des conduits faisant office d'exutoire.

Le système d'écoulement facilite le choix d'un modèle puisqu'il est nécessaire de connaître en tous points d'un volume délimité, les lignes de courant, donc des équipotentielles pour le visualiser. L'aquifère n'est donc pas un objet statique mais une structure dynamique qui interagit avec son environnement.

2.4.1.2 *Choix d'un modèle*

Pour bien comprendre comment agissent les différents facteurs, rassemblés pour constituer l'environnement et la structure physique de l'aquifère, il est indispensable de définir l'aquifère dans un cadre théorique cohérent. Définir un cadre théorique revient à choisir un modèle unique compatible avec notre objectif. Ce choix du modèle est directement lié à notre intention principale qui est de retracer les écoulements souterrains au sein d'un aquifère.

Après avoir défini l'aquifère comme une juxtaposition et superposition de systèmes d'écoulements, que le moteur des écoulement et la différence de potentiel entre deux points de l'aquifère, le modèle choisi doit permettre de délimiter l'aquifère en volume et de calculer en différents points une valeur du potentiel. Le modèle décrivant l'écoulement de l'eau dans la zone saturée est représenté par l'équation générale (BEAR, 1979 ; de MARSILY, 1981) :

$$S_s.\frac{\partial \phi}{\partial t} + div(-K.\vec{grad}\phi) + Q = 0q \tag{2.1}$$

où S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique $[L^{-1}]$; Q l'alimentation ou prélèvement à l'intérieur de la nappe $[L^3T^{-1}L^{-3}]$ et ϕ le potentiel hydraulique [L], avec,

$$\phi = (\frac{p}{\rho g}) + z \tag{2.2}$$

où p est la pression $[L^{-1}MT^{-2}]$; ρ la masse volumique $[ML^{-3}]$; g l'accélération de la pesanteur $[LT^{-2}]$; z l'altitude $[L]$ et avec, le flux de Darcy $[L^3T^{-1}L^{-2}]$:

$$\vec{q} = -K\vec{grad}\phi \tag{2.3}$$

où, K est la "perméabilité des hydrogéologues" $[LT^{-1}]$

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \tag{2.4}$$

avec k le tenseur de perméabilité intrinsèque $[L^2]$; μ la viscosité dynamique $[ML^{-1}T^{-1}]$.

Le transfert de l'eau entre la surface du sol et l'exutoire de l'aquifère karstique peut être schématisé par la figure 2.7. Le modèle mis en œuvre ne simule que le transfert de l'eau dans

la zone noyée et nous donnons une forme arbitraire à la fonction d'alimentation de la zone saturée.

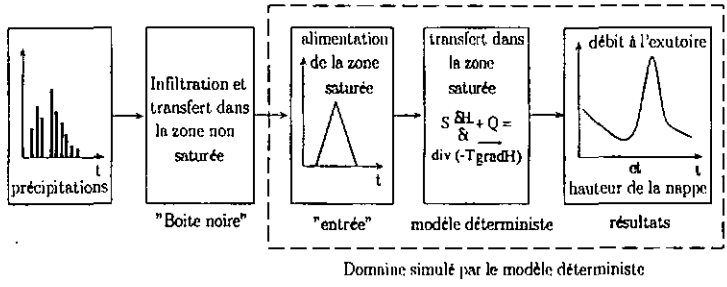


Figure 2.7: *Transfert de l'eau entre la surface du sol et la source (d'après* KIRALY *et* MOREL. *1976b)*

L'environnement, partie intégrante de l'aquifère, se restreint dans le modèle aux quantités d'eaux qui arrivent ou qui sortent, aux limites du volume pris en considération. Le problème qui se pose est celui de la traduction des paramètres environnementaux du système réel en conditions aux limites du volume du schéma abstrait. En règle générale, elle s'opère en transformant des altitudes aux exutoires en potentiels imposés et les infiltrations efficaces sur le bassin versant de l'aquifère en flux d'eau aréal. Ces paramètres (altitude des exutoires, infiltration efficace) sont les manifestations de l'environnement sur le volume considéré.

La modélisation des aquifères karstiques. Il s'agit de la réalisation du schéma abstrait que nous avons défini dans les paragraphes précédents et qui pourrait être, selon l'objectif, représenté par l'équation du transport de matières dissoutes.

2.4.1.3 Réalisation du schéma abstrait

Pour mettre en évidence des lignes équipotentielles nous utiliserons un modèle numérique à éléments finis. Ce modèle utilisant la technique de GALERKIN (KIRALY, 1985) permet en outre de tenir compte d'une alimentation distribuée (infiltration efficace) variable dans le temps. La simulation des aquifères ne dépend que des caractéristiques physiques (champ de perméabilités, des coefficients d'emmagasinement) et des conditions aux limites que le manipulateur fixe lui-même.

Le mécanisme du recours à la modélisation illustré par la figure 2.8 comporte un niveau d'abstraction qui est la conceptualisation d'un schéma et un deuxième niveau qui est la réalisation de ce schéma.

Cette première étape d'abstraction : la création d'un schéma abstrait dépend principalement des intentions. Elle ne prend en compte que certains éléments de la réalité, éléments qui seront traduits sous forme physique. La complexité de la réalité, en l'occurrence les aquifères

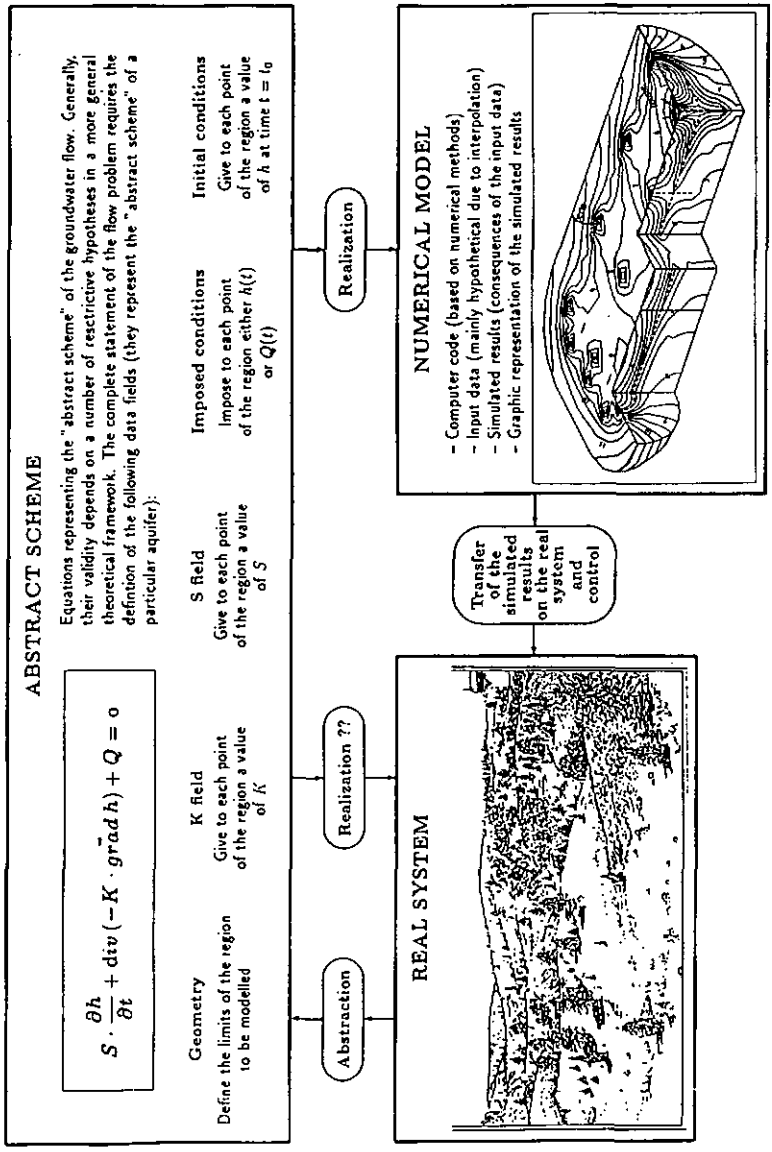


Figure 2.8: *Processus du recours à la modélisation (d'après* KIRALY, *1993)*

karstiques, ne nous permet pas de maîtriser ce système dans sa totalité. Les relations quantitatives entre les différents éléments retenus correspondant à des lois physiques, équations, qui ne sauraient traiter de tous les problèmes à la fois. Il faut être conscient des limites de validité du schéma dès qu'on le met en œuvre. Avec le schéma choisi l'écoulement turbulent ne peut être évoqué car il utilise la loi de DARCY.

2.4.1.4 De la réalisation du schéma abstrait à la réalité physique

Il se pose maintenant le problème du retour du modèle (après réalisation) à la réalité physique. L'exactitude mathématique des opérations entreprises ne suffit pas à garantir le sens physique du résultat. Le problème est maintenant de donner un sens physique, contrôlable aux niveaux des observations de terrain, aux opérations abstraites qui ont été réalisées sur le modèle mathématique. Il faut donc vérifier, en fonction de nos connaissances acquises sur le système réel, les résultats obtenus par la réalisation du modèle, en bref qu'elle est la signification réelle des résultats simulés. Par exemple, les analyses chimiques doivent corroborer les résultats des simulations obtenus pour les écoulements de l'eau souterraine; la particularités des hydrogrammes simulés doivent "se calquer" sur celles des hydrogrammes réels.

Cette étape cruciale montre que le modèle n'est jamais identique à la réalité. D'innombrables aspects du réel "lui" échappent toujours.

Ce processus de travail, qui est la base de toute simulation, est remarquable car les résultats obtenus par la réalisation du modèle doivent être reformulés en termes physiques vis à vis de la réalité. La cohérence entre le monde physique et les résultats représente la sanction de l'étude : la boucle de la figure 2.8 est ainsi refermée. L'intérêt d'élaborer une telle démarche pour résoudre un problème est que nous devons toujours ménager l'équilibre entre la réalité et le modèle.

L'intention de cette étude est d'évaluer nos connaissances sur les mécanismes de fonctionnement des aquifères développés en "terrains karstiques" et cela, en utilisant différentes méthodes largement employées ces dernières années.

Partie II

Etude des hydrogrammes des sources karstiques dans l'identification du fonctionnement hydraulique par des méthodes hydrologiques et statistiques

Chapitre 3

Utilisation des hydrogrammes de décroissance des débits pour appréhender la structure du bassin et des différentes composantes de l'écoulement souterrain

Avant-propos

L'analyse des hydrogrammes des sources karstiques est largement employé pour inférer sur la structure, la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et les composantes de l'écoulement souterrain. Cette démarche est fondée dans la mesure où la réponse hydrodynamique d'une source karstique dépend de nombreux éléments comme la géométrie de l'aquifère, la perméabilité des zones capacitives, le développement du réseau karstique, l'étendue du massif, l'influence de la couverture végétale, du sol, le stockage d'eau en surface sous forme de neige (SCHOELLER, 1967).

Dans ce chapitre, les techniques présentées s'appliquent exclusivement sur les parties décroissantes des hydrogrammes c'est à dire depuis la pointe d'une crue jusqu'au début de la crue suivante. Nous rappelons brièvement le sens des divers termes employés. En considérant un hydrogramme de type averse, il est possible de distinguer sur la courbe les parties suivantes (figure 3.1) : (i) Une partie représentant la montée de la crue appelée courbe de concentration, (ii) Une zone de diminution des débits, après le paroxysme de la crue, appelée courbe de décrue et (iii) Une zone dite de tarissement correspondant à une décroissance lente du débit durant un temps relativement long.

Si certains auteurs utilisent l'allure de l'hydrogramme de décroissance des débits pour déduire un fonctionnement global de l'aquifère (SOULIOS, 1991), d'autres ajustent différents schémas sur l'hydrogramme observé pour mettre en évidence des paramètres caractérisant l'bydrogramme et qui permettent d'induire un fonctionnement de l'aquifère (DROGUE, 1972; MANGIN, 1975; FORKASIEWICZ et PALOC, 1967).

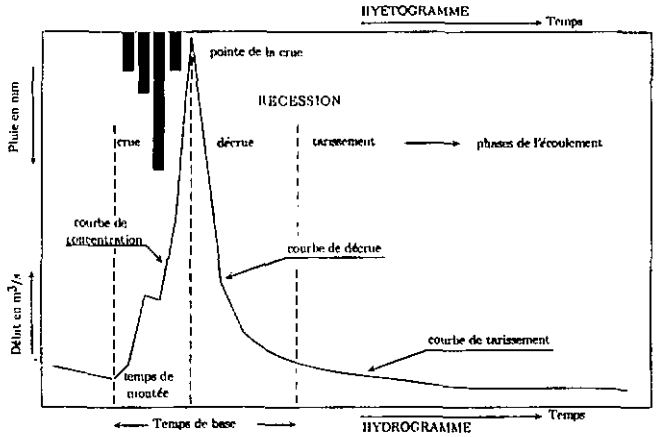


Figure 3.1: *Représentation des diverses parties d'un hydrogramme simple : courbe de concentration, courbe de décrue et courbe de tarissement; des diverses phases de l'écoulement, crue, décrue et tarissement*

3.1 Introduction et objectif de l'étude

Aux impulsions pluviales, l'aquifère karstique répond par des variations de potentiel hydraulique, de vitesses d'écoulement, de température et de composition chimique. Les hydrogrammes constituent les réponses du karst, au niveau des exutoires.

L'interprétation des hydrogrammes des sources par diverses fonctions mathématiques, ayant ou non une signification physique et une schématisation prédéfinie de l'aquifère, est très souvent pratiquée par les hydrogéologues. Deux buts essentiels sont projetés :

1. Le premier objectif est purement prédictif, il concerne le pronostic des débits. L'utilisation de différents schémas permet de prédire des débits minimaux pendant la saison sèche, d'extrapoler des débits caractéristiques d'une courbe de récession en ne connaissant que le début de la courbe de vidange et d'évaluer les réserves naturelles écoulables des nappes souterraines drainées par les exutoires des aquifères.

2. Le deuxième objectif est moins direct. Les paramètres obtenus lors de la décomposition des hydrogrammes permettent d'inférer les caractéristiques physiques et les mécanismes qui régissent les fonctions capacitives et conductrices de l'aquifère karstique.

L'hétérogénéité extrême des massifs en ce qui concerne leurs caractéristiques hydrodynamiques et les conditions d'alimentation, les structures peu connues des réservoirs et les conditions de limites hypothétiques sont susceptibles de compromettre l'interprétation des résultats.

En regard des travaux réalisés ces dernières années, il est raisonnable de se demander si l'information contenue dans l'hydrogramme de récession, et décryptée lors de sa décomposition, est suffisante pour déduire la structure du karst, et conclure sur son fonctionnement hydraulique.

Dans ce chapitre, nous présentons divers procédés d'analyse pour décomposer des hydrogrammes des sources karstiques. L'incidence de ces différentes décompositions des hydrogrammes sur l'interprétation du "fonctionnement" et de la "classification" des aquifères karstiques est analysée.

L'ajustement de différentes fonctions mathématiques destinées à s'identifier à une partie de l'hydrogramme observé est toujours subordonné à un bon nombre d'hypothèses conditionnelles concernant le comportement de l'aquifère karstique.

Dans le chapitre 5, nous utiliserons la simulation d'une série de bassins karstiques théoriques en faisant varier, cas par cas, les facteurs structuraux et environnementaux de l'aquifère. La simulation numérique des écoulements souterrains est abordée dans le but de vérifier des hypothèses hydrogéologiques. L'analyse des hydrogrammes simulés permettra de mettre en évidence les critères d'interprétation les plus pertinents, dans une reconstruction "raisonnable" de la structure du karst étudié.

3.2 Historique des différents schémas utilisés pour l'analyse des hydrogrammes de récession des sources karstiques

Historiquement, la décomposition des hydrogrammes a été utilisée pour prédire des débits caractéristiques. Dans ce cas, la palette d'outils mis à la disposition de l'utilisateur autorise une description de la totalité de la récession ou seulement une partie d'entre-elle. Le schéma le plus souvent utilisé est simple. Il s'agit d'une décroissance exponentielle des débits correspondant à la vidange d'un réservoir. Sur cette base théorique, certains auteurs ont tenté de décrypter une décroissance complexe des débits telle qu'on la trouve pour un aquifère karstique. Dans ce cas, la schématisation de l'aquifère peut différer.

Ce n'est qu'au milieu des années soixante dix, que la décomposition des hydrogrammes des sources karstiques fut mise en œuvre pour acquérir implicitement une connaissance sur la structure du karst étudié et donc sur les circulations d'eau souterraine (cf. figure 3.2).

3.2.1 Analyse des périodes de tarissement des sources karstiques

Destinée à traduire la décrue d'un cours d'eau (ROCHE, 1963; REMENIERAS, 1965), la formule de MAILLET (1905) admet la décroissance exponentielle des débits en fonction du temps. Ce schéma peut s'appliquer à la vidange des sources karstiques. L'intérêt d'une telle technique est de calculer le coefficient de tarissement α et d'évaluer le volume d'eau libre écoulable emmagasiné dans la couche aquifère (évidemment cela suppose une couche aquifère homogène et isotrope ainsi qu'une alimentation uniformément répartie dans le temps et dans l'espace). De

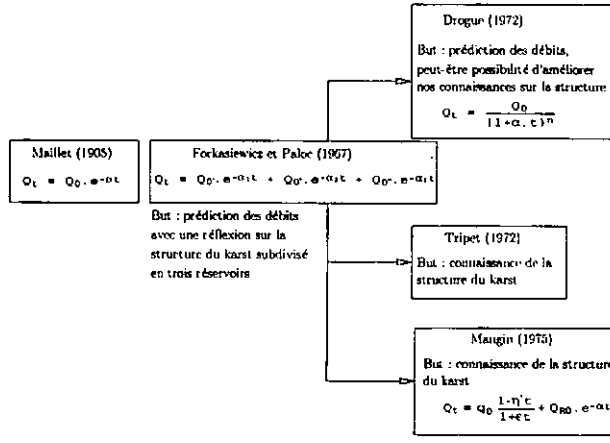


Figure 3.2: *Présentation historique des schémas permettant une décomposition ou l'analyse des hydrogrammes des sources karstiques*

plus, connaissant α et Q_0, il est possible de calculer n'importe quel débit en fonction du temps. La formule exponentielle est la plus souvent utilisée pour l'interprétation du tarissement des sources. Lorsque l'on utilisation un tel outil l'objectif est avant tout prédictif.

3.2.1.1 Formule utilisée et mise en œuvre

Cette formule, décrite par MAILLET (1905), est de la forme :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \text{ ou } \ln Q_t = \ln Q_0 - \alpha \cdot t \tag{3.1}$$

où t, représente le temps [T]; Q_0 le débit à l'instant $t = 0$ $[L^3 \cdot T^{-1}]$; Q_t le débit à l'instant t $[L^3 \cdot T^{-1}]$; e, 2,78 base des logarithmes népériens et α le coefficient de tarissement de la source $[T^{-1}]$.

En diagramme semi-logarithmique, cette expression est représentée par une droite dont la pente permet de déterminer le coefficient de tarissement α, résultat de la loi de vidange de la couche aquifère (COUTAGNE, 1948; CASTANY, 1967).

L'intégration de la formule (3.1) permet d'appréhender le stock d'eau disponible, représenté par les réserves souterraines écoulables, à un instant t à partir du débit Q_t correspondant à cet instant :

$$\text{Volume du stock écoulable} = Q_0 \int_{t=0}^{\infty} e^{-\alpha \cdot t} dt = \frac{Q_0}{\alpha} \cdot C \tag{3.2}$$

pour $t = t_0$, C représente une constante. Si le débit est exprimé en $m^3 \cdot s^{-1}$ et α en j^{-1} alors, C est égal à 86400.

3.2.1.2 Interprétation et réflexion sur la structure du karst (représentation de l'aquifère)

SCHOELLER (1967) explicite la signification physique du coefficient de tarissement α qui apparaît dans l'équation 3.1 par :

$$\alpha = \frac{a \cdot K}{m_e \cdot X} \tag{3.3}$$

où, K est le coefficient de perméabilité de DARCY $[LT^{-1}]$; m_e la porosité effective dynamique [1]; X la longueur de la nappe [L] et a une constante [1].

Selon la formule (3.3), le coefficient de tarissement est fonction directe de la perméabilité du milieu et fonction inverse de la surface réellement occupée par l'eau dans l'aquifère, donc de la porosité efficace et des dimensions du réservoir.

D'après les travaux de BURGER (1956), SCHOELLER (1967), BERKALOFF(1967), DROGUE (1967, 1972), TRIPET (1969, 1972) et FORKASIEWICZ et PALOC (1967), la partie non exponentielle de la courbe de récession correspond à la vidange des zones très perméables c'est à dire du réseau karstique transmissif et la courbe de tarissement exponentielle correspond à la vidange des zones peu perméables capacitives c'est à dire des fissures de petites dimensions.

L'application d'une fonction exponentielle, pour les sources karstiques, montre qu'il n'est pas possible de "ramener" la décroissance des débits en période de vidange à une seule fonction exponentielle. La partie supérieure de l'hydrogramme est une courbe concave et indique, que lors de la décrue au sens large, il existe plusieurs régimes de vidange de décroissance des débits qui se superposent.

3.2.2 Analyse de la totalité des courbes de récession en une seule fonction hyperbolique

L'ajustement hyperbolique ne représente pas un schéma physique du karst. Afin de traduire la totalité de la courbe de récession, c'est à dire du sommet de la crue jusqu'à la fin du tarissement, certains auteurs ont recherché des schémas applicables aux aquifères karstiques. Aussi, différentes fonctions furent proposées, et appliquées avec succès à divers types de sources karstiques.

Comme pour la formule de MAILLET, l'objectif de l'application d'une telle fonction est principalement prédictif même s'il permet de mettre en évidence certaines caractéristiques des aquifères étudiés. Son utilisation permet de prévoir le débit de la source en fonction de débit Q_0 observé à l'instant t_0, en ne connaissant que le début de la courbe de vidange.

3.2.2.1 Formule utilisée et mise en œuvre

La formule de TISON (1960), admet la décroissance de débit en fonction du temps comme l'inverse de sa racine carrée :

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1+\lambda \cdot t \cdot \sqrt{Q_0})^2} = \frac{Q_0}{(1+\alpha \cdot t)^2} \text{ où } \lambda = \frac{\alpha}{\sqrt{Q_0}} \tag{3.4}$$

La formule donne :

$$\lambda_t = \frac{1}{\sqrt{Q_t}} - \frac{1}{\sqrt{Q_0}} \text{ où } \alpha_t = \frac{\sqrt{Q_0}}{\sqrt{Q_t}} - 1 \tag{3.5}$$

et, permet le calcul du coefficient de tarissement α.

Dans le cadre d'un travail effectué sur le régime de tarissement de la Foux-de-la-Vis (Gard; France), FORKASIEWICZ et PALOC (1967) ont été amenés à établir la formule suivante, assez simple d'utilisation puisqu'elle a l'avantage d'être la même pour toute la période de vidange de l'aquifère karstique. L'évolution du débit en fonction du temps peut s'écrire par :

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1+\mu \cdot t \cdot Q_0)^{0,5}} = \frac{Q_0}{(1+\alpha \cdot t)^{0,5}} \text{ où } \mu = \frac{\alpha}{{Q_0}^2} \tag{3.6}$$

Concernant la fonction (3.6), on remarque son analogie avec la formule (3.4). En effet, les deux formules précédentes citées apparaissent comme une fonction hyperbolique de la forme générale :

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1+b \cdot t \cdot Q_0^{\frac{1}{x}})} = \frac{Q_0}{(1+\alpha \cdot t)^x} \text{ où } b = \frac{\alpha}{Q_0^{\frac{1}{x}}} \tag{3.7}$$

où x varie entre 0,5 et 3. Les travaux de DROGUE (1972), basés sur l'analyse d'une centaine de courbes de récession de différentes sources karstiques, indiquent que la totalité d'une décrue peut se faire à l'aide de la fonction établie, qui se trouve être une généralisation de la formule (3.7) de FORKASIEWICZ et PALOC (1967) :

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1+\alpha.t)^n} \tag{3.8}$$

et en utilisant pour n, les valeurs de 1/2, 3/2 et 2, selon l'importance de l'écart qu'il y a entre le débit initial et débit final.

3.2.2.2 Interprétation et réflexion sur la structure du karst (représentation de l'aquifère)

Contrairement aux modèles exponentiels, l'ajustement hyperbolique ne représente pas un schéma physique du karst. Pour établir une relation entre les paramètres α et n, DROGUE introduit un coefficient β indépendant de Q_0 dans l'hyperbole et qui s'écrit :

$$\beta = \alpha \cdot Q_0^{\frac{-1}{n}} \tag{3.9}$$

Ce coefficient qui a la signification d'une pente, est représentatif d'un point d'eau. Sa valeur est en relation avec les caractéristiques de celui-ci, et de son alimentation. Il s'écrit :

$$\beta = \frac{\alpha}{\sqrt[n]{Q_0}} = F(\frac{K}{E \cdot R \cdot S}) \tag{3.10}$$

avec, R la superficie du karst; E étant l'état d'humidité du karst et du sol lié au régime pluviométrique antérieur à la crue; K la perméabilité du karst et S le coefficient d'emmagasinement du karst.

On remarque, que le contraste entre une décrue rapide et un tarissement lent est d'autant plus important que α et n sont grands, une décrue lente entraînera un coefficient β faible. DROGUE (1972), étudie la répartition statistique de la fonction hyperbolique sur 100 récessions observées. La fonction qui statistiquement est la plus représentative est celle dont l'exposant n a pour valeur 3/2.

Les formules de MAILLET et de TISON avec leurs variantes ont été établies en supposant que la vidange de la partie noyée des aquifères correspond à une vidange de réservoir homogène et isotrope. Malgré ces contraintes, d'innombrables applications, sur des bassins mêmes relativement petits, ont montré que la décroissance des débits suit approximativement une telle évolution exponentielle pour partie ou byperbolique pour la totalité de l'hydrogramme. Si, l'une ou l'autre des formules (3.1) et (3.8) ne représente pas les valeurs observées d'une façon satisfaisante, un principe fréquemment utilisé consiste à additionner plusieurs courbes du type (3.1), ou des types (3.1) et (3.8), auxquelles on attribue des paramètres différents, de façon à obtenir une résultante qui soit une expression convenable des débits mesurés à la source.

Faisant suite aux formules de type (3.1) et (3.8), certains auteurs ont tenté d'ajuster d'autres fonctions mathématiques sur l'hydrogramme mais dans le but d'améliorer les connaissances hydrogéologiques sur la géométrie et le fonctionnement du karst. La place donnée à une telle étude serait remarquable puisqu'elle nous permettrait d'appréhender la répartition de divers facteurs structuraux dans l'aquifère karstique par une méthode indirecte.

3.2.3 Décomposition des courbes de récession des sources karstiques en plusieurs fonctions exponentielles

Sur la base d'une réflexion sur la schématisation du karst. FORKASIEWICZ et PALOC (1967) constatent qu'il est possible de décomposer les différentes courbes de récession d'une source karstique, depuis la partie terminale rectiligne de la courbe de décroissance, en trois fonctions exponentielles, dont les coefficients respectifs sont α_1, α_2 et α_3 (figure 3.3).

Si l'ajustement de fonctions mathématiques sur l'hydrogramme observé permet de pronostiquer des débits caractéristiques. l'intérêt est tout autre. Les auteurs infèrent sur la structure de l'aquifère dans l'interprétation des fonctions exponentielles qui sont attribuées à trois différentes sortes d'écoulement dues à la coexistence de plusieurs types de porosité dans le bassin d'alimentation.

Depuis cette étude, plusieurs applications furent tentées avec succès (TRIPET, 1972; DODGE, 1983; GRASSO, 1993; KIRALY et MOREL, 1976b). Il faut noter toutefois, que SCROELLER

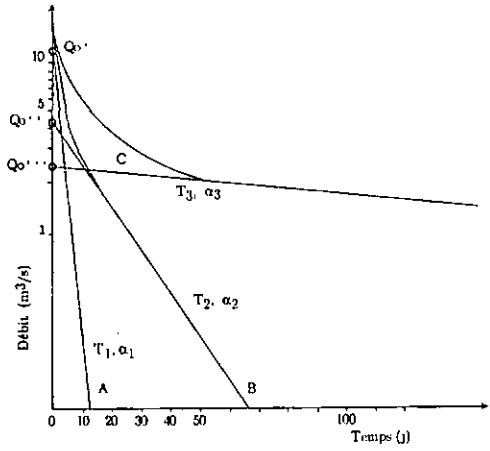


Figure 3.3: *Hydrogramme simple et sa décomposition en trois fonctions exponentielles (A, B et C). Chaque exponentielle est caractérisée par un coefficient de tarissement (α_1, α_2 et α_3), un temps marquant le début du tarissement (T_1, T_2 et T_3) ainsi qu'un débit initial lors du sommet de la crue ($Q_{0'}$, $Q_{0''}$ et $Q_{0'''}$). (d'après* FORKASIEWICZ *et* PALOC, *1967)*

(1967) utilise le même principe pour décomposer un hydrogramme en plusieurs classes de perméabilité.

3.2.3.1 Formule utilisée et mise en œuvre

De la pointe de la crue jusqu'à la fin du tarissement, le débit de la source à l'instant t sera donné par la somme de trois exponentielles :

$$Q_t = Q_{0'} \cdot e^{\alpha_1 \cdot t} + Q_{0''} \cdot e^{\alpha_2 \cdot t} + Q_{0'''} \cdot e^{\alpha_3 \cdot t} \tag{3.11}$$

où Q_0 représente le débit à l'instant $t = 0$ $[L^3 \cdot T^{-1}]$. La somme de $Q_{0'}$, $Q_{0''}$ et de $Q_{0'''}$ étant égale au débit observé à l'instant t_0. L'intégration de la troisième exponentielle représentant la vidange des microfissures permet d'évaluer le stock d'eau écoulable contenu dans les réserves souterraines à partir d'un instant t, début du tarissement, jusqu'à l'infini. Il est possible de calculer des réserves écoulables pour chacune des parties de l'aquifère.

3.2.3.2 Interprétation et réflexion sur la structure du karst (représentation de l'aquifère)

La circulation de l'eau dans le karst utilise les réseaux des vides crées par la fissuration et la dissolution dans les roches carbonatés. L'eau circule donc dans des joints d'écartement variable,

leurs caractères géométriques et par conséquent leurs perméabilités sont distribués de façon continue. L'importance et le rôle de chacun des réseaux de vide qui se superposent dépend des dimensions moyennes des vides caractérisant chaque réseau. On distingue généralement trois réseaux principaux dans le karst : les gros conduits et chenaux, les grandes fissures et les microfissures, mais il est évident que tous les intermédiaires entre ces trois catégories peuvent "cohabiter". Cette hétérogénéité du bassin karstique provoque l'apparition de vitesses de circulation différentes, et la vidange plus rapide des réseaux des gros conduits et fissures par rapport à la vidange des petites fissures. Avec ce modèle les différences de vidange sont illustrées par la possibilité de décomposer l'hydrogramme en plusieurs composantes différentes de l'écoulement, caractérisées chacune par leur propre coefficient de tarissement.

On doit toutefois signaler, que les trois ou plusieurs α calculés habituellement pour chaque hydrogramme simple conduiraient à accepter l'existence de réseaux avec des dimensions de vides bien définies, ce qui n'est pas toujours le cas dans le karst où l'on rencontre le plus souvent des réseaux à dimensions intermédiaires entre celles des gros et celles des petits réseaux. Néanmoins, la relation entre les coefficients de tarissement d'une source, calculés selon la décomposition de l'hydrogramme, pourrait informer sur la structure du bassin : plus les valeurs de α seraient différentes, plus le bassin serait hétérogène, tandis que, plus les valeurs de α seraient similaires plus homogène serait le bassin.

La décomposition graphique des épisodes de décrue en plusieurs fonctions exponentielles est à la base des modèles hydrométéorologiques (MERO, 1978; MERO et GILBOA, 1974). Le schéma est basée sur la vidange de réservoirs multiples. Appliquée sur des hydrogrammes de sources karstiques elle permet de reconnaître les différentes composantes de l'hydrogramme et leurs caractéristiques. Dans ce cas l'aquifère est subdivisé en quatre unités d'écoulement caractérisées par des temps de tarissement et des débits initiaux différents (MERO, 1978). Une utilisation, appliquée au karst, en est donnée par exemple dans BEZES (1976); MANIA et RAMON (1980); JACQUEMIN (1984); DROGUE et GUILBOT (1977) .

3.2.4 Décomposition de la totalité des courbes de récession des sources karstiques en deux fonctions mathématiques différentes

Afin de mettre en évidence les différences de structure dans le karst, MANGIN (1975) décompose un hydrogramme simple en deux fonctions caractérisant chacune un écoulement particulier. L'auteur propose avec les paramètres mis en jeu après la décomposition un classement des aquifères étudiés. Ce classement synthétise le karst étudié sous la forme d'un point projeté dans un repère d'axe $x - y$. L'aquifère est ainsi caractérisé par deux paramètres, i et k, se rapportant respectivement au fonctionnement de la zone d'infiltration et du karst noyé (figure 3.4). L'ensemble des points projetés représente les karsts étudiés. Ces points ne se projettent pas tous au même endroit, il existe des réponses différentes du karst donc des structures différentes. C'est la comparaison d'un maximum d'aquifères étudiés et relativement bien connus qui fournira des renseignements sur la structure et le fonctionnement de ceux-ci.

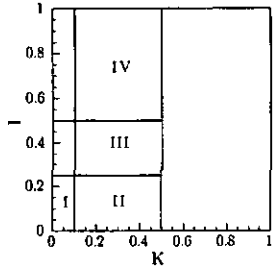


Figure 3.4: *Classification des aquifères karstiques en fonction des décompositions des hydrogrammes de récession (d'après* MANGIN, *1975) I : Système très karstifié en aval. Réseau spéléologique très développé. II : Réseau spéléologique développé, débouchant en aval sur un important karst noyé. III : Système plus karstifié en amont qu'en aval, avec des retards dans l'alimentation dus, soit à des terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante. IV : Domaine des systèmes complexes.*

3.2.4.1 Formule utilisée et mise en œuvre

La courbe de récession simulée est caractérisée par l'infiltration rapide à travers la zone non saturée et la vidange lente du karst noyé (figure 3.5). Partant de cette idée, MANGIN (1975) utilise comme expression du débit en fonction du temps la formule suivante :

$$Q_t = \Psi_t + \Phi_t \tag{3.12}$$

où Ψ_t prend en compte des eaux d'infiltration - partie non-exponentielle de la courbe de récession - et Φ_t tenant compte des eaux de réserves - partie exponentielle de la courbe de récession-. Pour la décrue, ce même auteur propose un ajustement au moyen d'une fonction homographique sans signification physique de type :

$$\Psi_t = q_0 \frac{(1 - \eta^{'} \cdot t)}{(1 + \epsilon \cdot t)} \tag{3.13}$$

Pour le tarissement, il introduit une décroissance exponentielle des débits sur le même principe que la formule (3.1). L'équation modélisant le débit en fonction du temps devient donc :

$$Q_t = q_0 \frac{(1 - \eta^{'} \cdot t)}{(1 + \epsilon \cdot t)} + Q_{R0} \cdot e^{-\alpha \cdot t} \tag{3.14}$$

où, $\eta^{'}$ est un paramètre pouvant âtre rapporté à la durée ou à la vitesse de l'infiltration $[T^{-1}]$; ϵ un coefficient d'hétérogénéité caractérisant la concavité de la courbe de décrue $[T^{-1}]$; q_0 est égale à Q_{t0} - Q_{R0}, étant le débit des eaux d'infiltration au moment de la pointe de la crue $[L^3T^{-1}]$ et q_0 et Q_{R0} étant des débits caractéristiques de la crue définis sur la figure 3.5 $[L^3T^{-1}]$.

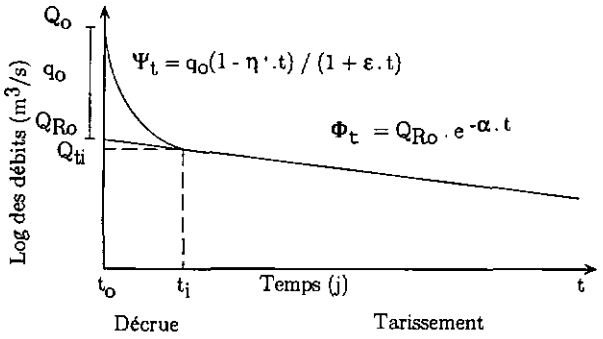


Figure 3.5: *Représentation d'un hydrogramme simple par l'ajustement d'une fonction homographique notée Ψ_t et d'une fonction exponentielle notée Φ_t (d'après* MANGIN, *1975)*

La détermination des paramètres η' et ϵ n'est pas immédiate. La courbe Φ_t étant construite, on détermine point par point la courbe Ψ_t. Un changement de variable permet de linéariser la fonction :

$$-Y = \frac{t_i - t}{q^*} \tag{3.15}$$

avec

$$q^* = q_0 \frac{(1 - \eta' \cdot t)}{(1 + \epsilon \cdot t)} \tag{3.16}$$

Au temps t_i la fonction q^* devient nulle et le coefficient pouvant être rapporté à la durée ou à la vitesse de l'infiltration est égal à :

$$\eta' = \frac{1}{t_i} \tag{3.17}$$

où t_i représente la durée de l'infiltration après le passage de la pointe de crue [T]. Sur la figure 3.5, ce moment est marqué par une rupture de pente sur l'hydrogramme simple et cela dans un repère semi-logarithmique. Le paramètre ϵ représente la concavité de la courbe de décrue, il est appelé coefficient d'hétérogénéité. On l'obtient par la formule :

$$\epsilon = \frac{q_0 - q^*}{q^* \cdot t} - \frac{\eta' \cdot q_0}{q^*} \tag{3.18}$$

Pour le calcul de ϵ on choisira des points présentant un bon alignement sur la droite obtenue par changement de variable. Il est à noter, que q_0 représente la différence entre le débit Q_0 de l'exutoire pour $t = 0$ et Q_{R0}.

Pour permettre la comparaison avec d'autres systèmes karstiques, deux paramètres sont proposés : le paramètre i qui est égal à la valeur de $y = \frac{1-\eta' \cdot t}{1+\epsilon \cdot t}$ pour t = 2 jours et le paramètre

k qui est égal au volume dynamique sur le volume moyen de transit. Le paramètre i caractérise la forme de l'hydrogramme de décrue et k traduit l'importance du karst noyé.

Une application de cette technique est donnée dans les travaux de MANGIN, (1975, 1982); DODGE, (1983); MUET, (1989); SCHOUWEY, (1989); MONDAIN, (1991); GRASSO, (1993); MEUS, (1993); TISSOT et TRESSE, (1978); JEANBLANC et SCHNEIDER, (1981); CROCHET *et al*, (1992), etc.

3.2.4.2 Interprétation et réflexion sur la structure du karst (représentation de l'aquifère)

Ce schéma englobe à la fois la vidange de la zone saturée et son alimentation ayant transité par la zone dite d'infiltration (figure 2.5, chapitre 2). La partie non-exponentielle de l'hydrogramme est une caractéristique du mode d'infiltration (ruissellement souterrain) et la courbe de tarissement résultat de la vidange des zones capacitives de l'aquifère c'est à dire du karst noyé.

La zone d'infiltration est caractérisée par des fissures élargies de densité relativement faible, possède une perméabilité très importante et renferme parfois des réserves en eau "non négligeables" qui constituent les aquifères épikarstiques.

Le karst noyé quant à lui, est organisé selon une ossature centrale constituée de galeries ou de conduits principaux, la zone transmissive. En dehors, il est constitué d'un ensemble de vides anastomosés, répartis en ensembles bien délimités indépendants les uns des autres mais en relation avec les chenaux, les "systèmes annexes", il s'agit de la zone capacitive de l'aquifère.

L'hydrogramme de récession est partagé en deux unités : (1) La zone d'infiltration c'est à dire la zone non saturée, (2) Le karst noyé c'est à dire la zone saturée.

3.2.5 Décomposition des hydrogrammes simples des sources karstiques : Application à une source du Jura neuchâtelois

Certains auteurs ont modifié les formules exposées précédemment pour l'étude d'une source particulière. TRIPET (1969), utilise une formule de tarissement mieux adaptée à la source vauclusienne de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse). Le régime climatique particulier à la région est responsable de la fréquence élevée des crues de cette source et, par conséquent, de la courte durée des périodes de régime non influencé. L'auteur tient compte lors de la décomposition, de la variation continue du coefficient α, interprétée comme la continuité de la distribution des dimensions des joints.

La décomposition qui va suivre ne correspond pas à une formule particulière. TRIPET (1972), introduit lors de la décomposition d'un hydrogramme simple une représentation conceptuelle du fonctionnement hydraulique de la zone noyée pas à pas, du début de la crue jusqu'à la fin du tarissement. Dans la zone noyée, les fissures sont séparées en deux classes - très et peu perméables - constituant respectivement le système du 2^e et 1^{er} ordre. Le régime du système d'écoulement dépendra principalement de la fréquence et de la configuration de ces deux types de joints : les plus perméables étant les plus rares et les moins perméables étant

les plus fréquents. L'importance des classes intermédiaires sera moindre. Le schéma ainsi établi permet d'évaluer l'état de la nappe entre ces deux classes de perméabilité et de décrire les relations hydrauliques existante entre elles. La décomposition de l'hydrogramme simple et par conséquent l'évolution, recharge et vidange, des réserves de tarissement sera en parfaite cohérence avec le régime de l'écoulement souterrain ainsi schématisé (figure 3.6).

Une telle interprétation a été rendue possible par l'enregistrement en continu des variations du niveau d'eau dans cinq forages, implantés dans le bassin, et par de nombreux travaux hydrogéologiques antérieurs.

L'inversion de gradient entre le réseau transmissif et les blocs capacitifs est dû à une montée plus rapide du niveau d'eau dans le réseau, conséquence directe d'une importante alimentation concentrée dans ces zones à forte perméabilité. Ce phénomène a été relaté dans de nombreux travaux SCHOELLER (1967), DROGUE (1969, 1980, 1991), DROGUE et RUECH (1968), BERTRAND *et al.* (1973), KIRALY et MOREL (1976b), il s'agit d'une caractéristique de l'aquifère karstique conséquence du très fort contraste de conductivité hydraulique entre les zones capacitives et le réseau adjacent, et de l'alimentation directe du réseau par une infiltration rapide et concentrée.

3.3 Application : Analyse des hydrogrammes de récession de la source de la Milandrine par différents modèles (Canton du Jura, Suisse).

Dans ce paragraphe nous appliquons les différentes décompositions d'hydrogramme, à l'exutoire de la Milandrine, aquifère karstique test située dans le Jura suisse. Le bassin se situe dans la partie nord-ouest de la Suisse; sa superficie est de 5 km^2. Il s'agit d'un plateau calcaire, très karstifié, présentant des formes typiques de la morphologie karstique. L'intérêt de ce site réside sur les nombreux travaux effectués à ce jour : études spéléologiques, permettant la reconnaissance d'un réseau karstique actif, tests hydrauliques sur près de vingt forages implantés dans divers contextes géologiques et pour la plus part sur des critères de géophysique radiomagnétotellurique, délimitation du bassin versant de l'exutoire à partir de nombreux essais de traçage ainsi que divers relevés de fissuration (GRETILLAT, 1992; GRASSO, 1993; TURBERG, 1993; KIRALY *et al.*, 1971; SIMEONI et JAMIER, 1975; MEURY-FLURY-RIEBEN, 1991).

L'objectif d'une telle étude comparée est de constater que l'adéquation des modèles présentés aux hydrogrammes réels est correcte. En ayant l'objectif de pronostiquer quelques débits particuliers nous pouvons mettre en œuvre différents modèles sans grande variation au niveau des résultats.

Au cours des quatre dernières années d'enregistrement en continu des débits, cinq hydrogrammes simples de crue furent retenus et décomposés selon les modèles en plusieurs exponentielles, selon FORKASIEWICZ et PALOC, hyperbolique de DROGUE et composite de MANGIN justifiant la courbe de récession en deux fonctions. Parmi ces courbes de récession étudiées, nous présentons sommairement les ajustements des différents modèles pour la période du 16 mai au 5 octobre 1991. Tous les résultats de cette étude sont regroupés dans les annexes.

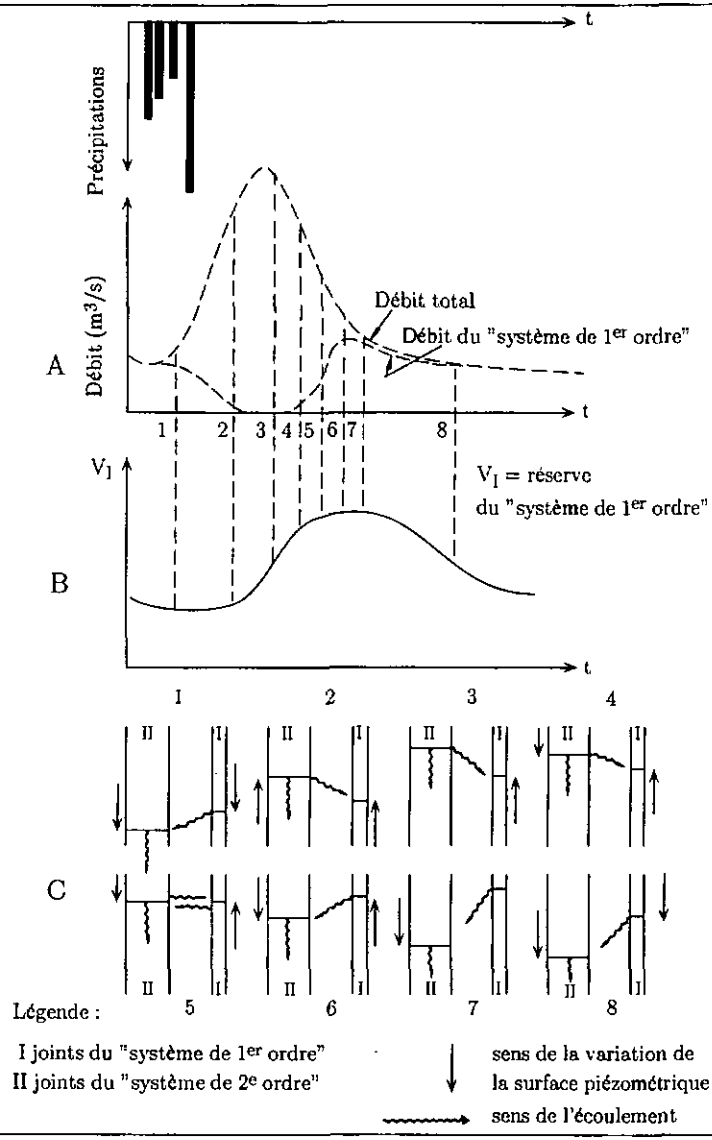


Figure 3.6: *Illustration d'un schéma théorique du régime de l'écoulement souterrain pour les aquifères karstiques (d'après* TRIPET, *1972)*

3.3.1 Décomposition de la courbe de récession en plusieurs fonctions exponentielles

Avec un tel modèle, lors de l'interprétation des résultats, le karst est constitué de trois réservoirs se vidangeant à différentes vitesses et que la recharge se réalise dans les trois réservoirs. Dans ce cas, la courbe de récession étudiée peut àtre décomposée en trois fonctions exponentielles (figure 3.7a). Le débit de la source, que l'on assimile dans ce cas à la somme de trois composantes d'écoulements s'écrit :

$$Q_t = 179,6 \cdot e^{-1,32 \cdot t} + 33 \cdot e^{-0,108 \cdot t} + 17,4 \cdot e^{-2,231 \cdot 10^{-3} \cdot t} \tag{3.19}$$

Comme l'illustre la figure 3.7a, l'ajustement du modèle est satisfaisant et cela pour les cinq hydrogrammes étudiés (voir annexes). Ce modèle permet évidemment de calculer le volume écoulable d'eau libre emmagasiné dans la couche aquifère. Les résultats de cette décomposition sont regroupés dans le tableau 3.1.

Paramètres du modèle	Décrue du 16 mai au 5 octobre 1991 (142 j)
Q_{01} l/s	179,6
Q_{02} l/s	33
Q_{03} l/s	17,4
α_1 j^{-1}	1,32
α_2 j^{-1}	0,108
α_3 j^{-1}	$2,231 \cdot 10^{-3}$
Réserves m^3	609'131

Tableau 3.1: *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition*

3.3.2 Décomposition de la courbe de récession en une fonction hyperbolique

L'utilisation d'une fonction hyperbolique selon DROGUE n'entraîne aucune hypothèse préalable sur le fonctionnement de l'aquifère. Une fonction hyperbolique de type (3.8), pouvant traduire la courbe de récession a été recherchée conformément au principe décrit par DROGUE (1972). Elle a comme équation :

$$Q_t = \frac{220}{(1 + 1,034 \cdot t)^{0,346}} \tag{3.20}$$

L'hyperbole correspondante est illustrés à la figure 3.7b.

L'ajustement du modèle, sur les différents hydrogrammes observés, est satisfaisant. La formule hyperbolique donne une représentation correcte de l'hydrogramme de récession de l'exutoire de la Milandrine (figure 3.7b).

Paramètres du modèle	Décrue du 16 mai au 5 octobre 1991 (142 j)
Q_0 l/s	220
α	1,034
n	0,346
V_e m^3	234'692
V_c m^3	240'222
$E = V_e - V_c/V_c \cdot 100$	-2,36

Tableau 3.2: *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition*

3.3.3 Décomposition de la courbe de récession en deux fonctions mathématiques

De nombreux travaux réalisés dans les pays francophones utilisent une telle approche pour décomposer les courbes de récession des sources karstiques (MANGIN, 1975, 1982; DODGE, 1983; MONDAIN, 1989; MUET, 1989; SCHOUWEY, 1989; MEUS, 1993; TISSOT et TRESSE, 1978; JEANBLANC et SCHNEIDER, 1981; CROCHET *et al.* 1992; etc.). L'équation modélisant le débit en fonction du temps (3.14), devient pour une application sur la source de la Milandrine :

$$Q_t = 203\frac{(1 - 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot t)}{(1 + 0,07 \cdot t)} + 17,4 \cdot e^{-2,231 \cdot 10^{-3} \cdot t} \qquad (3.21)$$

Une fois de plus, l'adéquation du modèle à l'hydrogramme observé est correcte (figure 3.7c).

Paramétres du modèle	Décrue du 16 mai au 5 octobre 1991 (142 j)
Q_0 l/s	220
Q_{R0} l/s	17,4
q_0 l/s	203
t_i h	1500
α j^{-1}	$2,231 \cdot 10^{-3}$
ϵ	0,07
η	$6,7 \cdot 10^{-4}$
V_e m^3	234'692
V réserves m^3	240'222

Tableau 3.3: *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition*

Il est possible de dresser une typologie des aquifères karstiques étudiés sur la base de paramètres mis en jeu lors de la décomposition des bydrogrammes. Les paramètres i et k obtenus pour l'exutoire de la Milandrine permettent de situer cette source sur le diagramme

de classification des systèmes karstiques, de la comparer à d'autres aquifères et d'en tirer ses caractéristiques.

3.4 Conclusions

Nous concevons sur la base de cet exemple, qu'il s'agit des objectifs de l'étude qui guident le choix du modèle et non un ajustement optimum d'un de ces modèles sur l'hydrogramme observé. En effet, en regard des différentes simulations et en ayant l'objectif de pronostiquer des débits particuliers, dans tous les cas l'ajustement sur l'hydrogramme observé est satisfaisant donc remplit pleinement l'intention. Pour ce cas, le choix du modèle est laissé à l'utilisateur. En revanche, si en utilisant ces outils notre objectif est d'améliorer nos connaissances sur l'hydrogéologie du karst, on doit se poser des questions : sur la véracité des hypothèses qui sont à la base de l'interprétation des résultats provenant des décompositions, sur la validité des résultats obtenus plus précisément sur leur signification physique, sur leur pertinence à décrire la structure du karst étudié, sur la signification de l'information contenue dans l'hydrogramme. Dans ce cas, la simple adéquation du modèle à la réalité ne suffit plus et l'emploi de telle ou telle formule est subordonnée à un bon nombre de suppositions sur le fonctionnement des aquifères karstiques. Par exemple, peut-on admettre que les trois exponentielles caractérisent la vidange de trois réservoirs aux propriétés différentes ? Les paramètres i et k obtenus lors de la décomposition caractérisent-ils effectivement l'infiltration à travers la zone non-saturée et la zone noyée de l'aquifère ? etc ...

La figure 3.8 présente une classification (k versus i) de quatre sources karstiques du Jura et Préalpes suisse. Pour une même source la dispersion des points représentant les courbes de récession décomposées sur plusieurs années est trop importante pour que l'on puisse accepter une valeur moyenne comme représentative de l'exutoire étudié. De plus, un exutoire étudié peut-être classé selon différentes possibilités !

Pour donner quelques éléments de réflexions supplémentaires, il paraît indispensable de mieux cerner l'influence de divers facteurs sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques. Pour cela, nous utiliserons le schéma présenté dans le chapitre 2 et proposons une étude dans le chapitre 5 mettant en œuvre un modèle numérique de simulation déterministe.

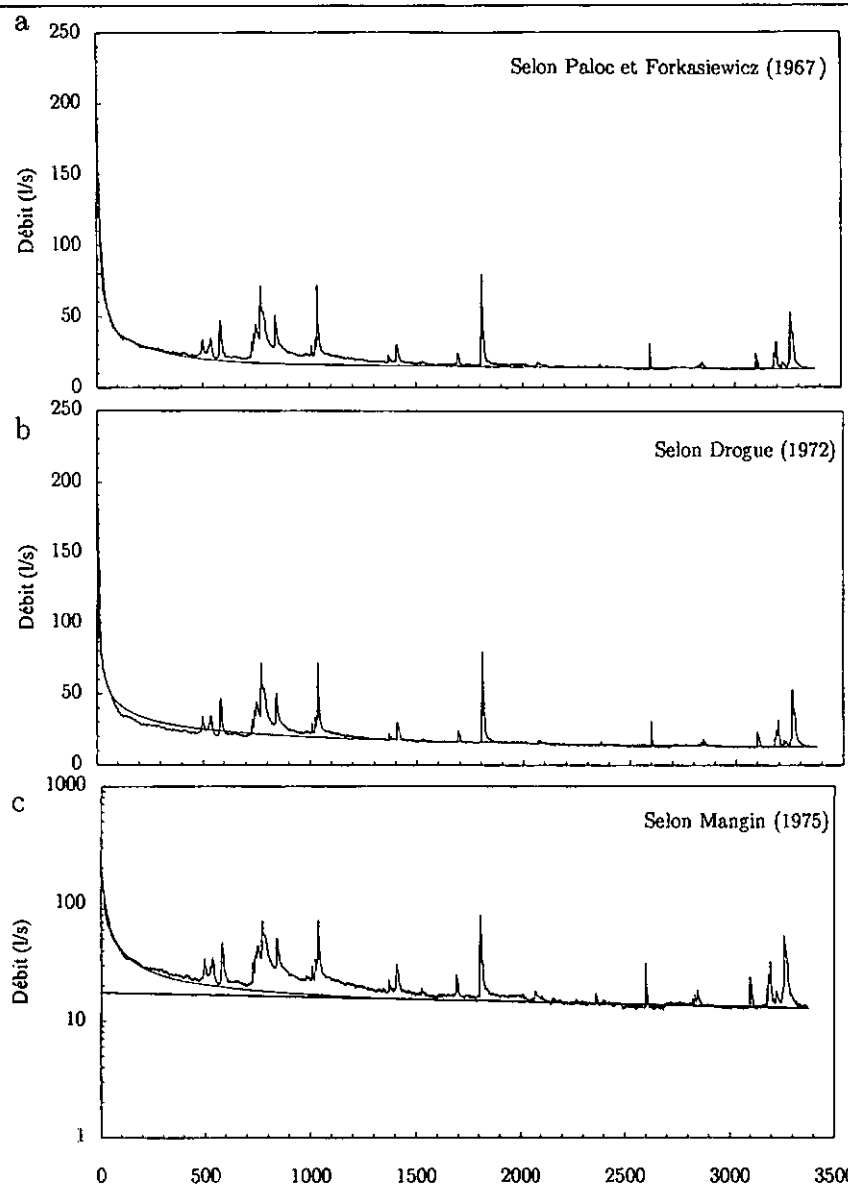


Figure 3.7: *Décomposition d'une crue de la source karstique de la Milandrine (Suisse, Canton du Jura).* **a** *: Selon* FORKASIEWICZ *et* PALOC *(1967).* **b** *: Selon* DROGUE *(1972).* **c** *: Selon* MANGIN *(1975). (évolution des débits versus temps (h))*

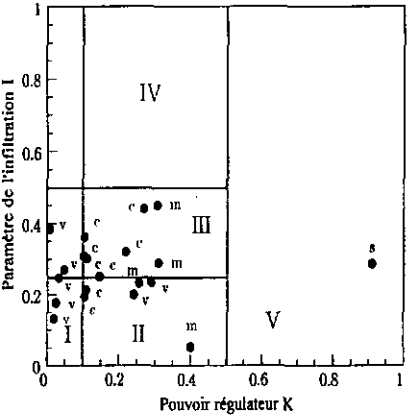


Figure 3.8: *Classification selon les paramètres i et k tirés de la décomposition des hydrogrammes de récession: v:source de la Venoge (VD), s:source de Sandli (FR), c:source de la Cressonière (VD) et m:source de la Milandrine (JU).*

Chapitre 4

Utilisation de la totalité des hydrogrammes des sources karstiques pour appréhender le fonctionnement hydrodynamique du karst

4.1 Introduction

Une des originalités de l'étude hydrogéologique des aquifères discontinus réside dans les données qui sont le plus communément exploitées. Il s'agit de séries de mesures inscrites dans un repère temporel (séries chronologiques décrivant l'évolution, des débits aux exutoires, des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines aux exutoires). Par ailleurs, les paramètres climatiques sont analysés à l'échelle du bassin versant en fonction des données disponibles (i.e. nombre de stations hydroclimatiques "représentatives" du bassin étudié).

L'intérêt d'analyser la totalité de la chronique, pour extraire un maximum d'informations, passe par une étude critique du choix du pas de temps d'échantillonnage. Ce dernier sera fonction de la variable à traiter (e.g. l'interprétation de la variabilité de la composition chimique de l'eau souterraine dépend, autant des conditions géologiques que des événements hydrologiques antérieurs).

L'analyse d'une série temporelle, consiste à décrire les mouvements qui la composent. Les outils utilisés peuvent fournir des renseignements sur (i) le système ayant généré la série temporelle, sur (ii) les relations dynamiques liant deux séries chronologiques (e.g. pluie-débit, pluie efficace-débit), et sur (iii) la prévision de valeurs futures. Les outils mis en œuvre pour analyser de telles séries temporelles font principalement appel aux corrélogrammes et aux spectres qui s'inspirent directement des méthodes du traitement du signal. D'autres outils statistiques permettent de dégager un comportement global des séries chronologiques par la mise en évidence de tendances et de cycles.

La richesse de la chronique dépend du pas de temps choisi pour l'échantillonnage (comme décrit précédemment). Le choix est guidé par la réponse dynamique ainsi que la superficie du

bassin versant de l'aquifère. Pour un exemple d'aquifère karstique théorique de 12 km^2, les différences sur l'hydrogramme simulé entre un échantillonnage des débits à la source de quatre heures et un jour se marquent par : (1) Une modification des sommets de crue, qui sont retardés et atténués; (2) Une modification de l'allure de la décrue proprement dite, c'est à dire la partie non exponentielle de la courbe de récession.

Il est donc indispensable d'adapter l'échantillonnage en fonction de l'aquifère étudié. Si cette considération semble triviale elle est peu souvent respectée.

Sont rassemblés dans ce chapitre : (1) Une description des outils utilisés pour l'analyse des séries; (2) Une synthèse sur l'intérêt que peut présenter l'utilisation des analyses corrélatoires et spectrales pour la connaissance des aquifères karstiques.

4.2 Les outils pour l'analyse des séries chronologiques

4.2.1 Analyse corrélatoire

L'analyse corrélatoire repose sur la fonction d'autocorrélation. Au départ, on dispose d'une série temporelle de N observations (x1,...,xN). On calcule les coefficients d'autocorrélation r_k ($k = 0, ..., m$). Lorsque k est égal à 0, r_k est égal à 1. Le choix de la variable m n'est pas fondé sur des concepts théoriques; dans la littérature, il est souvent conseillé de prendre $m = N/3$ ou $m = N/2$ (BOX et JENKINS, 1974; DAVIS, 1986). On peut utiliser d'autres valeurs de m, par exemple $m = 2N/3$.

Le calcul de r_k utilise la formulation : $r_k = \frac{C_k}{C_0}$ avec

$$C_0 = N^{-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \tag{4.1}$$

où $\bar{x}$ est la moyenne des observations, et

$$C_k = N^{-1} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \tag{4.2}$$

où $k = 0, ..., m$. On dresse le corrélogramme en établissant le graphe de la fonction r_k.

4.2.2 Spectre de variance

La transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation correspond à la densité spectrale énergétique de cette fonction. Cette densité spectrale n'est autre que la répartition des variances suivant les fréquences (VENTSEL, 1973). Une approche non biaisée de la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation est fournie par :

$$S_t = [1 + 2 \sum_{K=1}^{k=m} D_k r_k \cos 2\Pi F K] \tag{4.3}$$

où F est la fréquence considérée (si le pas choisi est j, $F = j/2 \cdot m$); r_k est le coefficient d'autocorrélation; D_k est une fonction de pondération choisie de manière à ce que la valeur estimée du spectre S_t ne soit pas biaisée; le filtre de Tukey est utilisé, et dans ce cas :

$$D_k = \frac{1 + \cos \pi k/m}{2} \tag{4.4}$$

L'analyse spectrale exprime dans le domaine fréquentiel ce dont le corrélogramme rend compte dans le domaine temporel. On peut distinguer, à l'aide de ces outils la tendance à long terme ainsi que les différentes périodicités rencontrées dans les chroniques. Sur le corrélogramme lorsque le phénomène aléatoire existe, la fonction d'autocorrélation décroît rapidement de 1 à 0. La cyclicité est marquée par des ondulations de la courbe. Sur le spectre de densité de variance la tendance est marquée par une forte valeur à l'origine. La cyclicité est marquée par un pic pour une fréquence particulière avec ses harmoniques aux multiples de cette fréquence. Quand le phénomène est aléatoire, la tendance générale du spectre s'assimile à une droite de pente nulle.

4.3 Utilisation des analyses spectrales et corrélatoires pour inférer sur la structure et le comportement dynamique des aquifères karstiques

Appliquées en hydrologie, ces analyses ont été particulièrement développées dans un but descriptif et comparatif (CHOW et KARELOTIS, 1970; YEVJEVITCH, 1972; JULIAN, 1967; GUERIN *et al.*, 1988). L'intérêt d'une telle étude réside dans l'analyse détaillée des chroniques en terme de structure et de propagation du signal (DREISS, 1982). Depuis les travaux de MANGIN (1981a,b, 1982, 1984), l'utilisation des analyses corrélatoires et spectrales, appliquées au karst, connaissent un vif succès.

Elles constituent une continuité dans l'étude hydrogéologique des aquifères karstiques dans la mesure où elles fournissent des informations complémentaires sur le comportement des aquifères étudiés. Les résultats obtenus à partir de ces outils donnent une vision plus synthétique du karst. Elles permettent d'analyser la totalité des chroniques. Elles ont donc l'avantage, par rapport aux décompositions d'hydrogrammes, d'englober toutes les informations inscrites dans la série et d'occasionner lors du traitement un gain de temps. Le karst étudié englobe la couverture pédologique et les terrains non-karstiques, la zone non-saturée de l'aquifère et la zone noyée. On étudie les fonctions de transfert, c'est à dire que l'on relie les variations du débit à la source aux précipitations qui constituent l'entrée du système.

Dans les paragraphes qui vont suivre, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'analyse des hydrogrammes et, dans une moindre mesure aux hyétogrammes.

4.3.1 Introduction

Le système étudié est considéré comme une boîte noire regroupant l'aquifère et son environnement. On traite les chroniques séparément (analyses simples) ou l'une par rapport à l'autre (analyses croisées), d'abord dans le domaine temporel (analyse corrélatoire) puis dans le domaine fréquentiel (analyse spectrale). Les résultats de ces analyses autorisent une classification des aquifères karstiques entre deux pôles évolutifs : un état initial correspondant à un aquifère mal drainé ayant des réserves importantes et un état final où la présence d'un réseau karstique développé et connexe entraîne un drainage maximal des volumes capacitifs de l'aquifère, et donc de faibles réserves. Comme lors de la décomposition des hydrogrammes, pour son interprétation l'auteur considère que les vides créés par la dissolution des carbonates sont organisés, hiérarchisés de l'amont vers l'aval.

Le système karstique est assimilé à un filtre qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans les chroniques. En fonction de sa structure, le signal d'entrée (les pluies) sera modifié et ces changements se visualiseront sur le signal de sortie (les débits). D'après les travaux de DODGE, (1983); MONDAIN, (1991); MUET, (1989); SCHOUWEY, (1989); MEUS, (1993); TISSOT et TRESSE, (1978); JEANBLANC et SCHEINDEH, (1981); BENAVENTE et MANGIN, 1984; ITTY et VINTAER, (1987); LEPILLER et MONDAIN, (1988); CROCHET *et al*, (1992); PADILLA et PULIDO-BOSCH, (1995), ce type d'analyse permet d'obtenir des informations sur le fonctionnement hydrodynamique et sur la structure du karst étudié par comparaison avec d'autres aquifères bien connus.

4.3.2 Rappel des différentes fonctions et leurs significations hydrologiques

4.3.2.1 Analyse dans le domaine temporel : le corrélogramme

Le corrélogramme simple traduit la dépendance des évènements entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grands. Un processus aléatoire ou au contraire bien structuré sera marqué par une décroissance plus ou moins rapide de la fonction d'autocorrélation. Appliqué à des séries de débits de systèmes différents, il témoigne de l'importance et du rôle régulateur des réserves globales des systèmes. Cette notion est à relier aux valeurs obtenues lors de la décomposition des hydrogrammes. Le nombre de jours nécessaire pour que le corrélogramme atteigne des valeurs inférieures ou égales à 0,2 définit "l'effet mémoire" dont la valeur plus ou moins grande est un indice de l'inertie du système et donne une idée de l'état de karstification et des réserves écoulables de l'aquifère.

Si le signal d'entrée est un phénomène quasi aléatoire et si le système est linéaire et invariant, le corrélogramme croisé représente la réponse impulsionnelle du système. La réponse à une impulsion pluie, dont l'intensité nette moyenne est prise comme unité, pouvant être assimilée à l'hydrogramme unitaire cette fonction devient un estimateur essentiel de la qualité de drainage et de l'importance des réserves.

Les corrélogrammes obtenus à partir d'hydrogrammes répondant à des conditions pluviométriques extrêmes, année excédentaire et déficitaire en pluies, et comparés au corrélogramme

moyen de l'aquifère permettent de visualiser le comportement des réserves (stockage et déstockage).

4.3.2.2 Analyse dans le domaine fréquentiel : le spectre

Pour étudier un signal, il est nécessaire de le décomposer suivant ses différentes composantes : aléatoire, périodique(s) et séculaire. Pour ce faire, on réalise une décomposition fréquentielle de la variance du signal : c'est le spectre du signal de densité. Deux paramètres facilitent son interprétation : (1) La fréquence de coupure correspond à la fréquence à partir de laquelle le contenu de la fonction d'entrée est filtré par le système. Cette fréquence sera d'autant plus basse que l'inertie du système sera prononcée. Ceci étant à rattacher à la structure du milieu; (2) Le temps de régulation, en jours, caractérise la durée d'influence d'une impulsion unitaire sur le système, c'est à dire la longueur de la réponse impulsionnelle.

Par analogie avec les techniques de traitement du signal, plusieurs fonctions décrivant les modalités du transfert de l'information ont été définies : (i) la fonction de phase apprécie pour chaque fréquence le déphasage entre le signal d'entrée et de sortie, (ii) la fonction de gain mesure l'amplification (gain supérieur à 1) ou l'atténuation (gain inférieur à 1) que subit le signal d'entrée lors de son passage dans le système et (iii) la fonction de cohérence est un estimateur de la linéarité du système entrée-sortie. Elle définit la corrélation entre les événements à l'entrée du système et ceux observés à la sortie. Son interprétation doit s'effectuer à l'aide de la fonction d'amplitude qui détermine la gamme de fréquence sur laquelle il existe, ou non, une transmission de l'information entre l'entrée et la sortie.

La démarche employée consiste à reconstituer le comportement du milieu par l'analyse des réponses globales d'un aquifère et comparer ces résultats à ceux d'autres systèmes.

Après avoir décrypté quelques fonctions d'autocorrélation et spectrale résultant de simples séries de points, nous nous attacherons à mettre en œuvre un modèle de simulation numérique (chapitre 6). Un fois encore, ces modèles théoriques conçus permettront, en particulier, de contrôler des hypothèses que tout hydrogéologue élabore inévitablement sur les propriétés hydrodynamiques du milieu, sur les conditions aux limites et sur le fonctionnement de l'aquifère.

4.3.3 Essais d'interprétation des analyses corrélatoire et spectrale

L'interprétation hydrogéologique, adoptée par les utilisateurs de telles analyses, se base sur la forme de la fonction d'autocorrélation et spectrale celles-ci découlant de l'allure des hydrogrammes. Il s'agit d'outils formalistes et donc se pose le problème de la quantité d'informations qu'il est raisonnable d'extraire des réponses globales de l'aquifère pour caractériser le comportement dynamique du karst.

Les quelques essais rassemblés dans les deux paragraphes qui vont suivre n'ont d'autre prétention que de visualiser l'influence de certains caractères morphologiques des chroniques sur les corrélogrammes simples et les spectres simples.

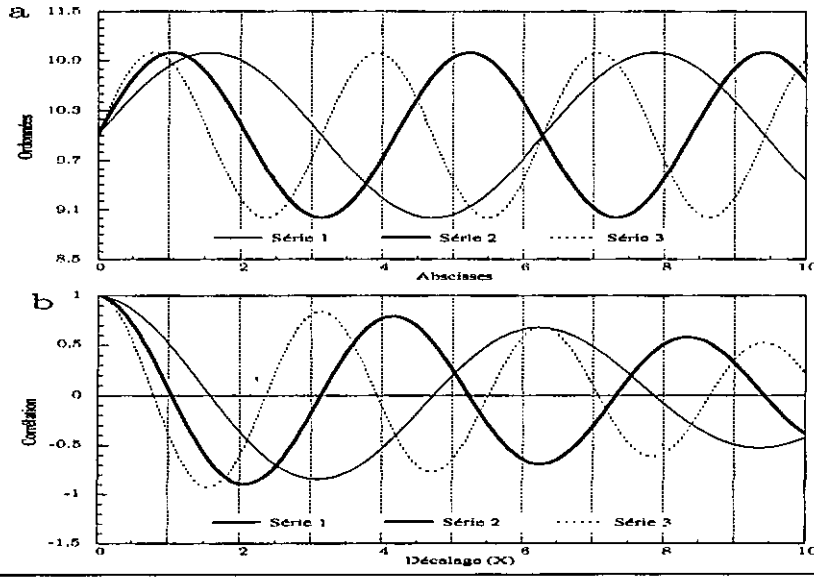


Figure 4.1: **a** : *Représentation de trois séries périodiques;* **b** : *Corrélogrammes simples de ces trois séries*

4.3.3.1 Influence de la forme de la chronique sur la fonction d'autocorrélation et du spectre de densité

L'illustration des figures 4.1a,b montre que si une série est périodique (figure 4.1a) sa fonction d'autocorrélation le sera également (figure 4.1b). La vitesse de décroissance du corrélogramme est d'autant plus rapide que la période de la série analysée est plus courte ou que la fréquence est plus grande. La décroissance de la fonction d'autocorrélation dépend, entre autres, de la fréquence des pics présents sur la chronique étudiée. Concernant les spectres de densité de ces trois séries, ils révèlent un pic pour la fréquence correspondant à la période des chroniques analysées.

La figure 4.2a présente trois séries trigonométriques. La série 1, caractérisée par une seule période alors que les séries 2 et 3 sont construites pas à pas par la sommation de la série 1 ainsi qu'une deuxième série possédant une période plus ou moins courte. La figure 4.2b représente les fonctions d'autocorrélations des trois séries : celles-ci sont périodiques. Pour les corrélogrammes des séries 2 et 3, la décroissance du coefficient de corrélation est toujours plus rapide que pour le corrélogramme 1. La périodicité secondaire de la série analysée entraîne un accroissement de la fonction d'autocorrélation. Ainsi l'allure générale des fonctions 2 et 3 oscillent autour du corrélogramme de la série 1. Concernant les spectres de densité de ces séries, ils révèlent un ou plusieurs pics pour la ou les fréquences correspondant à la ou les périodes des chroniques analysées.

Les figures 4.3a et 4.3b représentent des séries chronologiques différentes par le tracé du pic, aussi bien lors de la montée (figure 4.3a) que de la redescente (figure 4.3b). Plus la montée du pic sera rapide, plus la fonction d'autocorrélation décroîtra rapidement (figure 4.3c). Pour la figure 4.3b, la redescente des ordonnées est générée par une fonction hyperbolique dont le contraste, caractérisé par le produit α fois n, est plus ou mois grand. Le corrélogramme est également influencé par la décroissance des pics avec une décroissance de la fonction d'autocorrélation qui sera d'autant plus importante que le contraste sera grand. La forme du corrélogramme dépend de l'allure de la pente des deux côtés des pics, plus les pics de la série sont effilés, plus rapide est la décroissance du corrélogramme.

Les corrélogrammes de deux séries engendrés à partir d'une quelconque fonction (e.g. hyperbolique ou exponentielle) mais différent uniquement par la valeur à l'origine seront similaires. Bien évidemment, la fonction d'autocorrélation n'est pas influencée par la valeur des ordonnées de la série analysée.

4.3.4 Analogie avec les hydrogrammes de sources karstiques

L'analogie entre l'allure de ces séries et les hydrogrammes des sources karstiques est relativement aisée et permet de concevoir l'influence de certains paramètres de forme des hydrogrammes sur les fonctions d'autocorrélation et spectrale.

Il ressort de ces essais très simples, mais qui devaient être réalisés avant d'aller plus loin dans l'étude critique, que le tracé de la fonction d'autocorrélation résultant de l'analyse d'un hydrogramme dépend de deux caractéristiques principales de celui-ci : (1) De la périodicité des crues; (2) De la forme des crues (courbes de concentration et décrue plus tarissement).

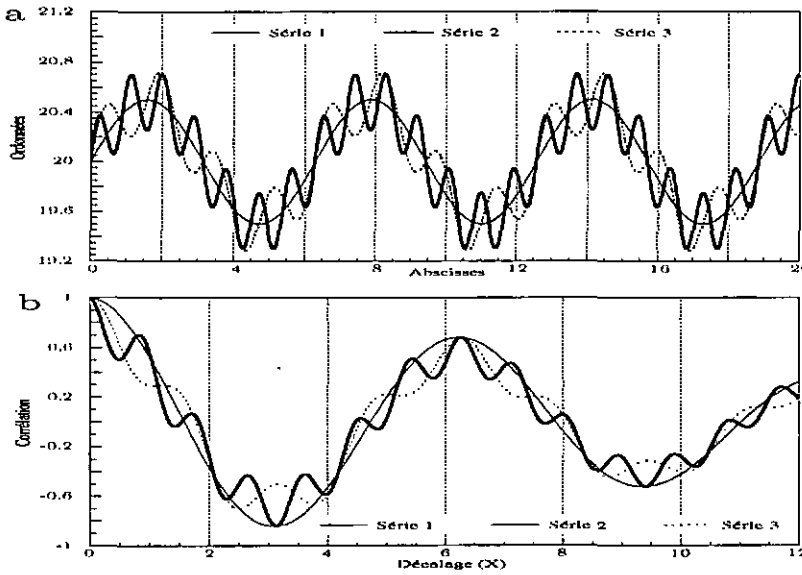


Figure 4.2: **a** : *Représentation de trois séries périodiques;* **b** : *Corrélogrammes simples des séries 1, 2 et 3*

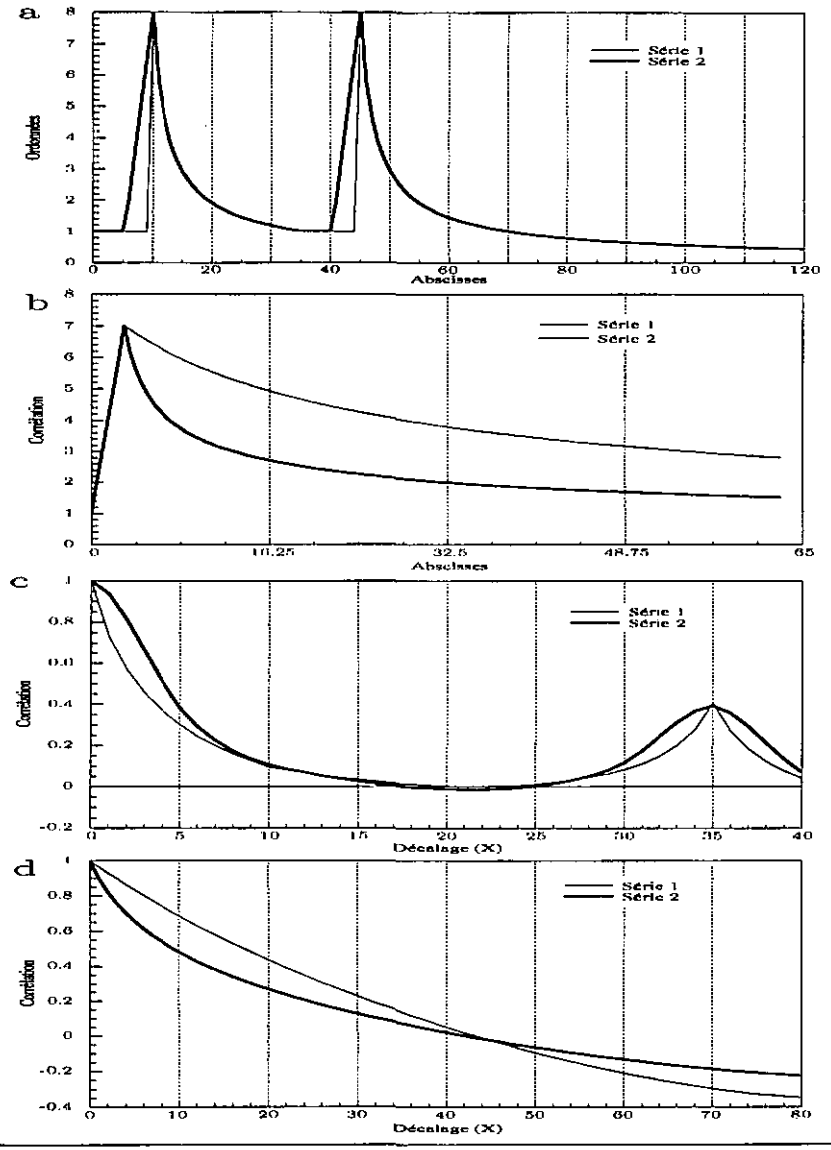


Figure 4.3: **a**, **b** : *Représentation de quatre séries périodiques;* **c**, **d** : *Corrélogrammes simples des différentes séries*

Plus la fréquence des crues est élevée plus la décroissance du corrélogramme est rapide. La répétition des crues pouvant-être due à la présence d'un réseau karstique actif collectant depuis la surface un volume d'eau précipité suffisant pour entraîner une augmentation des débits au niveau de l'exutoire (présence d'un réseau karstique plus d'un épikarst), à un régime particulier des précipitations répartie tout au long de l'année, la combinaison des deux étant une autre possibilité.

L'analyse corrélatoire ne tient pas compte de la valeur des débits. Si bien que deux hydrogrammes d'allure similaire, mais correspondant à deux bassins hydrogéologiques de taille différente, seront caractérisés par un même corrélogramme. Pour cette raison il nous semble indispensable de comparer des bassins de superficie et de régime pluviométrique semblables.

Les figures 4.4a,b, tirées de GRASSO, (1993), présentent la variation des débits à l'exutoire de la grotte de la Milandrine sur trois années. Pour le cycle hydrologique 1990-1991, le nombre de crues dépassant les 100 $l \cdot s^{-1}$ est plus faible que pour le cycle 1991-1992. La fréquence des crues est donc moins importante pour l'année 90-91. Cette variation de la fréquence des crues se répercute sur la fonction d'autocorrélation par une décroissance plus rapide du corrélogramme pour l'année 1991-1992 (figure 4.4c). Il est par conséquent difficile, sur la base de cette figure, d'appréhender la part de la variation du corrélogramme due à l'évolution des réserves de l'aquifère, de celle due à la fréquence des crues observée sur les hydrogrammes.

La figure 4.5a représente la variation des débits journaliers à la source de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse), et l'hydrogramme "lissé" par une moyenne mobile respectivement à 3, 7, 15 et 30 jours. Les fonctions d'autocorrélation de ces cinq séries sont regroupées sur la figure 4.5b.

Plus l'hydrogramme est lissé, c'est-à-dire plus la fréquence des pics est faible, plus la décroissance du corrélogramme est lente dénotant selon l'interprétation communément admise une inertie de l'aquifère de plus en plus grande avec des réserves importantes et un état de karstification de l'aquifère faible. Au niveau des spectres de densité le lissage des fréquences augmente l'amplitude des pics de basses fréquences (e.g. le pic correspondant au cycle hydrologique) et bien évidement lisse les hautes fréquences (figure 4.5c).

Le "lissage" des débits par une moyenne mobile ne modifie pas seulement la fréquence des crues mais également l'aspect de celles-ci. Plus les crues sont effilées plus la décroissance du corrélogramme sera rapide. L'aspect de la crue dépend de la présence d'un réseau karstique plus ou moins dense et connexe et également du contraste entre décrue rapide et tarissement lent c'est à dire de la coexistence de conduits fortement perméables d'un faible volume noyés dans une matrice capacitive d'un grand volume.

4.3.5 Application des analyses corrélatoires à deux aquifères karstiques suisses

Les analyses corrélatoires (débits-débits) ont été appliquées à deux aquifères karstiques du Jura suisse. Ces aquifères sont localisés dans le Jura suisse (Canton de Neuchâtel) (latitude 47°-longitude 6°). La source de l'Areuse draine deux synclinaux sur une superficie de 130 km^2. La source de la Serrière draine un synclinal avec un bassin versant de 80 km^2. La

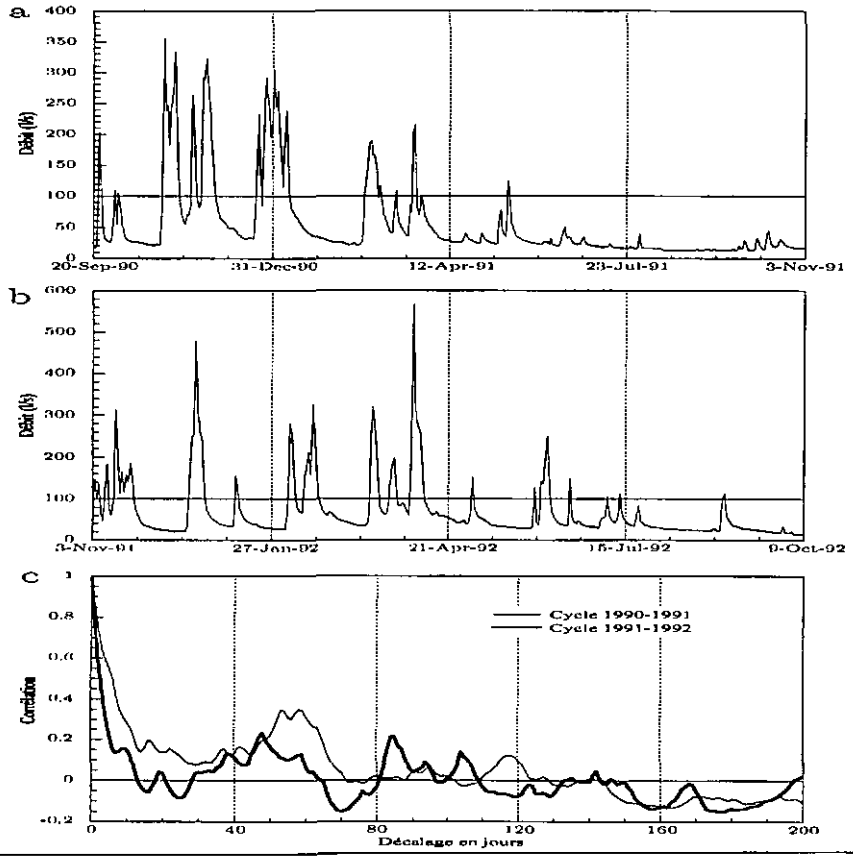


Figure 4.4: *Cycles hyrologiques à l'ezutoire de la grotte de la Milandrine (Canton du Jura, Suisse)* **a** *: Cycle 1990-1991;* **b** *: Cycle 1991-1992;* **c** *: Corrélogrammes simples des hydrogrammes (*GRASSO, *1993)*

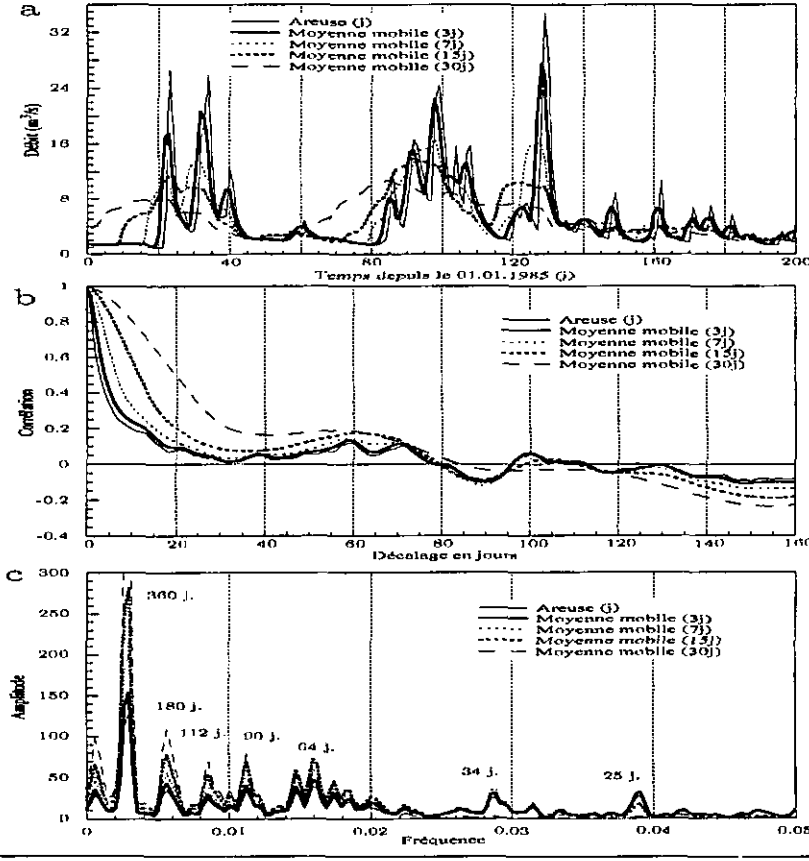


Figure 4.5: *a : Hydrogrammes de la source de l'Arcuse (Canton de Neuchâtel, Suisse); b : Corrélogrammes simples des hydrogrammes; c : Spectres de densité des différents hydrogrammes*

délimitation des aquifères est relativement bien assurée par les éléments litbologiques, structuraux, géomorphologiques et de nombreux essais de traçage (BURGER, 1959,1992). Les aquifères sont localisés dans les calcaires Jurassique du Malm (350 m). Le niveau quasi-imperméable est représenté par les marnes de l'Argovien (200 m d'épaisseur). Le bassin de l'Areuse et de la Serrière sont séparés par le bassin de la Noiraigue large de 4 a 6km. Le tableau 4.1 regroupe quelques caractéristiques hydrogéologiques de ces deux bassins. Ces informations sont tirées des travaux de TRIPET (1972) et MATHEY (1976).

Caractéristiques hydrogéologiques	Source de l'Areuse Jura neuchâtelois	Source de la Serrière Jura neuchâtelois
Superficie du bassin (km^2)	130	88
Altitude moyenne (m)	1115	1060
Aquifère principal	Malm	Malm
Module précipitation annuel (mm)	1520	1350
Evapotranspiration réelle (mm)	330	440
Débit moyen ($m^3 \cdot s^{-1}$)	4,9	2,5
Débit minimal ($m^3 \cdot s^{-1}$)	0,3	0,2
Débit maximal ($m^3 \cdot s^{-1}$)	51	11
Réserves écoulables ($10^6 \cdot m^3$)	38 (sur 10 ans)	12/16 (sur 5 ans)
Perméabilité (forages) ($m \cdot s^{-1}$)	$1 \cdot 10^{-6}/5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}/5 \cdot 10^{-7}$
Porosité efficace (forages) (%)	4,5	4,5

Tableau 4.1: *Caractéristiques hydrogéologiques sur les aquifères de l'Areuse et de la Serrière (Canton de Neuchâtel, Suisse).*

La figure 4.6 montre que l'allure générale des hydrogrammes observés est comparable. La fréquence des crues au cours de l'année est la même. Les deux bassins sont soumis au même régime climatique. Les débits de la source karstique de l'Areuse sont supérieurs d'un facteur 4 à ceux de la source karstique de la Serrière. Après le maximum de la crue, la décroissance des débits est plus rapide pour la source de l'Areuse. Apres cette chute rapide, les débits décroissent plus lentement. Ce contraste entre la chute rapide et la période stable de récession est moins marquée pour la source karstique de la Serrière (le contraste est une caractéristique des aquifères karstiques, DROGUE, 1972, KIRALY et MOREL, 1976a).

La figure 4.7 montre que le corrélogramme de l'Areuse décroît plus rapidement que celui de la source de Serrière. La fonction d'auto-corrélation atteint le seuil de r_k=0.2 respectivement à k=9jours pour l'Areuse et à k=27jours pour la Serrière. L'interprétation statistique indique que le bassin de la source de l'Areuse module très peu le signal d'entrée (cf. corrélogramme des précipitations). Ces résultats indiquent que le bassin de l'Areuse renferme des réserves écoulables moins importantes que celles de la Serrière, et par conséquent un réseau de drainage plus important. Ces interprétations qualitatives ne correspondent pas aux connaissances hydrogéologiques de terrain (TRIPET, 1972 et MATHEY, 1976, Tab. 4.1).

Les quelques considérations critiques sur l'interprétation des corrélogrammes, rassemblés dans les paragraphes précédents, mettent en exergue un problème d'interprétation hydrogéologique. Les exemples présentés nuancent quelque peu les interprétations traditionnelles. Par ex-

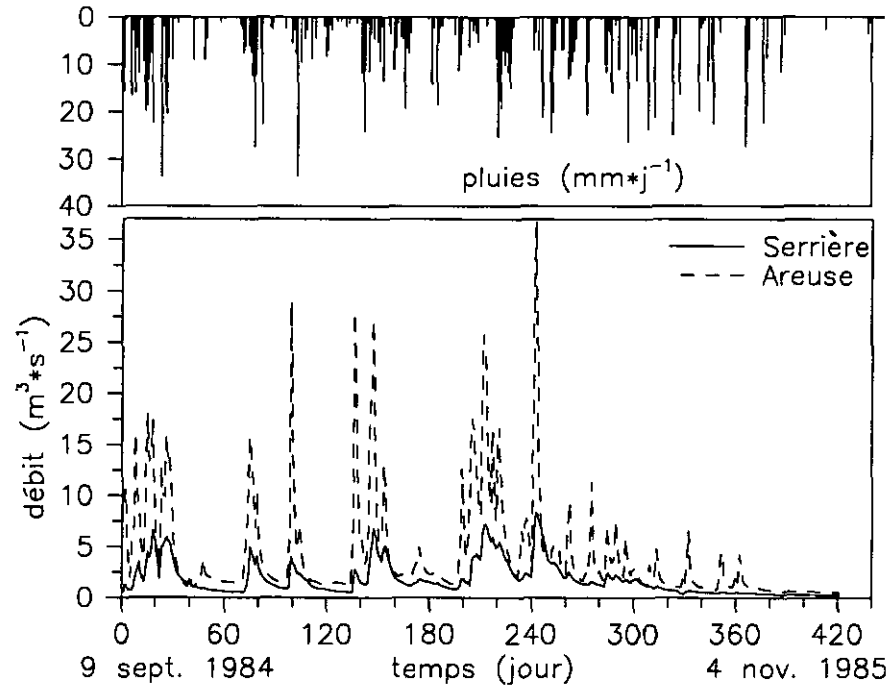


Figure 4.6: *Hydrogrammes des sources karstiques de l'Areuse (ligne en pointillée) et de la Serrière (ligne pleine) pour le cycle hydrologique 1984-1985. Les débits moyens journaliers sont collectés au niveau des stations fédérales limnimétriques (Canton de Neuchâtel, Suisse). Précipitations journalières pour la même période à la station climatique des Ponts-de-Martel (Canton de Neuchâtel, Suisse).*

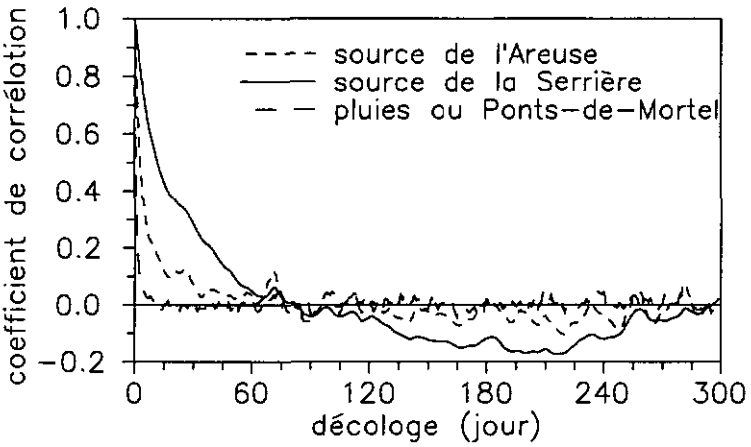


Figure 4.7: *Corrélogrammes (débits-débits) des sources de l'Areuse et de la Serrière pour 8 années hydrologiques (valeurs journalières de 1982-1989); Corrélogramme (précipitations-précipitations) à la station des Ponts-de-Martel (valeurs journalières de 1982-1989).*

emple, est-il raisonnable de comparer de la sorte des hydrogrammes "représentatifs" d'aquifères "typiques" ?

Suite à ces résultats sur des aquifères karstiques réels, différents bassins karstiques théoriques sont construits en utilisant la méthode des éléments finis. Le but est d'analyser plus finement les hydrogrammes simulés par les méthodes statistiques citées précédemment.

Partie III

La simulation numérique comme outil pour contrôler l'interprétation des hydrogrammes des sources karstiques

Chapitre 5

Utilisation d'un modèle de simulation numérique pour contrôler l'influence de divers facteurs, climatiques, géologiques et hydrogéologiques sur l'allure de l'hydrogramme des sources karstiques

A l'aide de modèles de simulation numériques il est possible de contrôler la cohérence des hypothèses émises sur les propriétés physiques de l'aquifère, comme la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement, l'alimentation, l'extension des aquifères. Ces tests de contrôle peuvent être réalisés pour l'interprétation de l'hydrogramme des sources karstiques.

5.1 Démarche adoptée

En simulant les hydrogrammes de plusieurs bassins karstiques théoriques simples, nous désirons tester l'influence de certains paramètres et par là-même des hypothèses mentionnées dans la partie précédente. Ainsi, nous montrons à travers quelques exemples d'hydrogrammes simples l'incidence de la configuration et de la structure de l'aquifère théorique.

Les simulations numériques effectuées permettent d'obtenir, d'un bassin théorique, sa réponse à une impulsion pluviale. Les écoulements sont simulés par des modèles à éléments finis développés au Centre d'hydrogéologie, où le réseau karstique peut être introduit explicitement, à l'aide d'éléments monodimensionnels (1-D) particulièrement perméables (KIRALY, 1978, 1979, 1988; PERROCHET, 1992; ROSSIER et PERROCHET, 1991; ROSSIER et KIRALY,1992).

En faisant varier la densité, la topologie du réseau karstique qui draine les volumes fissurés moins perméables, il est possible de simuler les écoulements et les hydrogrammes, résultant d'une alimentation connue, pour un grand nombre d'aquifères théoriques ayant par exemple

des degrés de karstification différents, mais connus de l'expérimentateur.

5.2 Nature du modèle et des conditions imposées, présentation de l'aquifère théorique

La nature du schéma pris en compte dans cette étude est décrite dans le chapitre 2. Il simule le transfert de l'eau dans la zone saturée. Une forme arbitraire est donnée à la fonction alimentant la nappe. Les hauteurs de nappe, ainsi que le débit de la source sont calculés après chaque pas de temps (Δ t = 1 heure), la durée de la simulation est de treize jours après le début de l'averse qui s'étale sur vingt-quatre heures.

Le karst est représenté au moyen de chenaux interconnectés à perméabilité très grande, et vitesse d'écoulement rapide noyés dans un milieu de très faible perméabilité à vitesse d'écoulement lente, le tout formant une structure emboîtée (ATKINSSON, 1977; BAKALOWICZ et MANGIN, 1980; PADILLA *et al.* 1994). Dans cette étude, la structure particulière est approchée par un modèle théorique en deux dimensions (2-D plan).

Notre modèle n'a pas les prétentions de simuler une distribution "réaliste" des potentiels hydrauliques et des écoulements contrairement au modèle 3-D présenté par la figure 5.1.

L'aquifère de référence Mod1 pris en considération est de forme rectangulaire de 4 km sur 3 km. A l'intérieur de ce volume de roches fissurées sont répartis à intervalle régulier des chenaux perméables d'orientation nord-sud et est-ouest. Les conduits à forte perméabilité d'orientation méridienne sont au nombre de cinq, un flanquant chaque côté de l'aquifère et trois à l'intérieur de la matrice avec un intervalle de 1000 mètres. Ceux d'orientation est-ouest sont au nombre de deux à l'intérieur de la matrice avec un intervalle de 1000 mètres (figure 5.2).

Une source draine cet aquifère. Elle est localisée au sud du bassin formant l'exutoire principal. Ce bassin est rechargé par une alimentation A1 de forme triangulaire (la configuration de la fonction d'alimentation est liée à la fréquence et à l'intensité des apports), figure 5.2c et figure 5.14. Pendant les premières douze heures l'intensité de l'infiltration croît de 0 à $3,0 \cdot 10^{-7}$ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$, ensuite elle décroît en douze heures jusqu'à 0.

Les éléments utilisés pour les blocs capacitifs (figure 5.2b) permettent d'attribuer aux conduits perméables 56 % des précipitations (KIRALY, 1978; KIRALY et MOREL, 1976a,b).

Eléments structuraux	Transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Coef. d'emmagasinement
Réseau karstique	500	0,05
Blocs capacitifs	$5 \cdot 10^{-5}$	0,005
Contraste	$1 \cdot 10^{7}$	10

Tableau 5.1: *Caractéristiques hydrodynamiques de la variante de référence Mod1*

Les écoulements en fin de simulation (i.e. treize jours après le début de l'averse) sont

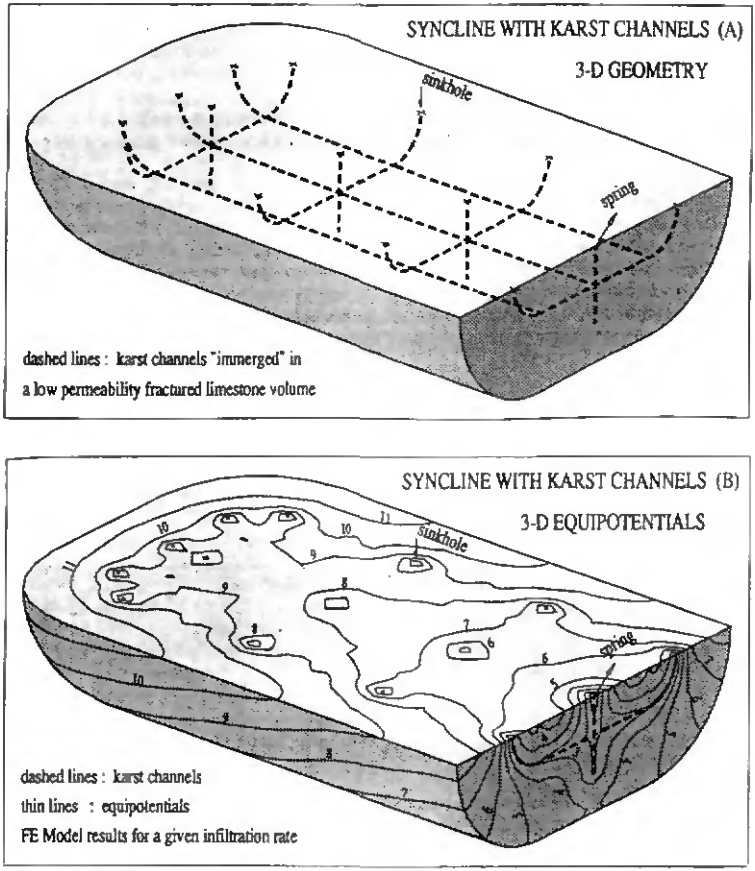


Figure 5.1: **a** : *Représentation schématique d'un synclinal karstique 3-D. Le réseau karstique est plongé dans un volume de calcaire fissuré peu perméable.* **b** : *Répartition des potentiels hydrauliques dans le synclinal de la figure a pour un taux d'infiltration donné (d'après* KIRALY *dans* BURGER, *1983).*

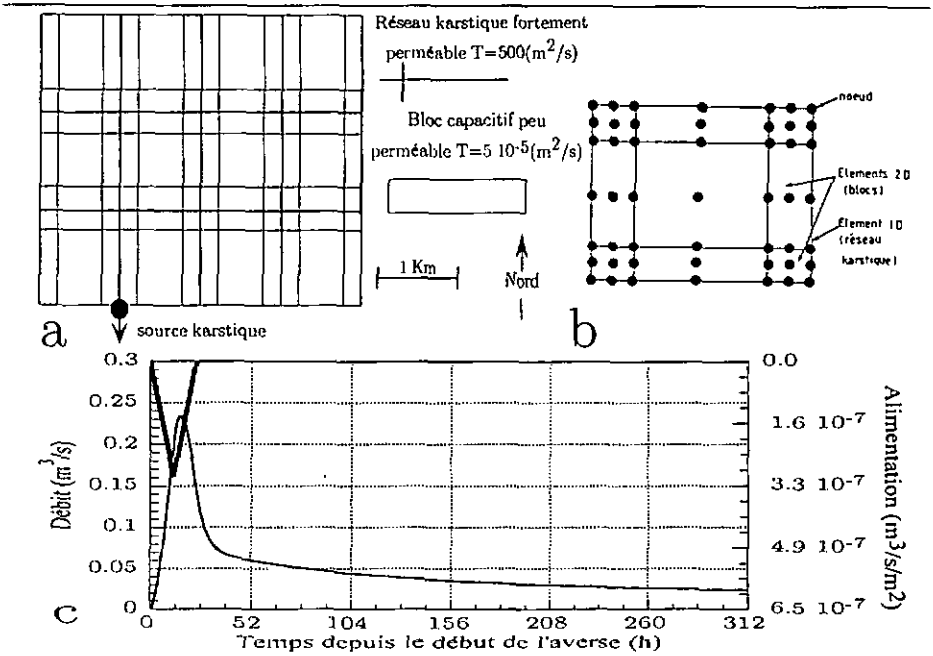


Figure 5.2: a : *Représentation 2D plan du bassin karstique théorique de référence : Mod1, l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m;* b : *Discrétisation des blocs capacitif (volumes fissurés peu perméables);* c : *Réponse du bassin karstique théorique Mod1 à une alimentation de type A1 (de durée 24h et de forme triangulaire)*

visualisés sur la figure 5.3 : on distingue des écoulements très lents, correspondant à des vitesses lentes dans les blocs capacitifs et des écoulements rapides au niveau des conduits. Dans chaque chenal, la recharge provoque une augmentation régulière de la vitesse et à chaque confluence on note une augmentation brutale de la vitesse d'écoulement.

S'agissant d'un modèle théorique, nous pouvons utiliser la forme originale de l'hydrogramme des sources karstiques ainsi que les valeurs "moyennes" des gradients hydrauliques mesurés sur le terrain pour ajuster au mieux les paramètres hydrogéologiques du modèle et obtenir une représentation qui satisfasse ces deux conditions. Pour cela les gradients hydrauliques obtenus pour toutes les simulations ne dépassent jamais 10 % et restent ainsi dans la gamme de valeur observable dans la réalité, et comme l'illustre la figure 5.2c, la forme de l'hydrogramme simulé est représentative d'une crue observée pour une source karstique.

5.3 Résultats des simulations et premières analyses

Dans les paragraphes qui vont suivre nous détaillons dans en premier temps les caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères théoriques utilisés pour les simulations et dans un deuxième temps, nous analysons la forme de l'hydrogramme résultant de la réponse de l'aquifère à une impulsion pluviale connue. Tous les résultats ainsi que les graphiques concernant les simulations sont regroupés, par cas, dans les annexes.

5.3.1 Influence de la densité du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

L'aquifère karstique se différencie de l'aquifère fissuré par l'existence de conduits fortement transmissifs parcourant et drainant le milieu fissuré. Ceux-ci délimitent des zones peu perméables appelées blocs (ces volumes ainsi délimités constituent les parties capacitives de l'aquifère). La détermination de la géométrie et de la perméabilité réelles du réseau karstique, par une méthode directe ou indirecte ne semble actuellement pas réalisable.

5.3.1.1 Description des variantes simulées

Pour rendre compte de l'influence de la densité du réseau karstique sur la forme des débits restitués à la source, nous avons fait varier l'importance du réseau karstique au sein de l'aquifère. La surface du nouveau bassin théorique (Mod1.1) et la perméabilité des blocs demeurent identiques au cas de référence. Le tableau 5.2 regroupe les caractéristiques majeures des deux variantes prises en considération dans ce paragraphe.

Pour la variante Mod1, le développement du réseau transmissif au sein de la matrice rocheuse fissuré découpe des blocs peu perméables de 1 km^2. Dans la variante Mod1.1 le dédoublement du réseau délimite des zones capacitives de 0,25 km^2 : la densité du réseau est quatre fois plus importante. La figure 5.4 représente la structure de la variante Mod1.1 flanquée d'un réseau karstique plus dense que la variante de référence Mod1.

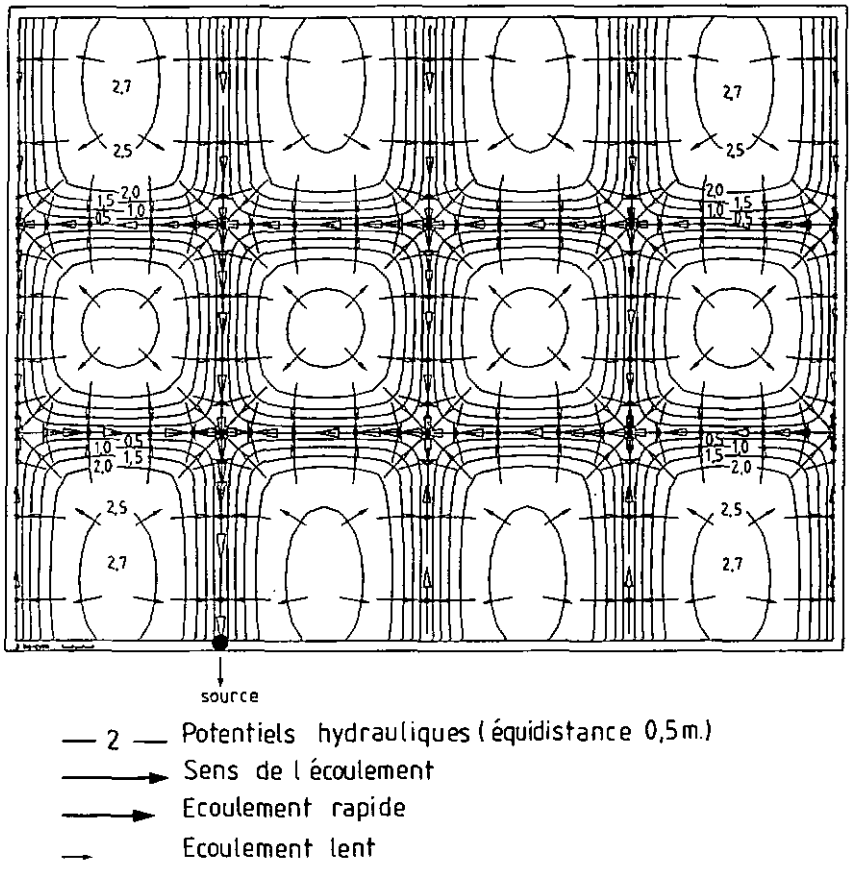


Figure 5.3: *Ecoulement en fin de simulation dans le karst théorique de référence Mod1 (13 jours après l'averse)*

Variante *simulée*	Transmissivité des blocs ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Transmissivité du réseau karstique ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Alimentation ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$)	Distance entre les conduits (m)
Mod1(*)	$5 \cdot 10^{-5}$	500	A1	1000
Mod1.1	$5 \cdot 10^{-5}$	500	A1	500

Tableau 5.2: *Description des variantes Mod1 et Mod1.1; (*) variante de référence*

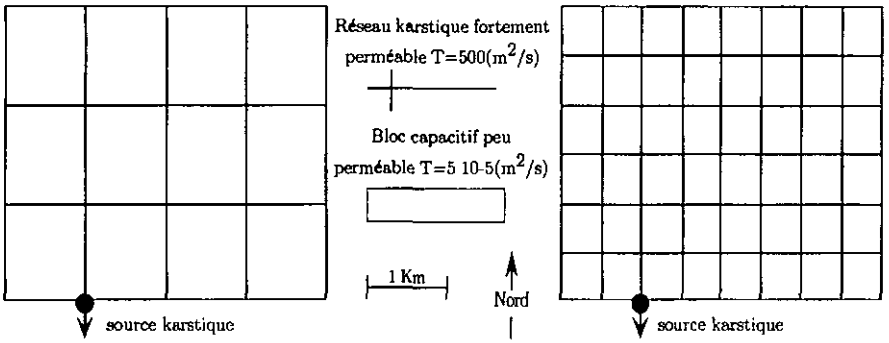


Figure 5.4: *Représentation 2D plan du bassin karstique théorique Mod1.1 par comparaison au bassin Mod1; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m*

5.3.1.2 Bref commentaire sur les résultats

La comparaison des hydrogrammes Mod1 et Mod1.1 montre l'effet de l'introduction d'un réseau karstique supplémentaire dans un bassin (figures 5.5a,b). L'introduction de ce réseau modifie la forme de l'hydrogramme. La crue est plus violente. L'amplitude est plus grande (quasiment d'un facteur deux) donnant à l'hydrogramme une allure plus effilée. Pour les bassins Mod1 et Mod1.1, le paroxysme de la crue se situe respectivement, à 16 et 17 heures après le début de l'averse.

La limite entre la décrue rapide et le tarissement lent se marque par un "genou" très prononcé sur l'hydrogramme (cf. figure 5.2c, bydrogramme Mod1). Avec une dimension des blocs plus réduite (Mod1.1), cette forme typique de l'hydrogramme des sources karstiques est nettement moins prononcée, le passage décrue tarissement est plus amortie. Le contraste entre la décrue et le tarissement est plus faible (Décrue/Tar.).

L'augmentation de la densité des conduits transmissifs, modifie considérablement la valeur du coefficient de tarissement (figure 5.5b). La comparaison du paramètre caractérisant le tarissement α (Mod1) $= 4,68 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ et α (Mod1.1) $= 7,05 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ montre que l'importance du réseau karstique a une influence considérable sur la transmissivité globale du bassin. Cet effet est visible lorsque l'on compare l'état de la nappe karstique en fin de simulation dans les blocs peu perméables. Pour la variante Mod1, la hauteur de la nappe est de 2,70 mètres, par contre, pour la variante Mod1.1, la hauteur est de 2,20 mètres, soit une différence de 0,5 mètre due uniquement à une densité du réseau supérieure augmentant ainsi le drainage du massif fissuré (figure 5.3 et 5.6).

Pour évaluer l'influence de la perméabilité du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme, quatre variantes supplémentaires furent réalisées sur la base de la structure du Mod1.1

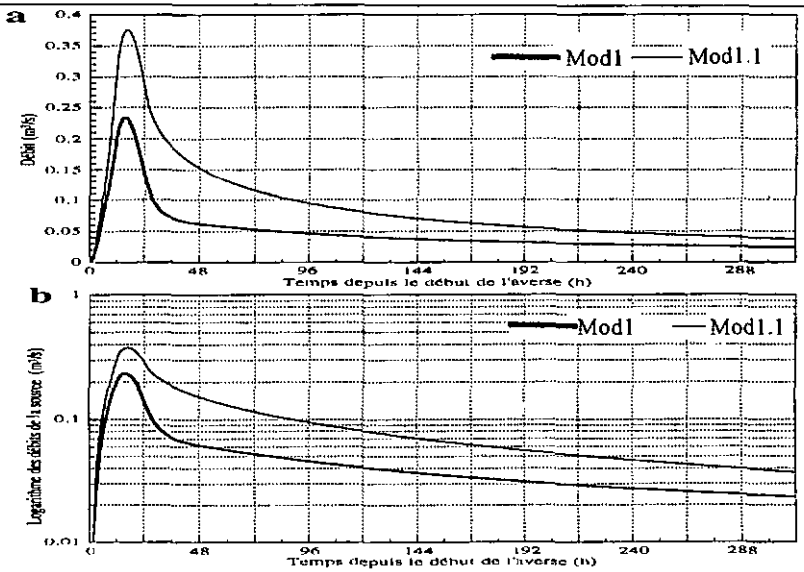


Figure 5.5: **a** : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1 et Mod1.1 répondant à une alimentation de type A1;* **b** : *Echelle logarithmique*

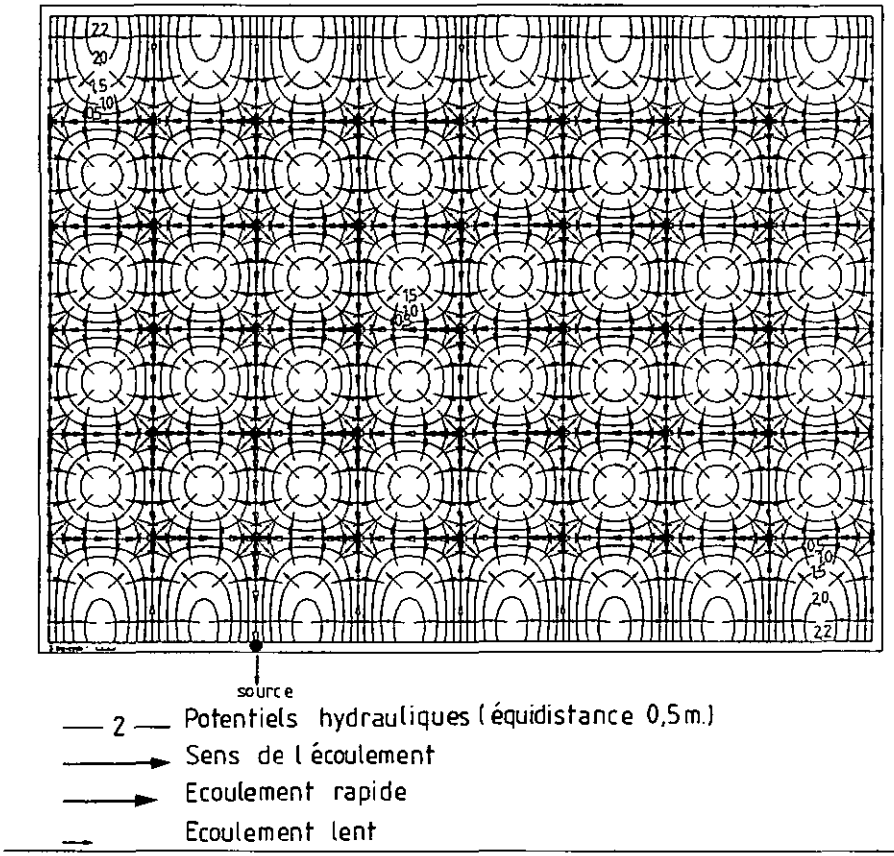


Figure 5.6: *Ecoulement en fin de simulation dans le karst théorique pour la variante Mod1.1 (13 jours après l'averse)*

(cf. annexes). A partir des courbes de débits calculés, on constate que la diminution de la perméabilité des conduits transmissifs additionnel entraîne une baisse de la transmissivité globale du bassin. Cela se répercute sur la réponse globale de l'aquifère par :

- une diminution de l'amplitude de la crue,
- une valeur plus faible du coefficient de tarissement dénotant une décroissance des débits plus lente pour les variantes : Mod1.1 avec K_R=10 $m \cdot s^{-1}$ $\alpha = 7,05 \cdot 10^{-2}$ j^{-1}, Mod1.3 avec K_R=0,1 $m \cdot s^{-1}$) $\alpha = 6,83 \cdot 10^{-2}$ j^{-1} et Mod1.4 avec K_R=1,0 $\cdot 10^{-3}$ $m \cdot s^{-1}$ $\alpha = 4,9 \cdot 10^{-2}$ j^{-1}.
- une hauteur de la nappe en fin de simulation plus élevée dans les zones capacitives de l'aquifère.
- un contraste entre décrue rapide et tarissement lent plus faible.

Si dans les simulations présentées le taux de l'infiltration est le même, la forme de la partie non-exponentielle de l'hydrogramme est différente. Cela montre bien que la décrue proprement dite ne peut pas fournir de renseignements directs uniquement sur l'infiltration (KIRALY et MOREL, 1976b; EISENLOHR *et al.*, 1995). Si l'amplitude de la crue est, entre autres, fonction du taux d'infiltration collecté par le réseau, celui-ci modifie, selon sa densité et sa perméabilité, l'allure de la partie non-exponentielle de la courbe.

Géométriquement un hydrogramme simple de type averse est caractérisé par deux points d'inflexions (cf. figure 5.2c). Le premier correspond au top de l'alimentation, il marque le passage d'une courbe concave (courbe de concentration) à une courbe convexe (fin de la courbe de concentration, top de l'alimentation et une partie de la décrue). Le deuxième point particulier marque la fin de l'alimentation de la zone noyée, l'hydrogramme redevient concave. A partir de ce moment l'aquifère est en phase de vidange. En coordonnées semi-logarithmique ce deuxième point d'inflexion ne marque pas la transition entre une partie de l'hydrogramme non-exponentiel et exponentiel. Donc une partie de la décrue non-exponentielle correspond déjà à la vidange de l'aquifère, principalement du réseau karstique.

Concernant le coefficient α, caractérisant la deuxième phase de l'hydrogramme de récession, il ne peut fournir de renseignements directs sur la valeur de la perméabilité des zones capacitives ou de la dimension des blocs peu perméables. Il est fonction directe de la densité du réseau (i.e. de la dimension des blocs), ainsi que de la perméabilité de celui-ci. La valeur de α calculée à l'exutoire du système résulte, entre autres, de la combinaison de ces deux facteurs. Plus précisément, KIRALY et MOREL (1976b) indiquent que le réseau karstique peu fonctionner comme un exutoire de l'ensemble du massif. Plus la densité du réseau est grande plus la vidange des zones capacitives s'effectue sur une longue distance et l'α calculé à l'exutoire est fonction directe de cette longueur.

5.3.2 Influence de l'extension du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Dans les variantes précédentes, le réseau karstique, fortement transmissif, est distribué de façon uniforme à l'échelle du bassin karstique. Dans la réalité, divers facteurs géologiques, hydrauliques et géochimiques concourent au développement des vides karstiques c'est à dire l'élargissement et/ou le colmatage des joints, la formation des conduits et des cavités (DREYBRODT, 1987, 1988, 1989, 1990. L'influence directe de ces facteurs sur un tel phénomène est difficile à appréhender d'autant que le développement du réseau karstique résulte principalement d'une combinaison et d'un réajustement de ces divers éléments : "feed-back" (KIRALY, 1975; KIRALY et MUELLER, 1979).

L'évolution de la karstification et donc le développement, aboutissant à la création d'un réseau transmissif drainant un massif rocheux, est hétérogène à l'échelle du bassin karstique. Si cette anisotropie existe, la roche poreuse va conduire l'eau souterraine mieux dans une direction que dans une autre.

5.3.2.1 Description des variantes simulées

Trois variantes simulent l'effet du développement de la karstification selon une direction préférentielle, mais distribuée de façon uniforme à l'échelle du bassin karstique (i.e. la dimension des blocs capacitifs est la même soit 0,5 km^2) figure 5.7.

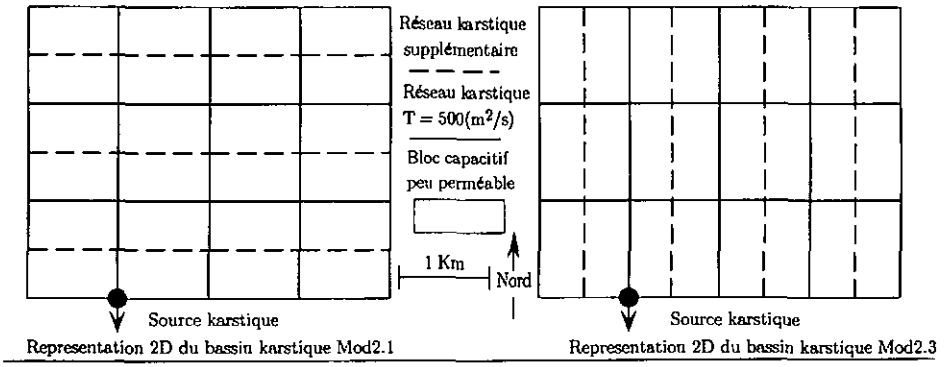


Figure 5.7: *Représentation 2D plan des bassins karstiques théorique Mod2.1 et Mod2.3: l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m*

L'extension maximale du réseau s'effectue selon l'axe est-ouest du bassin pour la variante Mod2.1 et nord-sud pour la variante Mod2.3 (TAB. 5.3) (figure 5.7).

Variante simulée	Transmissivité des blocs ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Transmissivité du réseau ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Développement du réseau supplémentaire	Surface du bassin (km^2)
Mod1(*)	$5 \cdot 10^{-5}$	500	-	12
Mod2.1	$5 \cdot 10^{-5}$	500	est-ouest	12
Mod2.3	$5 \cdot 10^{-5}$	500	nord-sud	12

Tableau 5.3: *Description des variantes Mod1, Mod2.1 et Mod2.3; (*) variante de référence*

5.3.2.2 *Bref commentaire sur les résultats*

Les hydrogrammes des figures 5.8a,b permettent de visualiser l'effet de ce réseau karstique supplémentaire sur les débits restitués à la source.

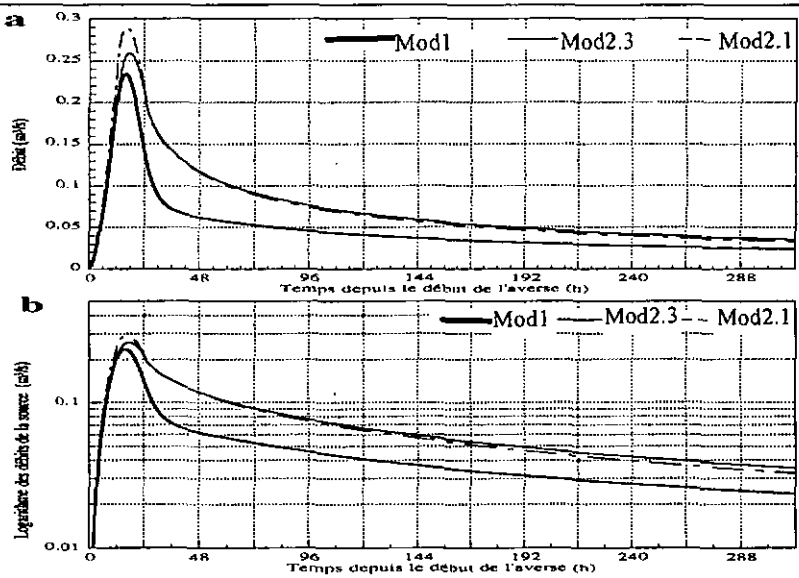


Figure 5.8: **a** : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod2.1 et Mod2.3 ainsi que la variante de référence Mod1 répondant à une alimentation de type A1;* **b** : *Echelle logarithmique*

Le réseau additionnel augmente la densité des conduits transmissifs, par conséquent il accroît la transmissivité globale du bassin. L'amplitude des crues est plus grande et la décroissance des débits est plus rapide durant la période de tarissement avec des coefficient α plus élevés :

α (Mod2.1) $= 5,90 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$; α (Mod2.3) $= 5,40 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ et α (Mod1) $= 4,68 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$.

L'amélioration de la transmissivité globale du bassin est plus ou moins importante selon la direction de l'extension maximale du réseau karstique. L'influence sur l'hydrogramme de la modification du drainage de l'aquifere est guidée par l'extension maximale du bassin. Une extension est-ouest du bassin s'effectue dans l'extension maximale des écoulements, améliorant davantage le drainage du bassin qu'un allongement méridien. Comme pour les variantes précédentes, l'amélioration de la transmissivité apparente du bassin entraîne une modification du contraste décrue tarissement. Le "genou" sur l'bydrogramme est plus prononcé dans le cadre d'une extension est-ouet du réseau karstique.

A densité égale, la modification de l'extension du réseau karstique influence la forme de l'hydrogramme aussi bien la phase non-exponentielle de décroissance des débits, que la dernière partie de l'hydrogramme purement exponentielle.

5.3.3 Influence de la hiérarchisation du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Dans les simulations précédentes, la karstification s'est développée uniformément à l'échelle du bassin. Mais celle-ci peut-être plus locale et occasionner ainsi une hiérarchisation du réseau karstique. Dans ce cas, il coexiste au sein du même bassin des blocs aux dimensions variables.

5.3.3.1 Description des variantes simulées

Le tableau 5.4 regroupe les caractéristiques des variantes Mod3.1 et Mod3.2, par rapport au Mod1 de référence. Pour ces différentes simulations la transmissivité du réseau karstique de base est de 500 $m^2 \cdot s^{-1}$, celle des blocs de $5 \cdot 10^{-4}$ $m^2 \cdot s^{-1}$.

Variante simulée	Hiérarchisation du réseau	Transmissivité du réseau additionnel ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Surface du bassin (km^2)
Mod1(*)	non	500	12
Mod3.1	oui	500	12
Mod3.2	oui	$5 \cdot 10^{-2}$	12

Tableau 5.4: *Description des variantes Mod1, Mod3.1 et Mod3.2; (*) variante de référence*

Dans la variante Mod1, le massif calcaire fissuré est découpé régulièrement par le réseau karstique. Pour les deux autres variantes la délimitation des blocs par le réseau est irrégulière, avec des zones capacitives de 1 km^2 et de 0,5 km^2 (figure 5.9).

5.3.3.2 Bref commentaire sur les résultats

Les hydrogrammes des variantes Mod3.1 et Mod3.2 montrent l'effet de l'introduction d'un réseau hiérarchisé sur les débits à la source (figures 5.10a,b).

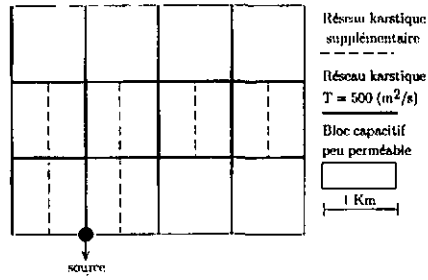


Figure 5.9: *Représentation 2D plan des variantes Mod3.1 et Mod3.2; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m*

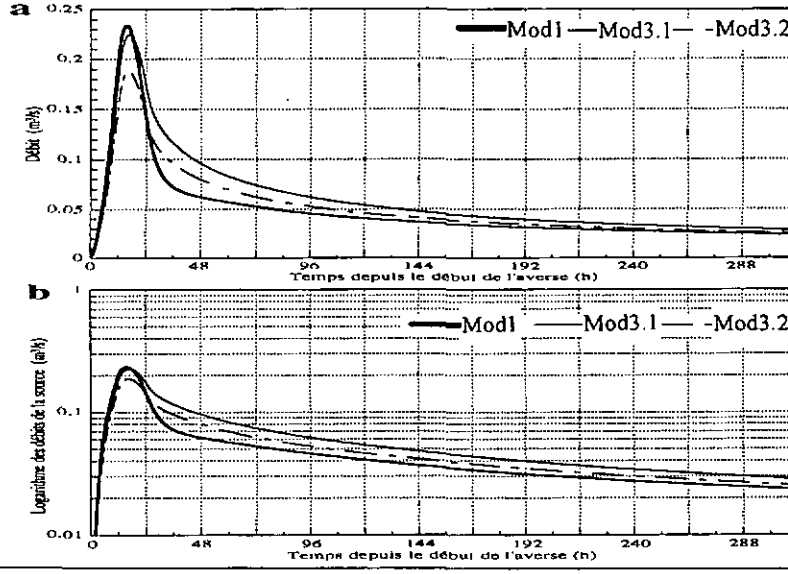


Figure 5.10: **a** : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod3.1 et Mod3.2 répondant à une alimentation de type A1;* **b** : *Echelle logarithmique*

Avec un réseau karstique plus dense le débit de pointe est supérieur. Si l'on compare les valeurs des coefficients de tarissement : α (Mod3.1) $= 5,45 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$; α (Mod3.2) $= 5,07 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ et la variante de référence α (Mod1) $= 4,68 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ la décroissance des débits est plus rapide. Il est intéressant de remarquer que les valeurs de α, pour les deux variantes, sont légèrement différentes. La géométrie du réseau étant la même, l'écart entre les coefficients de tarissement est due uniquement à une différence de perméabilité du réseau additionnel.

Les premiers résultats obtenus à partir de l'observation des hydrogrammes correspondent à ceux des simulations précédentes. Un réseau plus dense accroît la transmissivité globale du bassin avec une valeur de α supérieure et une amplitude de crue plus élevée. Toutefois, l'amélioration du drainage du massif calcaire n'implique pas nécessairement que la décrue proprement dite soit plus courte dans le temps et qu'ainsi la vidange des blocs débute plus tôt. Pour les variantes Mod3.1 et Mod3.2 la décrue, correspondant principalement à la vidange des conduits transmissifs est de huit jours. Ce phénomène est également visible sur l'hydrogramme de la variante Mod2.1 où la décroissance des débits devient exponentielle huit jours après le début de la recharge.

5.3.4 Influence du coefficient d'emmagasinement du réseau sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Dans les simulations précédentes, nous utilisions la même valeur du coefficient d'emmagasinement pour les blocs capacitifs peu perméables et le réseau karstique transmissif.

5.3.4.1 Description des variantes simulées

Dans les variantes Mod4.1 et Mod4.2 nous admettons que le coefficient d'emmagasinement du réseau karstique, S_R, et des blocs, S_B, est respectivement dix fois supérieur et dix fois inférieur au coefficient d'emmagasinement du bassin de référence. Un contraste de dix est toujours maintenu entre S_R et S_B (tableau 5.5). Pour les trois variantes prises en considération la valeur de la perméabilité du réseau et des blocs est identique.

Variante simulée	Coef. d'emmagasinement du réseau	Coef. d'emmagasinement des blocs	Surface du bassin (km^2)
Mod1(*)	0,05	0,0050	12
Mod4.1	0,5	0,0500	12
Mod4.2	0,005	0,0005	12

Tableau 5.5: *Description des variantes Mod1, Mod3.1 et Mod3.2; (*) variante de référence*

5.3.4.2 Bref commentaire sur les résultats

L'effet de ce changement est montré sur les hydrogrammes simulés Mod1, Mod4.1 et Mod4.2 (figures 5.11a,b). Avec un S_R et S_B dix fois supérieur, la modification de l'hydrogramme

simulé est violente. Celui-ci "perd" certains attributs des hydrogrammes des sources karstiques. L'amplitude de la crue diminue, il n'y a plus de "genou" visible sur la décroissance des débits, par conséquent le contraste Décrue/Tar. est plus faible. Le débit de tarissement est inférieur à celui du Mod1 mais la décroissance exponentielle des débits est très faible avec un α (Mod3.1) $= 2,30 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$. Le sommet de la crue se produit quatre heures après celui du cas de référence Mod1.

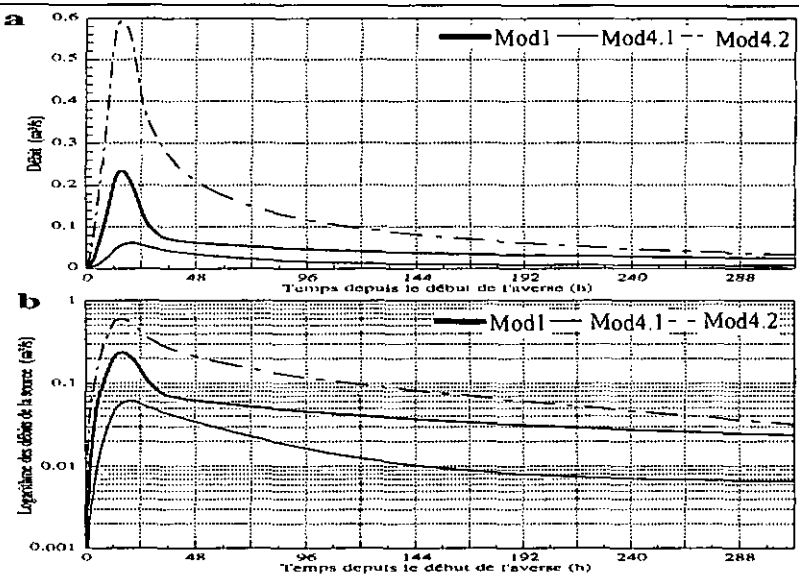


Figure 5.11: a : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod4.1 et Mod4.2 répondant à une alimentation de type A1;* b : *Echelle logarithmique*

Par opposition à la simulation précédente, pour un coefficient S dix fois inférieur des blocs et du réseau karstique, l'amplitude de la crue est plus élevée. Le contraste Décrue/Tar. est plus grand que celui de la variante Mod4.1 mais inférieur au cas de référence Mod1. En effet, la décroissance des débits en phase de tarissement est rapide avec un α égal à $1,25 \cdot 10^{-1}\ j^{-1}$.

Une modification des fonctions capacitives de l'aquifère se répercute aussi violemment sur l'hydrogramme (décrue plus tarissement) qu'une variation de la perméabilité du réseau (variantes Mod1).

5.3.5 Influence de l'extension du bassin d'alimentation sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Avec les variantes Mod2 (paragraphe 5.3.2), nous avons évalué l'influence, sur la forme de l'hydrogramme, d'un développement de la karstification selon une direction préférentielle. Pour les variantes Mod5 c'est la superficie du bassin qui est modifiée.

5.3.5.1 Description des variantes simulées

Dans les variantes Mod5.1 et Mod5.2, l'extension du bassin karstique théorique est réalisée respectivement du nord-sud et est-ouest. Dans les deux cas la surface d'alimentation a doublé par rapport à la variante Mod1. La forme de la fonction d'alimentation reste la même. Les nouveaux aquifères pris en considération sont de forme rectangulaire de dimension, 6 km du nord au sud et 4 km d'est en ouest pour la variante Mod5.1 et 8 km d'est en ouest et 3 km selon l'extension méridienne pour la variante Mod5.2 (tableau 5.6) (figure 5.12).

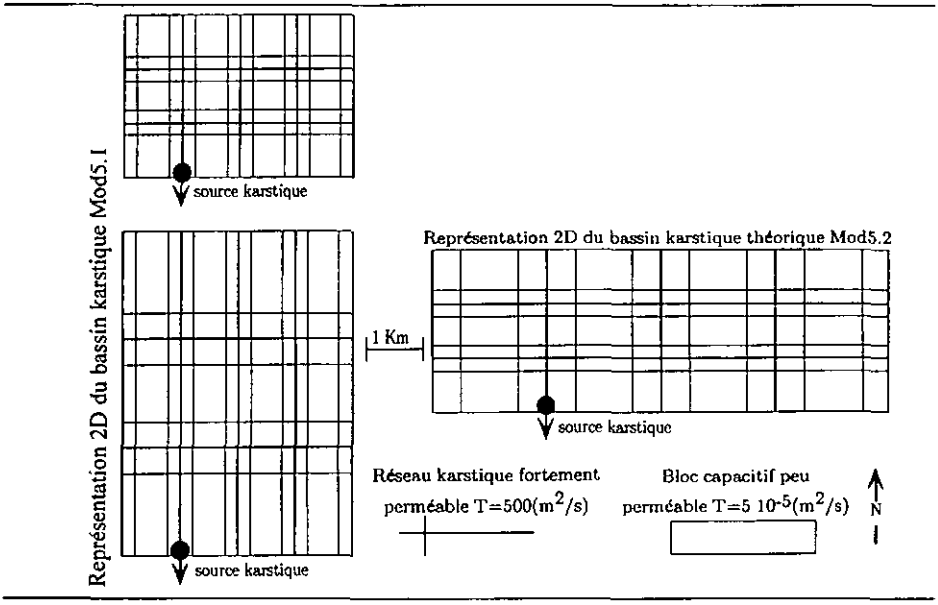


Figure 5.12: *Représentation 2D plan des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod5.1 et Mod5.2; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m*

Variante simulée	Transmissivité des blocs ($m^2.s^{-1}$)	Transmissivité des conduits ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Extension du bassin	Surface du bassin (km^2)
Mod1(*)	$5 \cdot 10^{-5}$	500	-	12
Mod5.1	$5 \cdot 10^{-5}$	500	nord-sud	24
Mod5.2	$5 \cdot 10^{-5}$	500	est-ouest	24

Tableau 5.6: *Description des variantes Mod1, Mod5.1 et Mod5.2; (*) variante de référence*

5.3.5.2 Bref commentaire sur les résultats

L'effet de ce changement sur l'hydrogramme de la source est illustré par les figures 5.13a,b. La direction de l'extension du bassin d'alimentation n'a pas le même effet sur l'hydrogramme. Pour un allongement dans le sens nord-sud, la crue a un aspect plus effilé avec un débit toujours supérieur. La décrue est plus courte par conséquent le tarissement débute plus rapidement après le début de l'infiltration.

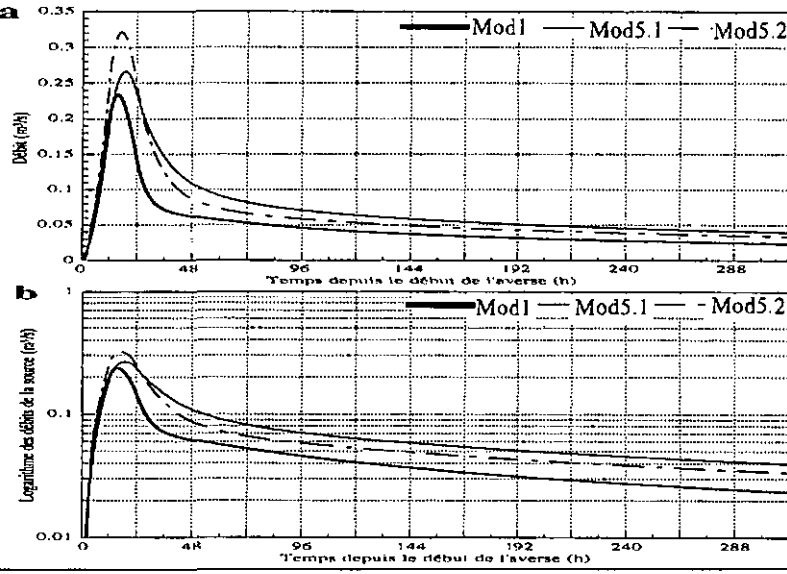


Figure 5.13: **a** *: hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod5.1 et Mod5.2 répondant à une alimentation de type A1;* **b** *: Echelle logarithmique*

Dans le cas d'une extension du bassin dans le sens est-ouest, variante Mod5.2, les débits sont inférieurs à ceux issus de la variante Mod5.1 mais restent toutefois supérieurs à la variante de référence Mod1. Dans les deux cas l'augmentation de la valeur des débits est due à

l'accroissement de la surface d'alimentation qui a doublé. Concernant le coefficient de tarissement, la différence entre les deux simulations est faible, de l'ordre de $0,06 \cdot 10^{-2}$. Par contre, le contraste Décrue/Tar. est plus fort pour la variante Mod5.2 mais toujours inférieur au cas Mod1.

Corroborant les résultats obtenus pour les variantes Mod2, l'accroissement de la transmissivité du bassin dépend de la concordance entre l'extension du bassin ou du réseau karstique et le sens des écoulements principaux vers l'exutoire principal. De plus, de telles modifications se répercutent sur la première phase de l'hydrogramme simple des sources karstiques.

5.3.6 Influence de la configuration de la fonction d'alimentation sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Le transfert de l'eau entre la surface du sol et le toit de la nappe est difficile à appréhender. Si la combinaison de plusieurs paramètres climatiques, précipitations, température de l'air, ensoleillement, permet d'appréhender les précipitations efficaces correspondant à la quantité d'eau qui réalimente l'aquifère, la répartition de l'infiltration à l'échelle d'un bassin reste toujours une inconnue. De nombreux travaux sur la relation pluie-débit, qui englobe une partie du phénomène décrit ci-dessus, ne nous permettent pas d'envisager clairement l'influence de cette fonction d'alimentation sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques.

5.3.6.1 Description des variantes simulées

Les variantes Mod6.1 et Mod6.2 permettent d'appréhender l'influence de la forme de l'infiltration sur l'allure de l'hydrogramme. La structure du bassin karstique correspondant à ces deux simulations est représentée par la variante Mod1, ayant une structure simple caractérisée par une distribution du réseau karstique uniforme dans le bassin (tableau 5.7).

Variante simulée	Variante de référence	Alimentation $(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2)$	Bassin (km^2)
Mod6.1	Mod1 (*)	A2	12
Mod6.2	Mod1 (*)	A3	12

Tableau 5.7: *Caractéristiques des simulations Mod6.1 et Mod6.2; (*) variante de référence*

Contrairement à la fonction d'alimentation A1, de forme triangulaire, l'infiltration A2 est rectangulaire (la valeur moyenne est de $1,5 \cdot 10^{-7}$ $(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2)$). Pour l'infiltration A3, la "redescente" de la fonction admet une décroissance hyperbolique du flux rechargeant l'aquifère (il s'agit de cette fonction que nous utiliserons pour la simulation Mod6.2 et qui s'apparente à une alimentation retardée dans le temps). Pour les deux alimentations, A1 et A3, le maximum de l'infiltration se situe douze heures après le début de l'averse. Pendant les premières douze heures l'intensité de l'infiltration monte de 0 à $3,0 \cdot 10^{-7}$ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$, ensuite elle descend en douze heures pour l'infiltration A1 et en trois cents douze heures pour la fonction A3. Le flux

total de l'infiltration A3 est inférieur au A1. Cette différence se retrouve lors de la décroissance de l'alimentation (figure 5.14).

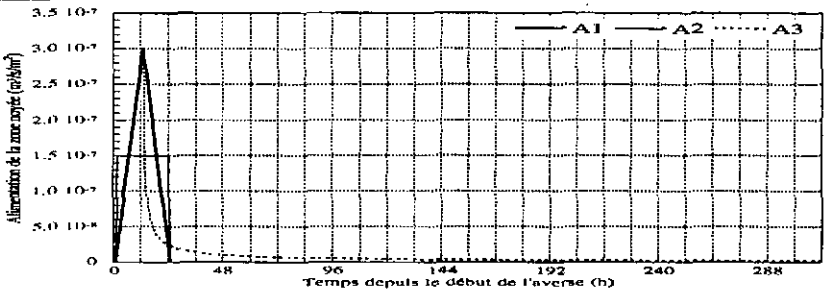


Figure 5.14: *Représentation des fonctions d'alimentation A1, A2 et A3*

5.3.6.2 Bref commentaire sur les résultats

Comme l'illustre la figure 5.15a,b la forme de l'alimentation a une influence, principalement sur la première partie des hydrogrammes simulés.

Dans les deux cas Mod6.1 et Mod6.2, l'amplitude de la crue diminue, la crue a un aspect écrêté pour la variante Mod6.1 et effilé pour le bassin Mod6.2. Le débit maximal est atteint à vingt-quatre ou douze heures après le début de l'impulsion pluviale. L'effet de l'alimentation décroissante est moins marqué dans la région sommitale de la crue.

Pour une recharge de forme rectangulaire les débits augmentent et cela durant vingt-quatre heures (durée de l'infiltration). Le débit au paroxysme de la crue est plus faible. Ce moment représente le seul point d'inflexion de l'hydrogramme il marque également le début de la vidange de l'aquifère en régime non-influencé. Le coefficient de tarissement calculé pour la variante est similaire à celui de la variante de référence (figure 5.15b):

α (Mod6.1) $= 4,67 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ et la variante de référence α (Mod1) $= 4,68 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$

Ces constations laissent supposer qu'un hydrogéologue désirant caractériser une relation pluie-débit devra choisir une modélisation des précipitations adapté aux dimensions du bassin karstique étudié.

Le "déficit d'alimentation" entraîne une diminution générale des débits se marquant par une amplitude plus faible de la crue et des débits toujours inférieurs jusqu'à la fin de la simulation. Dans ce sens, les réserves, calculées à partir de α, ainsi que les volumes d'eau évacués sont inférieurs. Cette diminution des ressources en eaux à l'exutoire se concrétise au niveau des écoulements par une baisse de la hauteur de la nappe en fin de simulation.

α (Mod6.2) $= 3,22 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ et la variante de référence α (Mod1) $= 4,68 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$

En comparant les hydrogrammes résultant de deux alimentations de forme différente, l'une

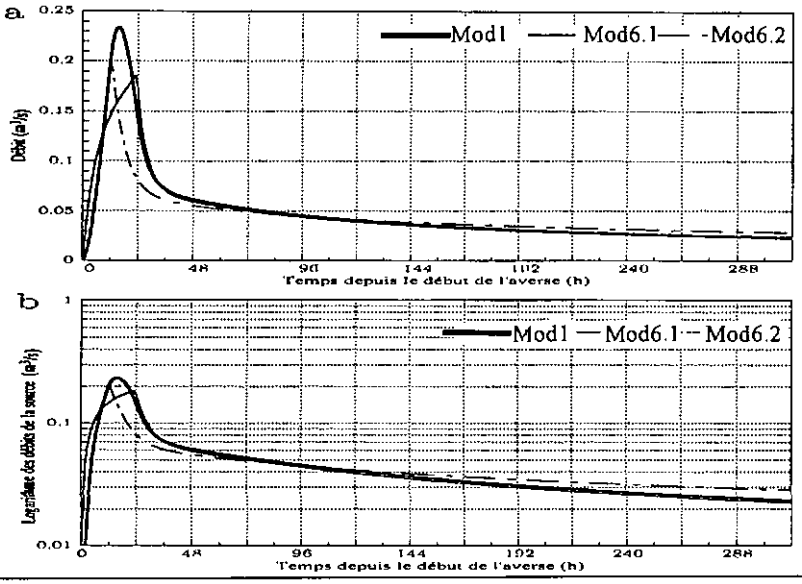


Figure 5.15: a : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod6.1 (alimentation A2) et Mod6.2 (alimentation A3) ainsi que la variante de référence Mod1 répondant à une alimentation de type A1;* b : *Echelle logarithmique*

triangulaire et l'autre rectangulaire caractérisant une infiltration plus faible et retardée, on constate que pour notre bassin théorique, la configuration de l'infiltration modifie considérablement la courbure, l'amplitude et la durée de la décrue mais pas la valeur du coefficient de tarissement qui reste similaire à la variante de référence. Concernant la 3^e alimentation l'α calculé est évidemment non représentatif de la structure du karst puisque l'aquifère n'est pas en régime non-influencé et qu'une faible recharge contribue au débit de tarissement.

5.3.7 Iufluence d'une répartition spatiale hétérogène des alimentations distribuées sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Après avoir évalué l'influence de la forme de la fonction d'alimentation sur l'allure de l'hydrogramme, est-il possible de tester l'effet d'une répartition hétérogène des précipitations sur le bassin d'alimentation. En effet, dans les paragraphes précédents l'alimentation de la nappe s'effectue uniformément sur les 12 km^2 du bassin hydrogéologique.

5.3.7.1 Descriptinn des variantes simulées

Pour rendre compte de ce phénomène trois premières variantes furent simulées. Si la structure et donc la densité du réseau karstique ainsi que la forme de l'alimentation A1 restent identiques à la variante de référence Mod1. par contre cette alimentation est répartie différemment sur le bassin (tableau 5.8) (figure 5.16).

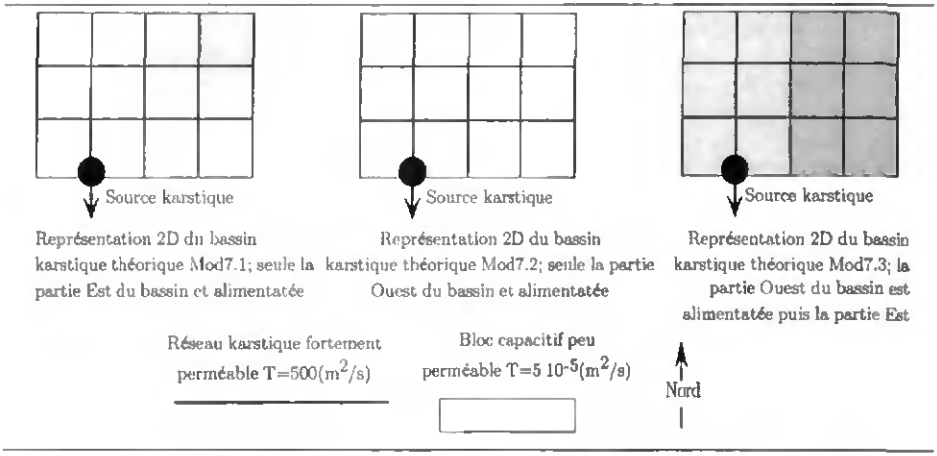


Figure 5.16: *Représentation 2D plan des bassins karstiques théoriques Mod7.1, Mod7.2 et Mod7.3; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m*

- L'alimentation triangulaire A1, pour la variante Mod7.1, se réalise uniquement sur la partie orientale du bassin, elle se déverse sur les six blocs les plus à l'est du modèle.
- Pour la variante Mod7.2, la recharge s'effectue uniquement sur les six blocs les plus occidentaux du bassin c'est à dire la zone la plus proche de l'exutoire.
- La variante Mod7.3 simule une onde pluviale se déversant sur la bassin d'est en ouest. L'alimentation débute sur la moitié occidentale du bassin et se propage avec la même configuration seize heures après le début de l'averse sur la partie orientale.

Variante simulée	Variante de référence	Alimentation $(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2)$	Répartition spatiale de l'alimentation à l'échelle du bassin
Mod7.1	Mod1 (*)	A1	moitié est
Mod7.2	Mod1 (*)	A1	moitié ouest
Mod7.3	Mod1 (*)	A1	décalage de 16 H entre l'alimentation de la moitié est et ouest du bassin

Tableau 5.8: *Caractéristiques des simulations Mod7.1, Mod7.2 et Mod7.3; (*) variante de référence*

5.3.7.2 Bref commentaire sur les résultats

Les figures 5.17a,b permettent de visualiser l'influence d'une alimentation particulière sur la forme de l'hydrogramme. Le "déficit d'alimentation" entraîne une diminution générale des débits se marquant par une amplitude de crue plus faible et des débits de tarissement toujours inférieurs à l'hydrogramme Mod1. Pour les variantes Mod7.1 et Mod7.2 les hydrogrammes simulés sont quasiment identiques. A l'échelle de ce bassin, aucune différence n'est visible sur l'évolution des débits et cela pour une alimentation s'effectuant soit, sur la partie orientale soit, sur la partie occidentale du bassin. Même si le paroxysme de la crue se situe une heure avant pour une alimentation se déversant sur la partie la plus proche de la source, une telle similitude des hydrogrammes est peut être due à une extension du bassin dans le sens est-ouest trop faible (4 km). Le contraste Décrue/Tar. est légèrement plus fort pour la variante Mod7.1.

En coordonnées semi-logarithmiques (figure 5.17b), les débits s'ajustent selon une droite huit jours après le début de l'impulsion pluviale et cela pour les trois variantes prises en considération. Calculé à partir de l'ajustement des débits les coefficients de tarissement :

α (Mod7.1) $= 4,68 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$; α (Mod7.2) $= 4,69 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ et α (Mod1) $= 4,68 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$ montrent une différence très faible qui ne permet pas de dire que la répartition des alimentations sur le bassin n'a aucune influence sur la décroissance des débits en phase de tarissement, ou plus exactement que cette influence à l'échelle de notre bassin théorique est négligeable.

La figure 5.17a montre l'influence d'une alimentation hétérogène dans le temps et dans l'espace. L'hydrogramme obtenu est celui de la variante Mod7.3. La montée des débits s'effectue en deux temps, la première partie est identique aux variantes précédentes, à partir de seize

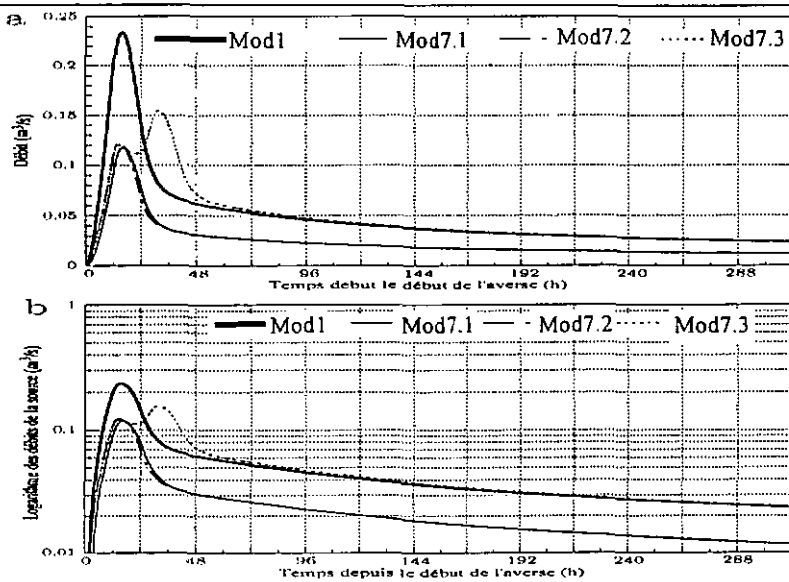


Figure 5.17: a : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod7.1 et Mod7.2 ainsi que la variante de référence Mod1;* b : *Echelle logarithmique*

heures la même alimentation débute sur la moitié orientale du bassin, la courbe de concentration de l'hydrogramme monte plus rapidement, la crue est bimodale (quinze et trente deux heures) avec une amplitude légèrement plus faible par rapport à la variante de référence.

Sur la figure 5.17b la droite de tarissement reste la même avec un α égal à $4,80 \cdot 10^{-2}\ j^{-1}$. L'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'alimentation affecte peu la valeur du coefficient de tarissement.

La montée de la crue et le début de la décrue dépendent grandement des alimentations comme cela est illustré par les figures 5.15b et 5.17b.

Pour la variante Mod7.3 on remarque que les hauteurs de la nappe sont plus importantes sur la moitié orientale du bassin. Lors de la vidange du massif fissuré, en régime non-influencé il y a une disparité des apports entre l'est et l'ouest du bassin sans affecter la valeur du coefficient de tarissement.

Résultant de ces simulations, l'extension est-ouest du bassin n'est-elle pas trop réduite pour occasionner une différence visible sur les hydrogrammes ? Pour répondre à cette interrogation deux nouvelles variantes furent simulées. Les principales caractéristiques de ces variantes ainsi que les graphiques correspondant sont regroupés dans les annexes.

Dans la variante Mod7.4, l'extension est-ouest du bassin est de 8 km et 3 km pour le développement méridien. Avec la variante Mod7.5 nous avons compensé l'extension nord-sud. soit 1,5 km, pour avoir une surface totale du bassin identique au Mod1 soit 2 km^2.

Les résultats obtenus corroborent ceux des simulations précédentes. Si l'amplitude et la courbe de concentration de la crue sont affectées par ce changement, en contrepartie la répartition spatiale de l'alimentation n'a aucune influence sur la valeur du coefficient de tarissement α. Le coefficient de tarissement est bien une conséquence de la structure et de la configuration de l'aquifère.

5.4 Conclusions

L'objectif de ce chapitre n'est pas de mettre un "point final" sur la décomposition des hydrogrammes en dégageant le schéma optimal, et l'outil qui permettraient de traduire l'hydrogramme de récession en termes de structure et comportement hydrodynamique de l'aquifère.

Notre intention est plus modeste mais "réaliste". Il s'agit, en introduisant un schéma supplémentaire (cf. chapitre 2), de déduire les hypothèses vérifiables dans le cadre de notre schématisation. Notre démarche est critiquable dans la mesure où la validité des équations utilisées est liée à un certain nombre de conditions restrictives (DARCY), nous utilisons un modèle (2-D plan) en zone saturée et celui-ci n'a pas la capacité de simuler une distribution 3-D des écoulements.

A l'aide des résultats des simulations d'un grand nombre de bassins karstiques théoriques et des travaux de KIRALY et MOREL (1976b), il est permis d'apporter quelques éléments de reflexion sur le milieu naturel étudié. Cette opération n'est pas réalisable sur la base d'une étude comparative (exemple de la Milandrine).

(1) Les différentes exponentielles résultant de la décomposition de l'hydrogramme ne correspondent pas toujours à différentes catégories de fissures ayant des perméabilités et des porosités significativement distinctes. Dans notre modèle coexistent deux perméabilités et porosités différentes (réseau karstique et blocs) et pourtant les courbes de récession des débits simulés peuvent être décomposées en trois fonctions exponentielles (voir annexes). De plus, cette idée repose sur le fait de pouvoir décomposer l'hydrogramme en trois fonctions exponentielles. Le choix des segments exponentiels présente une certaine difficulté car, basé sur l'allure graphique de la courbe, il reste assez subjectif.

(2) Le principe de schématisation détaillé ci-dessus est à la base des modèles hydrométéorologiques. Ces modèles, appliqués à la source karstique de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse), les caractéristiques des différentes composantes de l'hydrogramme et des surfaces des différents réservoirs obtenues après calage de l'hydrogramme simulé sur l'observé, donne des résultats différents de ceux obtenus dans les nombreux travaux de prospection et d'exploitation réalisés sur ce site BURGER (1959); TRIPET (1972); KIRALY (1978); KIRALY et MOREL (1976a,b). Pour ajuster au mieux les hydrogrammes calculés par le modèle MERO sur l'hydrogramme observé les surfaces de certains réservoirs doivent être surestimés, en contre partie d'autres doivent être sous-estimés pour que la surface totale du bassin demeure à 130 km^2. Si en mettant en œuvre un tel modèle notre intention est de pronostiquer des débits manquants, un tel outil est remarquable car la relation pluies-débits est plus réaliste qu'une déconvolution entre la pluie et les débits à la source (voir annexes).

(3) La partie non-exponentielle de la courbe de décroissance des débits correspond à la vidange de la zone d'infiltration, les paramètres mis en jeu caractérisent la durée, la vitesse de l'infiltration. La première phase de l'hydrogramme ne peut pas donner de renseignements directs sur l'infiltration provenant de la zone non-saturée, car elle dépend de plusieurs facteurs. Les résultats des différentes simulations montrent que la phase de l'hydrogramme où les débits décroissent très rapidement, est fonction directe de la longueur du réseau karstique, de la perméabilité des chenaux, de la géométrie de la nappe et bien évidement de la configuration de la fonction d'alimentation. Or, ces éléments partie intégrante de l'aquifère varient au cours du cycle hydrologique ceci explique les grandes variations des valeurs du paramètre i caractérisant la phase non-exponentielle de l'hydrogramme. De plus, une partie de cette phase de l'hydrogramme correspond déjà à la vidange du réseau fortement perméable.

(4) Le coefficient de tarissement α , facteur hydrogéologique des couches réservoirs caractérisant leur vidange et leur capacité de stockage en eaux souterraines est influencée par les caractéristiques de la roche réservoir ainsi que de l'écoulement dans les conduits transmissifs. Sans aucune connaissance de la géométrie et de l'organisation du réseau karstique, il ne peut fournir de renseignements sur la perméabilité et la dimension des blocs. La partie purement exponentielle de la courbe de vidange ne caractérise pas uniquement la vidange des zones capacitives de l'aquifère, elle est grandement dépendante de la structure du réseau karstique.

Proposé déjà par SCHOELLER (1967), l'hydrodynamique d'un exutoire karstique dépend d'une combinaison de nombreux facteurs. Ainsi l'allure de chaque phase de l'hydrogramme de récession résulte de la synthèse des caractéristiques de la zone fortement perméable (réseau karstique) et moins perméable (blocs). Sans connaissances sur l'une de ces zones, les paramètres mis en jeu lors de la décomposition des hydrogrammes ne peuvent apporter d'indications, mêmes qualitatives, sur telle ou telle partie de l'aquifère.

Si l'allure de l'hydrogramme d'une source karstique est générée par les caractéristiques structurelles, environnementales de l'aquifère, cette information ne peut pas être raisonnablement déduite par quelques paramètres décrivant une seule phase de l'hydrogramme. A ce titre, la courbe de récession demeure à nos yeux "structurellement" très pauvre.

Les variations du débit peuvent être analysées à l'aide de formules empiriques. Ces dernières, bien que n'étant pas fondées physiquement, nous donnent une bonne coïncidence avec les hydrogrammes réels. Une formule hyperbolique employée représente une expression mathématique des données observées et non pas une solution analytique d'équation ayant une signification physique et subordonnée à certaines conditions concernant le fonctionnement de l'aquifère karstique. Il parait toujours possible de traduire la totalité de l'hydrogramme d'une source karstique par une fonction hyperbolique. L'ajustement d'une telle fonction sur les hydrogrammes réels met en jeu deux paramètres α et n dont le produit caractérise la courbure de l'hydrogramme c'est à dire le contraste entre décrue rapide et tarissement lent. L'avantage d'une telle formule est de pouvoir représenter dans un système de coordonnées Q_0 versus log $(\alpha \cdot n)$ les crues par un point, ainsi la comparaison entre les différents hydrogrammes est possible.

Le produit $\alpha \cdot n$ caractérise bien les hydrogrammes de décroissance des débits des sources karstiques. Sur la figure 5.18, sept sources karstiques matérialisées par des cercles se détachent des trois points à l'extrême gauche de la figure représentant la réponse d'un aquifère en milieu poreux (Aare, Canton de Berne, Suisse; cf figure 1.1). Sur ce type de représentation, un facteur trente sépare ces deux pôles.

La figure 5.19 représente l'ensemble des crues simulées. Ce type de représentation n'a pas d'autre prétention que de visualiser l'impact de divers facteurs sur l'allure de l'hydrogramme de récession et plus précisément la courbure de celui-ci occasionnée par la présence d'une zone fortement transmissive juxtaposée et superposée à une zone capacitive.

Le contraste entre décrue rapide et un tarissement lent est fonction directe, de la perméabilité du réseau karstique, de la dimension des blocs capacitifs, de l'extension du bassin d'alimentation ou du réseau, de la configuration de la fonction d'alimentation et du coefficient d'emmagasinement des blocs et du réseau karstique.

Le diagramme de la figure 5.20 représente dix neuf décrues réelles, au sens large, de huit exutoires karstiques du Jura suisse. Les superficies de ces bassins varie de 5 km^2 pour la Milandrine (Canton du Jura, Suisse) à 130 km^2 pour la source de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse). Les autres sources possèdent des bassins aux dimensions intermédiaires à ces deux pôles. Les superficies de ces bassins sont dix fois plus grandes et deux fois plus petites que les modèles théoriques. A l'exception de la Cressonnière (Canton de Vaud, Suisse), une partie du réseau karstique fut reconnu, soit par des prospections spéléologiques soit mis en évidence lors d'essais de traçages.

Un contraste Décrue/Tar. élevé est le résultat d'un équilibre entre les zones conductrices et capacitives de l'aquifère. La prédominance d'une de ces zones comme pour la source de la Serrière (Canton de Neuchâtel, Suisse) où la fonction conduite de cet aquifère est élevé T = 6,22 $m^2 \cdot s^{-1}$ entraîne un Décrue/Tar. faible par rapport aux autres exutoires. Pour la source de la Milandrine (Canton du Jura, Suisse) le contraste est faible mais également la transmissivité du bassin. Le bassin de la Milandrine est un sous-bassin de la source Bâme-Saivu. Le point de mesure de la Milandrine est l'exutoire souterrain d'un bassin de 5 km^2. En amont de ce point

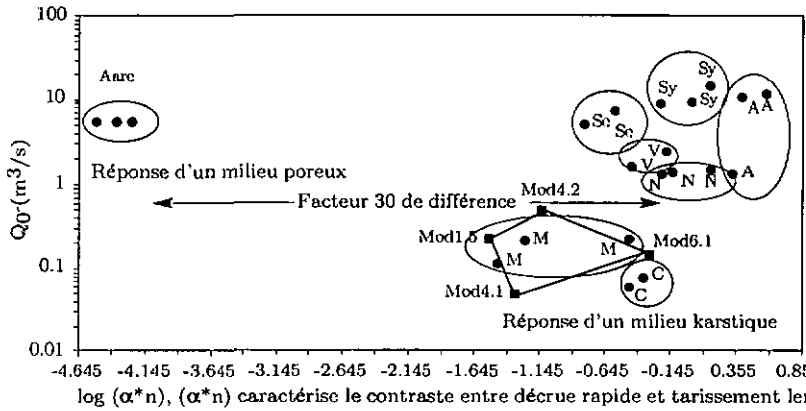


Figure 5.18: *Représentation paramétrique des courbes de décrue observées; comparaison des réponses de différents aquifères karstiques avec celle d'un milieu poreux. Les points noirs représentent le contraste α fois n pour une décrue analysée pour différentes sources. Source de l'Aare, de la Milandrine (M), de la Cressonnière (C), de la Noiraigue (N), de la Venoge (V), du Seyon (Sy), de la Serrière (Se) et de l'Areuse (A), pour la localisation de ces exutoires voir la figure 1.1. Cette figure représente également la dispersion du contraste α fois n pour les bassins karstiques théoriques*

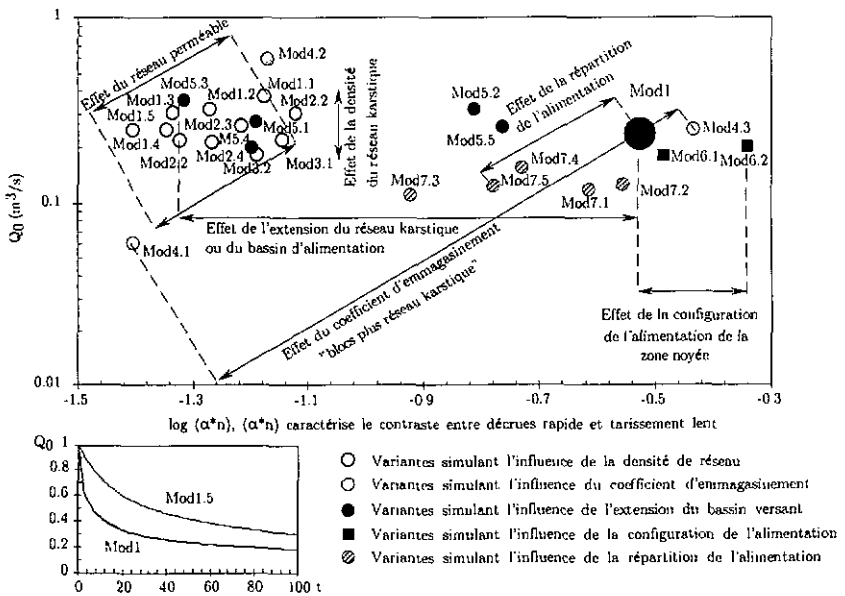


Figure 5.19: *Représentation paramétrique des courbes de décrue simulées*

seul quelques mètres de conduit karstique sont connus. Par contre, en aval de cet exutoire la rivière souterraine est bien connue et cartographiée sur plus de 1000 m. Elle aboutie à la source de la Bâme-Saivu (Canton du Jura, Suisse). A cette source le contraste Décrue/Tar. est plus important qu'à la Milandrine mais également la transmissivité du bassin par la présence d'un réseau karstique de 1100 m de longueur.

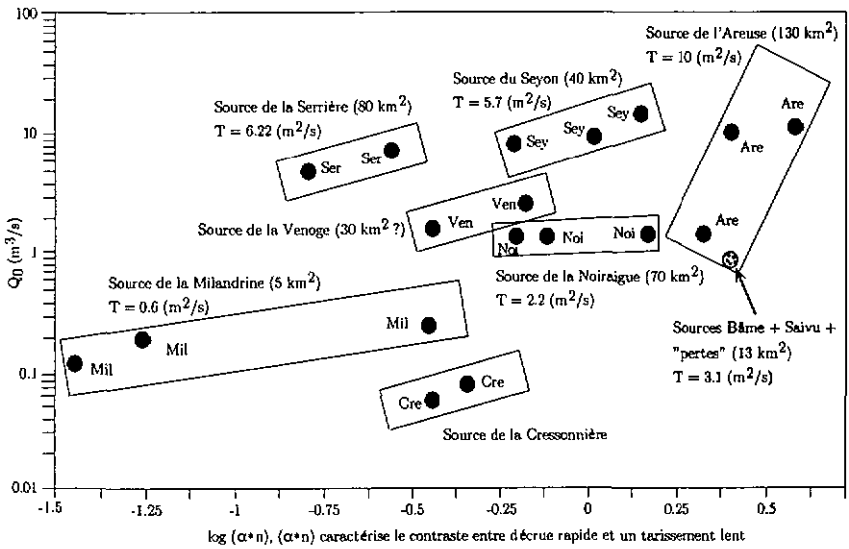


Figure 5.20: *Représentation paramétrique des courbes de décrue observées. Les points noirs représentent le contraste α fois n pour une décrue analysée pour différentes sources. Pour chaque source étudiée nous avons calculé la transmissivité selon le principe de* MIJATOVIC *(1974) et indiqué la superficie du bassin hydrogéologique. Pour la localisation géographique des sources voir la figure 1.1*

Sur la base des représentations paramétriques, nous constatons que si le réseau karstique ou les zones capacitives de l'aquifère prédominent le contraste sera faible (les réserves de l'aquifère seront variables).

L'utilisation d'un modèle déterministe met en évidence que le problème de l'interprétation des courbes de débit des sources karstiques pour inférer les caractéristiques physiques de l'aquifère est loin d'être résolu et que l'emploi de certains paramètres peut apporter des résultats erronés sur l'aquifère étudié.

Chapitre 6

Utilisation d'un modèle de simulation numérique pour vérifier les hypothèses émises lors du traitement par les analyses corrélatoires et spectrales

Dans cette partie du chapitre la démarche adoptée est la même que celle du chapitre précédent. L'emploi d'un modèle karstique théorique permet d'obtenir un hydrogramme qui est la réponse d'un aquifère dont la structure est connue à une alimentation qui l'est également.

6.1 Résultats des simulations numériques des écoulements souterrains dans un aquifère karstique

6.1.1 Brève description des bassins karstiques théoriques

Les conduits karstiques à perméabilité élevée sont simulés par des éléments quadratiques 1-D, qui sont noyés dans des éléments quadratiques 2-D et 3-D représentant les volumes fracturés à faible perméabilité fig. 6.1. Le tableau 6.1 regroupe les caracteristiques des modèles et les paramètres utilisés dans la simulation numerique des écoulements souterrains des trois bassins théoriques.

6.1.2 Simulation numérique 2-D d'une crue : interprétation statistique

Nous avons comparé les réponses hydrodynamiques des différents modèles pour une recharge variable d'une durée 24 heures. Cette recharge de forme triangulaire passe de 0 a un maximum de $3 \cdot 10^{-7}$ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$ en 12 heures (fig. 6.2). La figure 6.2 présente les réponses simulées des trois bassins sur une période de 1200 heures. Deux principales caractéristiques se dégagent de cette

Caractéristiques	Mod9	Mod1	Mod8	Mod1.1
Superficie du bassin (km^2)	6	12	12	12
Epaisseur de l'aquière (m)	500	50	50	50
Dim. des zones peu perméables (m^2)	$3(km^3)$	1000	variable	250
K : élément 1-D ($m \cdot s^{-1}$)	100	10	10	10
K : élément 2-D ($m \cdot s^{-1}$)	-	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
K : élément 3-D ($m \cdot s^{-1}$)	$5 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
S : élément 1-D	0,05	0,05	0,05	0,05
S : élément 2-D ou 3-D	$1 \cdot 10^{-5}$(3-D)	0,005(2-D)	0,005(2-D)	0,005(2-D)
Nombre de noeuds	1167	1617	1617	1617
Nombre d'éléments	232	648	648	648
éléments 1-D	56	264	264	264
éléments 2-D ou 3-D	176(3-D)	384(2-D)	384(2-D)	384(2-D)
Alimentation concentrée (%)	variable	56	56	56

Tableau 6.1: *Paramètres hydrogéologiques introduits dans les modèles karstiques théoriques. En prenant en compte l'épikarst 2-D dans Mod9, le nombre noeuds est 1428, T= $5 \cdot 10^2$ $m^2 \cdot s^{-1}$, S est 400 fois plus élevé dans le réseau karstique.*

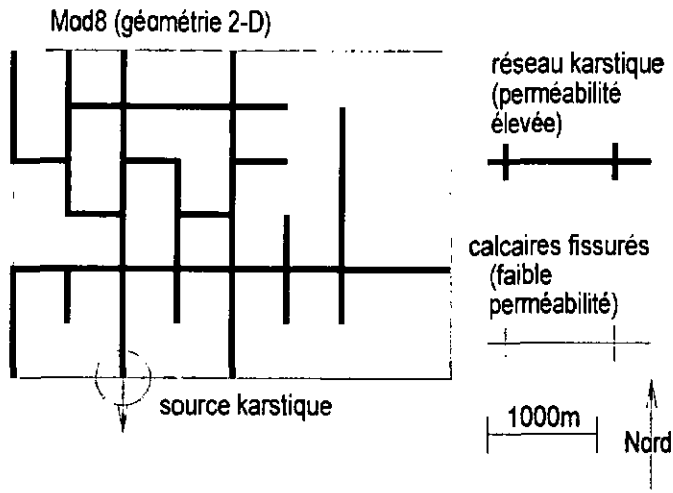


Figure 6.1: *Réseau à éléments finis pour la variante MOD8. Les lignes fines représentent les limites des éléments. L'épaisseur de l'aquifère théorique est de 50 mètres.*

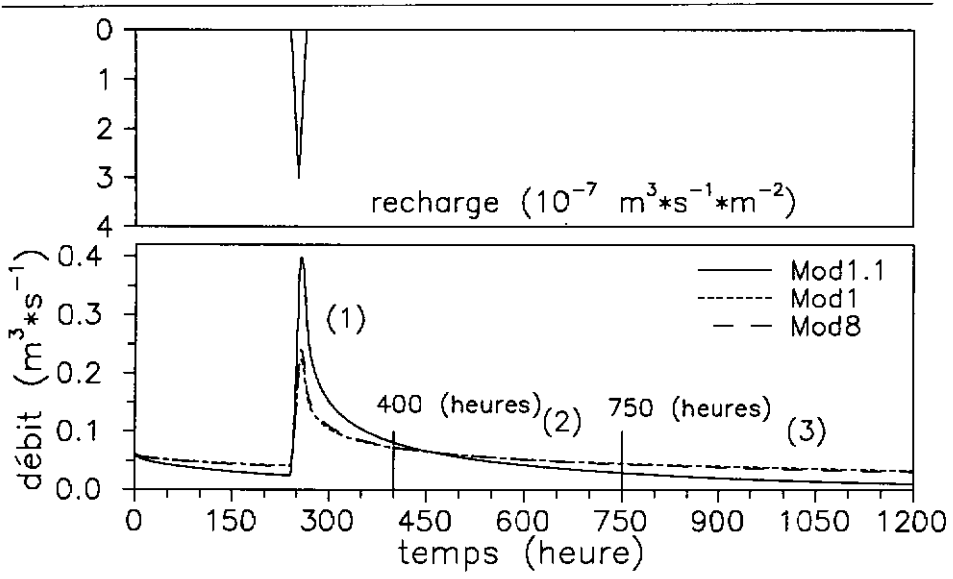


Figure 6.2: *Hydrogramme simulés pour la même recharge de forme triangulaire MOD1, MOD1.1, MOD8. Pour la signification des numéros voir texte.*

figure: (i) les réponses des modèles Mod1 et Mod8 sont semblables malgré des géométries du réseau karstique fort différentes, (ii) la réponse de Mod1.1, dont la densité du réseau karstique est la plus importante, est différente des Mod1 et Mod8. L'amplitude élevée de la crue ainsi que la forme du tarissement (voir les débits de 0 à 250 heures et de 500 à 1200 heures) caractérisent un aquifère bien drainé avec une densité du réseau karstique importante. Par comparaison avec les bassins Mod1 et Mod8 les réserves écoulables sont moins importantes.

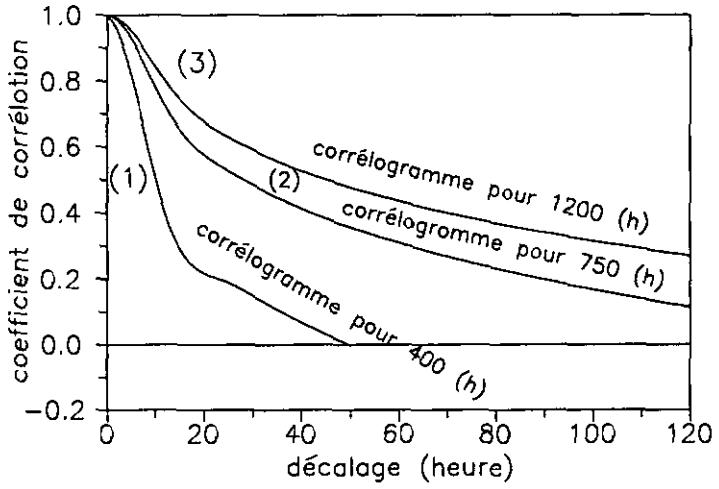


Figure 6.3: *Corrélogrammes (débits-débits) de l'hydrogramme simulé du MOD1.1 pour trois périodes de temps (voir fig. 6.2, coupure de la chronique des débits à 400 heures (1), 700 heures (2) et 1200 heures (3)).*

La figure 6.3 présente les corrélogrammes de l'hydrogramme simulé du Mod1.1 pour trois longueurs différentes de la chronique (fig. 6.2, coupure après 400 heures de simulation (1), 700 heures (2) et 1200 heures (3)). La fonction d'auto-corrélation de la chronique de 400 heures décroit la plus rapidement. Les corrélogrammes atteignent $r_k = 0.2$ respectivement 22 heures (1), 90 heures (2) et plus de 120 heures (3). Pour cet exemple, la descente plus ou moins rapide de la fonction d'auto-corrélation est a relier à la longueur de la chronique analysée (fig. 6.2, 6.3). En d'autres mots plus la longueur de la chronique traitée est importante, plus le contraste est faible. L'interprétation statistique traditionnelle des corrélogrammes de la figure 6.3 montre deux comportements hydrogéologiques différents. Le corrélogramme (1) décroît très rapidement caracterisant un aquifère avec un réseau karstique développé et des réserves écoulables faibles. Les corrélogrammes (2) et (3) montrent une décroissance de la fonction d'auto-corrélation plus amortie, caractéristique d'aquifères peu karstifiés aux réserves écoulables plus importantes.

Ces interprétations montrent que pour un même aquifère karstique, l'allure du corrélogramme donne des informations hydrogéologiques variées selon le contraste décrue-tarissement (voir exemple Arense-Serrière). De plus, l'allure des corrélogrammes dépend également de la fréquence

des crues. Pour un même aquifère, plus la fréquence des crues est élevée plus la décroissance du corrélogramme est rapide.

6.1.3 Simulation numérique 2-D d'une chronique des débits : interprétation statistique

La sensibilité de l'interprétation statistique (débits-débits et précipitations-débits) a été abordé en simulant des hydrogrammes sur plusieurs années. Une alimentation journalière sur 5 années de 1984 à 1989 (BULTOT *et al.*, 1992) a été imposée sur les bassins karstiques théoriques Mod1 et Mod1.1.

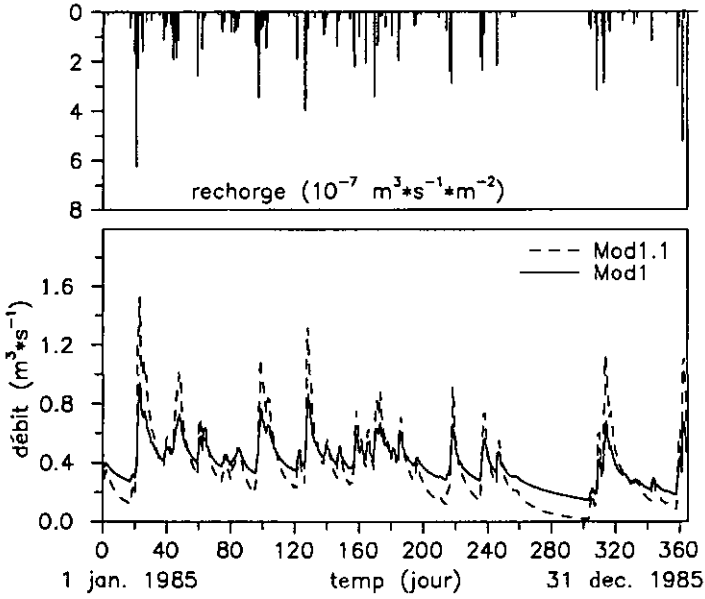


Figure 6.4: *hydrogramme simulé pour les variantes MOD1, MOD1.1 pour une recharge sur 5 années. La chronique de recharge est tirée de* BULTOT *et al. (1992). Sur la figure nous avons seulement représenté une partie de l'hydrogramme simulé.*

La figure 6.4 présente les 2 hydrogrammes simulés pour la seule année 1985. Les hydrogrammes simulés différent par l'amplitude des crues mais également par la valeur des débits en période d'étiage. Les différences visibles au niveau des bydrogrammes simulés sont dues à

la densité du réseau karstique. La dimension des volumes à faible perméabilité est de 1000 m^2 pour le Mod1 est seulement de 250 m^2 pour le Mod1.1.

Regardons maintenant l'interprétation de ces hydrogrammes simulés par les outils statistiques.

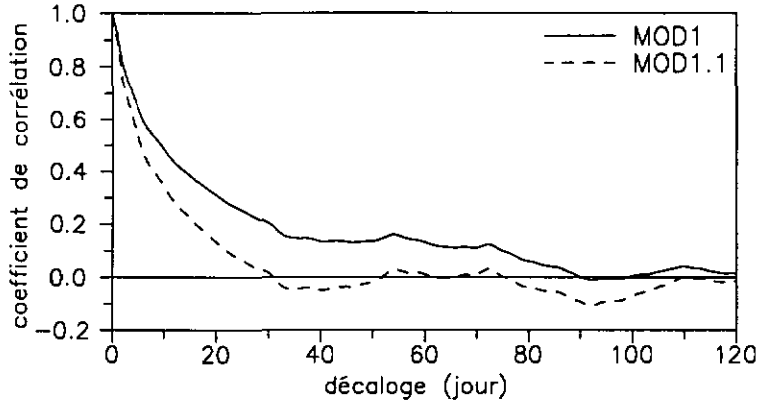


Figure 6.5: *Corrélogrammes (débit-débit) pour les hydrogrammes des variantes MOD1. MOD1.1.*

La figure 6.5 montre que la fonction d'auto-corrélation du Mod1.1 décroit plus rapidement que celle du Mod1. L'interprétation indique que Mod1.1 à un réseau karstique plus important et des réserves écoulables plus faibles que Mod1. Dans ce cas, l'interprétation statistique corrobore les paramètres hydrogéologiques introduits dans les modèles théoriques présentés. Il en est de même pour l'interprétation des corrélogrammes croisée (recharge-débits, figure 6.6).

6.1.4 Simulation numérique 3-D d'une chronique des débits : interprétation statistique

Nous avons montré par des modèles 2-D l'influence des paramètres structuraux (par exemple la densité du réseau karstique) sur la forme de l'hydrogramme et des corrélogrammes. Nous montrons à l'aide d'un modèle 3-D un autre facteur déterminant sur la forme de l'hydrogramme et donc à priori sur la forme du corrélogramme. Un modèle 3-D a été utilisé (KIRALY *et al.*, 1995) pouvant distribuer l'alimentation sur l'aquifère principal de façon variable (de 100 % d'alimentation diffuse à 100 % d'alimentation concentrée). Ce synclinal karstique théorique est drainé par un réseau aboutissant à une source, exutoire unique (TAB. 6.1, figure 6.7).

La figure 6.8 présente trois hydrogrammes simulés à la source pour différents taux d'alimentation directement drainé par le réseau karstique. Bien évidemment les hydrogrammes simulés

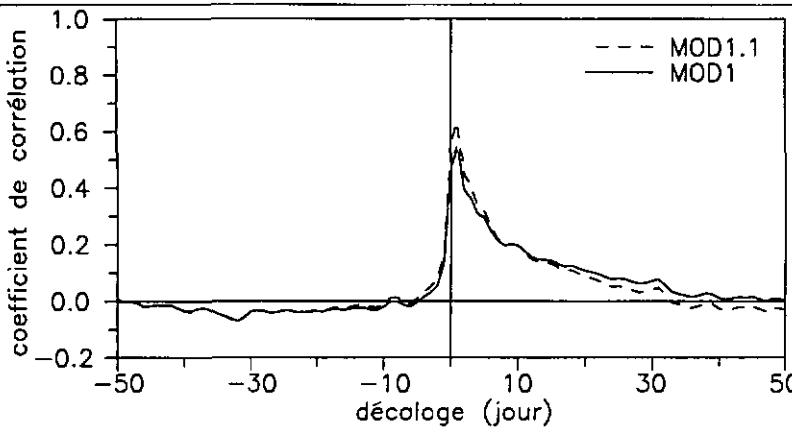


Figure 6.6: *Corrélogrammes croisés (recharge-débit) pour les hydrogrommes des variantes MOD1, MOD1.1.*

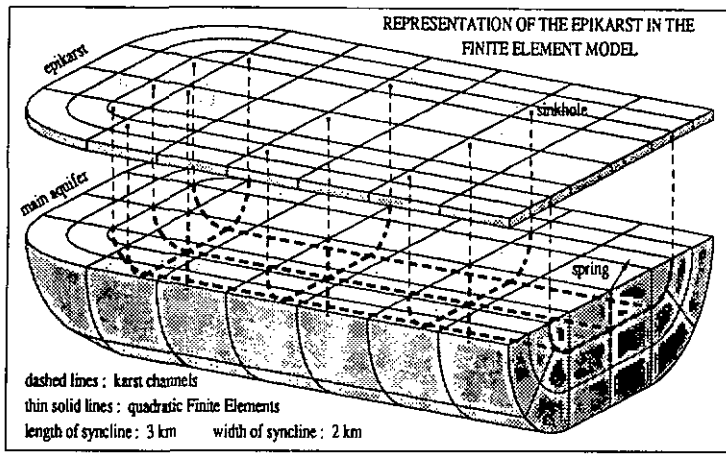


Figure 6.7: *Réseau à éléments finis pour la variante MOD9. Les lignes fines représentent les limites des éléments. L'épaisseur de l'aquifère théorique est de 50 mètres. (d'après* KIRALY *et al., 1995)*

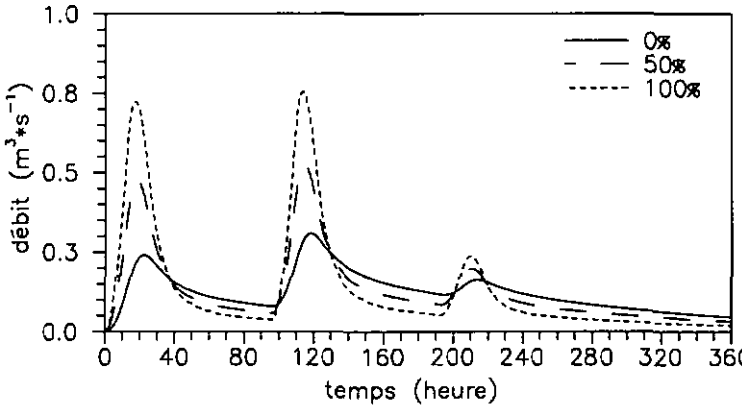


Figure 6.8: Hydrogrammes simulés du Mod9 pour différentes proportions de l'infiltration directement drainée par le réseau karstique.

sont différents notamment les débits extrêmes. Ce n'est pas le cas des corrélogrammes (débits-débits) qui présentent un même comportement (figure 6.9). Dans cet exemple, les résultats indiquent clairement que le corrélogramme masque l'effet du mode d'alimentation.

6.2 Conclusion

Les résultats des simulations numériques 2-D et 3-D des bassins karstiques théoriques montrent que les interprétations hydrogéologiques issues des analyses statistiques ne sont pas univoques. En d'autres mots que les relations - allure du corrélogramme - pouvoir régulateur et état de karstification de l'aquifère - ne sont pas toujours correctement déduites.

Malgré les limites, inhérentes aux modèles 2-D et 3-D, les simulations montrent clairement la nécessite de disposer de bonnes informations hydrogéologiques sur les aquifères étudiés avant d'employer les outils statistiques. Le régime climatique, avec la fréquence des averses, le mode d'infiltration particulier du karst, c'est à dire le rapport entre l'infiltration diffuse et concentrée jouent un rôle prépondérent sur la forme de l'hydrogramme et donc du corrélogramme. Sans un niveau de connaissances hydrogéologiques suffisant, il nous semble difficile d'accepter aveuglement les résultats de comparaison d'aquifères karstiques fort différents et soumis a des régimes climatiques divers. Ce niveau de connaissances peut être atteint en analysant la variabilité des réponses à la source. Par exemple, WHITE (1988) prend en compte quelques points remarquables de l'*hydrogramme pour caractériser un aquifère karstique*. BONACCI (1987, 1993) obtient des informations en combinant les réponses naturelles (débits des sources karstiques) et provoquées (caractéristiques hydrodynamiques dans les forages).

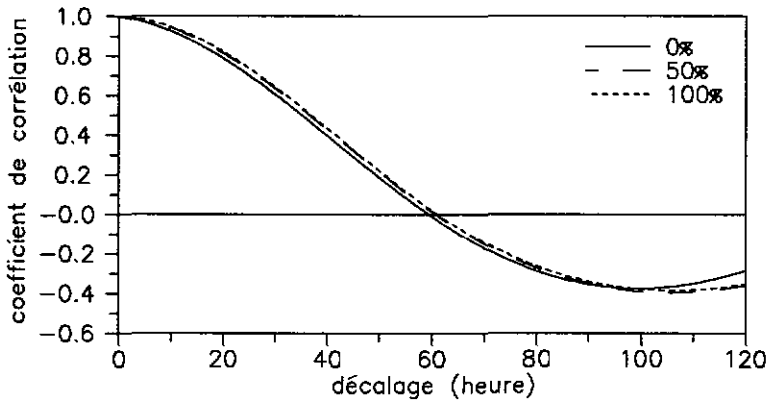


Figure 6.9: *Corrélogrammes (débits-débits) des hydrogrammes simulés du MOD9.*

Si les modèles de simulation numériques à éléments finis sont indispensables à l'étude théorique et à la solution de notre problème, leur utilisation se heurte dans la pratique à une très grande difficulté, c'est-à-dire que l'on ne connaît jamais, à l'échelle d'un bassin, la géométrie et la densité du réseau karstique très perméable. Avec le corrélogramme croisé le système karstique est considéré globalement c'est-à-dire comme une boîte noire. Seules les données concernant la fonction d'entrée, c'est-à-dire les précipitations et la fonction de sortie, c'est-à-dire l'hydrogramme sont prises en considération. La fonction liant la chronique d'entrée et l'hydrogramme est une fonction de transfert qui prend en compte globalement tous les paramètres de l'aquifère karstique tels la géométrie et la densité des chenaux. Cette fonction de transfert peut être déterminée à partir d'une corrélation croisée entre les pluies et les débits à la source. Afin de comparer les corrélogrammes croisés entre eux (c'est-à-dire les aquifères karstiques) il est utile de trouver, pour l'ensemble des réponses un pas de temps commun. Pour le corrélogramme croisé, la fonction d'entrée journalière rectangulaire est celle employée quelque soit les dimensions du bassin karstique considéré. ROSSIER *et al.*, (1992) souligne que la fonction triangulaire est plus appropriée que la fonction d'entrée rectangulaire. Les résultats des simulations numériques présentées montrent que le corrélogramme croisé peut servir d'opérateur caractéristique de la relation précipitations-débits. L'avantage de cet outil, est qu'à partir d'un "input" rectangulaire (on emploie le plus souvent des prépitations journalières) on obtient une allure raisonnable de la relation précipitations-débits.

Finalement ces outils statistiques (incluant les décompositions des hydrogrammes) sont acceptables et recommandables si notre objectif est la prédiction de débits caractéristiques, la mise en évidence de tendances voire la gestion globale des ressources en eau; mais il faut être prudent si l'on désire obtenir des informations sur les caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques.

Chapitre 7

Conclusions générales

Dans le projet *ISHYDRO*, l'accent a été volontairement porté sur l'étude des chroniques à l'exutoire des aquifères (débit, physico-chimie et isotopes). Dans cette optique un réseau d'observation des eaux souterraines fut mis en place, principalement en milieu karstique. Les premières interprétations issues des chroniques physico-chimiques et isotopiques (1987-1990) ont été présentées (LAVANCHY, 1986; LAVANCHY *et al.*, 1987, 1988; THIERRIN, 1990; SURBECK et EISENLOHR, 1993, 1995).

Suite à ces premiers travaux, nous avons étudié les chroniques des débits aux exutoires de divers bassins karstiques réels en fonction des données disponibles. L'approche sur plusieurs cycles hydrologiques (19, 31 et 85 cycles) met en évidence la grande variabilité du débit aux exutoires. Les tendances des débits observés peuvent s'expliquer dans un schéma simple mettant en relation directe les paramètres climatiques - l'entrée du système - et les débits - la sortie. Dans ce schéma, extrêmement simplifié, des facteurs externes influents comme les effets anthropiques ne sont pas pris en considération (influence de l'homme sur l'évolution de la végétation, prélèvements d'eau dans les nappes, ...) (ROSSIER et EISENLOHR, 1993).

Les résultats de l'étude hydrogéologique sont grandement tributaires de contraintes et d'obligations pragmatiques. Ces dernières sont liées à l'originalité de la structure du karst ainsi qu'aux caractéristiques des données. On analyse couramment les réponses globales de l'aquifère et la simulation numérique déterministe est mise en oeuvre sur quelques configurations d'aquifères choisies en fonction du niveau de connaissance. Cette démarche est inhérente à la méconnaissance, à l'échelle d'un bassin, de la géométrie et des propriétés du réseau karstique.

Sur la base des enregistrements en continu des débits nous avons mis en évidence les possibilités et les limites de l'interprétation des hydrogrammes. L'application de différentes techniques spécialement conçues par divers auteurs, permet de caractériser et/ou de classer les aquifères karstiques : décomposition des hydrogammes (selon différents principes), analyses corrélatoires et spectrales (simples et croisées), tests de tendances, hydrogramme unitaire. Il est clair que de telles techniques ont été développées pour des objectifs spécifiques liés à des niveaux d'information accessibles.

Nous utilisons dans ce mémoire des modèles numériques à éléments finis 2-D et 3-D pour tester la réponse hydrodynamique de divers bassins karstiques théoriques. Le but de ces simu-

lations est de contrôler des hypothèses hydrogéologiques sur la structure et le fonctionnement des aquifères émises lors de l'interprétation des hydrogrammes par les méthodes hydrologiques et statistiques. Nous nous sommes également focalisés sur des périodes plus courtes de l'hydrogramme (c.i. événement de crue : courbe de concentration, décrue et tarissement). En théorie et en pratique, la décomposition des hydrogrammes simples selon différents auteurs a pour but de caractériser l'aquifère karstique. Divers paramètres de synthèse sont tirés de l'hydrogramme à travers des fonctions mathématiques (exponentielle, hyperbolique, homographique et d'autres par combinaison - en rapport avec les schémas préalables admis -).

A l'appui de nombreuses simulations numériques des réponses de bassins kartiques théoriques, nous pouvons appuyer des travaux antérieurs et suggérer que : (i) Les exponentielles résultant de la décomposition de l'hydrogramme ne correspondent pas forcément à différents types de fissures, ayant des perméabilités et des porosités significativement distinctes; (ii) La partie non-exponentielle de la courbe de décrue ne peut rendre compte à elle seule de l'infiltration à travers la zone non-saturée; (iii) La partie purement exponentielle de la courbe de décrue ne caractérise pas uniquement la vidange des zones capacitives de l'aquifère, mais elle est grandement dépendante de la structure du réseau karstique. Sans aucune connaissance de la géométrie et de la répartition spatiale du réseau karstique, le coefficient de tarissement α ne peut fournir de renseignements sur la perméabilité et la dimension des blocs peu perméables.

L'application d'une formule hyperbolique permet de s'affranchir de la signification physique liée à la vidange de l'aquifère tout en apportant des éléments de réponse appréciables. De l'ajustement d'une telle fonction sur l'hydrogramme réel résulte deux paramètres α et n dont le produit caractérise le contraste entre décrue rapide et tarissement lent. L'avantage d'une telle formule est de représenter les crues dans un repère de coordonnées Q_0 versus $\log(\alpha \cdot n)$. Ainsi la comparaison entre divers hydrogrammes est possible. Le contraste entre décrue rapide et tarissement lent est fonction directe de la perméabilité du réseau karstique, de la dimension des blocs capacitifs, de l'extension du bassin d'alimentation ou du réseau, de la configuration de la fonction d'alimentation et du coefficient d'emmagasinement des blocs et du réseau karstique.

Par ailleurs, l'interprétation de la forme du corrélogramme simple et croisé ne donne pas forcément des indications directes sur (i) l'état de karstification et (ii) le volume d'eau emmagasiné par l'aquifère karstique. Malgré les limites, inhérentes aux modèles 2-D et 3-D, les simulations montrent clairement la nécessité de disposer de bonnes informations hydrogéologiques sur les aquifères étudiés avant d'employer les outils statistiques. Le régime climatique, avec la fréquence des averses, le mode d'infiltration particulier du karst, c'est à dire le rapport entre l'infiltration diffuse et concentrée jouent un rôle prépondérent sur la forme de l'hydrogramme et donc du corrélogramme. Sans un niveau de connaissances hydrogéologiques suffisant, il nous semble difficile d'accepter aveuglement les résultats de comparaison d'aquifères karstiques fort différents et soumis a des régimes climatiques divers.

Cette revue critique a été rendu possible en réalisant des aller et retour entre les résultats provenant d'une approche globale (de l'allure de l'hydrogramme résulte une interprétation sur le type de structure : réserves et état de la karstification) et leurs transferts vers une approche déterministe appliquée sur des bassins karstiques théoriques. Le but étant de valider à chaque fois la véracité des paramètres - pris un par un - obtenus après décomposition d'un hydrogramme simple. L'allure de chaque phase de l'hydrogramme de récession dépend de la synthèse des caractéristiques de la zone fortement perméable (réseau karstique) et moins perméable

(blocs). Ces simulations soulignent l'importance de la combinaison de divers facteurs dans l'identification du comportement de l'hydrodynamique de l'exutoire (e.g. KIRALY et MOREL, 1976b; EISENLOHR *et al.*, 1995).

Finalement, les réponses naturelles des aquifères karstiques traduisent la variabilité du régime (processus connus de longue date) (e.g. KIRALY, 1975; MANGIN, 1975; ATKINSSON, 1977). Cette variabilité du régime rend compte des propriétés intrinsèques de l'aquifère (processus encore peu connus) (e.g. BONACCI, 1987; MANGIN, 1986; NEVEN-KRESIC, 1993).

Bibliographie

ATKINSSON T.C. (1977) Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *J. Hydrol.*, **35** : 93-103.

BAKALOWICZ M. et MANGIN A. (1980) L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. *Mém. h. s. Soc. Géol. France*, **11** : 71-79.

BEAR J. (1979) Hydraulics of groundwater. (ed. Mc Graw-Hill), London, 569p.

BENAVENTE J. y MANGIN A. (1984) Aplicacion del analisis de series de tiempo al sistema espeleologica *Hundidero-Gato primero Congreso Español de Geologia*, **3** : 541-553.

BERKALOFF E. (1967) Limite de validité des formules courantes de tarissement de débit. *Chr. d'hydrogéol.*, **10** : 31-41.

BERTRAND J., MATHEY et MORNOD L. (1973) Inversion temporaire du gradient hydraulique dans un karst et hétérogénéité de la perméabilité. *Bull. Soc. neuchâteloise Sc. nat.*, **96** : 97-103.

BEZES C. (1976) Contribution à la modélisation des systèmes aquifères karstiques. Etablissement du modèle Bemer. *C.E.R.G.A.*, Montpellier, t. X, fasc. I-II, 137p.

BONACCI O. (1987) Karst hydrology. Spring-Verlag, Berlin.

BONACCI O. (1993) Karst springs hydrographes as indicators of karst aquifers. *J. Hydrol. Sciences*, **38**, 1-2: 187-198.

BONNET M., MARGAT J. et THIERY D. (1976) Essai de représentation du comportement hydraulique d'un système karstique par modèle déterministe : Application à la Fontaine de Vaucluse. *Annales Sc. de l'Université de Besançon, Géol.*, **2** : 79-95.

BOUSSINESQ J. (1904) Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *J. Math. pures et appl.*, 5^e série, **10** : 5-78.

BOX G.E.P. and JENKINS G.M. (1974) Time series analysis : forecasting and control. (ed. Holden-Day Californie), San Francisco, 575 p.

BULTOT F., GELLENS D., SPREAFICO M. and SCHADLER B. (1992) Repercussions of a CO_2 doubling on the water balance. A case study in Switzerland. *J. Hydrol.*, **137** : 199-208.

BURGER A. (1956) Interprétation mathématique de la courbe de décroissance du débit de l'Areuse, Jura neuchâtelois (Suisse). *Bull. Soc. neuchâteloise Sci. Nat.*, **79** : 49-54.

BURGER A. (1959) Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. *Bull. Soc. neuchâteloise Géogr.*, t. 52, 11, fasc. 1 : 5-304.

BURGER A. (1979) Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines karstiques contre la pollution. Application au Jura suisse. *Bull. Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **3** : 115-154.

BURGER A. (1983) Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. *Gaz-Eaux-Eaux Usées*, **9** : 533-583.

BURGER A. (1992) Hydrogéologie du bassin de la source de l'Areuse. *In Hydrogeology of selected karst regions*, (eds. Paloc, Back), **13**: 159-177.

CASTANY G. (1967) Introduction à l'étude des courbes de tarissement. *Chronique Hydrogéol.*, BRGM, **10** : 23-30.

CHOW V.T. and KARELIOTIS S.J. (1970) Analysis of stochastic hydrologic systems. *Water Ressources Research*, 6 : 1569-1582.

COUTAGNE A. (1948) Etude générale des variations de débit en fonction des facteurs qui les conditionnent. 2e partie : Les variations de débit en période non-influencée par les précipitations, le débit d'infiltration (corrélations fluviales internes). *Houille Blanche*, 3e année, **5** : 46-416.

CROCHET P., MARSAUD B. et RAZIN P. (1992) Approche de la structure et du fonctionnement d'un système karstique dans le cadre d'une étude préliminaire. Application au système de Glandasse (Drôme, France). *Annales sci. de l'Université de Besançon, Géol.*, **11** : 191-198.

DAVIS J.C. (1986) Statistics and data analysis in geology. (eds. Wiley et sons), New York, 646p.

DODGE P. (1983) Hydrogéologie des aquifères karstiques du Causse Comtal (Aveyron, France). *Thèse Doc. ès Sci.*, Bruxelles, 596p.

DREISS S.J. (1982) Linear kernels for karst aquifers. *Water Resour. Res.*, **18** : 865-876.

DREYBRODT W. (1987) The kinetics of calcite dissolution and its consequences to karst evolution from the initial to mature state. *National Speleological Society Bull.*, **49** : 31-49.

DREYBRODT W. (1988) Processes in karst systems-physics, chemistry and gelogy. In Springer Series in Physical Environments, (ed. Springer), Berlin, 288p.

DREYBRODT W. (1989) Karst development in its initial state : a model of speleogenesis. *Proceedings of the 10th Internatianal Congress on Speleology*, Budapest, Hungary, (ed. Kosa), **1** : 174-176.

DREYBRODT W. (1990) The role of dissolution kinetics in the development of karstification in limestone : a model simulation of karst evolution. *J. Geol.*, **98** : 639-655.

DROGUE C. (1967) Essai de détermination des composantes de l'écoulement des sources karstiques. *Chronique Hydrogéol.*, BRGM, **10** : 42-47.

DROGUE C. et PUECH P. (1968) Reconnaissance géologiques et hydrogéologiques pour la construction de barrages en terrains calcaires. *Terre et Eaux*, **23**, 65 : 10-22.

DROGUE C. (1969) Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après l'exemple de quelques karsts préméditerranéens. *Thèse Doc. ès Sci.*, Montpellier, 482p.

DROGUE C. (1972) Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. *J. Hydrol.*, **15** : 49-68.

DROGUE C. et GUILBOT A. (1977) Représentativité d'un bassin témoin en hydrogéologie karstique : Application à la modélisation des écoulements souterrains d'un aquifère de grande extension. *J. Hydrol.*, **32** : 57-70.

DROGUE C. (1980) Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés, fissurés. Application à l'interprétation de certains aspects du fonctionnement hydrogéologique. *Mém. h. s. Soc. Géol. France*, **11** : 101-108.

DROGUE C. (1991) Schéma conceptuel de l'aquifère karstique et application à l'analyse hydrodynamique. *Tra. Inst. Spéol. "Emile "Racovitza"*, t. XXX : 111-127.

EISENLOHR L., ROSSIER Y., BOUZELBOUDJEN M. and KIRALY L. (1995) Numerical simulation as a tool for controlling the interpretation of karst spring hydrographs. In *Proceedings of the Congress of I.A.H. : SOLUTIONS'95*, Edmonton, Alberta, Canada.

FORKASIEWICZ J. et PALOC H. (1967) Le régime de tarissement de la Foux de la Vis. *Chronique Hydrogéol.*, BRGM, **10** : 59-73.

GRASSO A.D. (1993) Comparaison de différentes méthodologies appliquées à l'étude des systèmes karstiques : Application sur le site de Bure (Jura). *Dip. 3e cycle*, Centre Hydrogéol., Neuchâtel, 92p.

GRÉTILLAT P.A. (1992) Carte hydrogéologique de l'Ajoie (Suisse). *OFEP*, Suisse.

GUERIN F., LELONG F. et LEPILLER M. (1988) Etude du fonctionnement de trois systèmes hydrologiques en milieu cristallin fissuré (Mont Lozère- France) : Applications des analyses corrélatoires et spectrales à l'étude des principales relations bydrologiques à court, moyen et long terme. *Annales sci. de l'Université de Besançon, Géol.*, 6 : 405-412.

ITTY J. et VINTAER J. (1987) Contribution à l'étude géologique et hydrologique du haut bassin de l'Ain (Jura, France). *Thèse Doc. ès Sci.*, Besançon, 336p.

JACQUEMIN P. (1984) Réponses hydrodynamiques des Hauts bassins du Douhs et de la Loue : simulation des écoulements; influence de l'enneigement et de la traversée du lac S^t Point; etude des pertes du Doubs. *Thèse Doc. ès Sci.*, Besançon, 168p.

JEANBLANC A. et SCHNEIDER G. (1981) Etude géologique et hydrogéologique du Risoux - Mont-d'Or. *Thèse Doc. ès Sci.*, Besançon, 155p.

JULIAN P.R. (1967) Variance spectrum analysis. *Water Ressources Research*, **3** : 831-845.

KIRALY L., MATHEY B. et TRIPET J.P. (1971) Fissuration et orientation des cavités souterraines. *Bull. Soc. neuchâteloise Sci. Nat.*, **94** : 99-114

KIRALY L. (1975) Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. In Hydrogeology of karstic terrains, *Union of Geol. Sciences*, (eds. Burger et Dubertret), Series B, **3** : 53-67.

KIRALY L. et MOREL G. (1976a) Etude de la régulation de l'Areuse par modèle mathématique. *Bull. Centre Hydrogéol.*, Neuchâtel, **1** : 19-36.

KIRALY L. et MOREL G. (1976b) Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulées par modèles mathématiques. *Bull. Centre Hydrogéol.*, Neuchâtel, **1** : 37-60.

KIRALY L. (1978) La notion d'unité hydrogéologique - Essai de définition. *Bull. Centre Hydrogéol.*, Neuchâtel, **2** : 83-216.

KIRALY L. (1979) Remarques sur la simulation des failles et du réseau karstique par éléments finis dans les modèles d'écoulement. *Bull. Centre Hydrogéol.*, Neuchâtel, **3** : 155-167.

KIRALY L. et MUELLER I. (1979) Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst : effet sur la variation du chimisme des sources karstiques. *Bull. Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **3** : 237-285.

KIRALY L. (1985) FEM 301 : A three dimensional model for groundwater flow simulation. NAGRA Technical Report, 84-49 : 7-12.

KIRALY L. (1988) Large scale 3-D groundwater flow modelling in highly beterogeneous geologic medium. Groundwater flow quality modelling, Reidel Publishing Company, (eds. Custodio *et al.*), **224** : 761-775.

KIRALY L., PERROCHET P. and ROSSIER Y. (1992) Effect of the epikarst on karst spring. *COST 65, Project 1* : Numerical simulation in karst, 9p.

KIRALY L. (1993) Besoins et réalités dans la modélisation hydrogéologique en milieu fissuré. *As. suisse Sc. nat.*, Verbier, Suisse, 9p.

KIRALY L., PERROCHET P. and ROSSIER Y. (1995) Effect of the epikarst on the hydrograph of karst spring : a numerical approach. *Bull. Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **14** : 199-220.

LAVANCHY Y. (1986) La source de la Cressonnière à Moiry (VD) : une source hypertherme peu connue. Premières observations. *Bull. Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **6** : 27-41.

LAVANCHY Y., BOECKMANN J. et LAHL H. (1987) L'utilisation des éléments traces comme traceurs au pied du Jura vaudois. L'exemple du baryum. *Bull. du Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **7** : 305-319.

LAVANCHY Y., MUELLER I., ZWAHLEN F. and SCHOTTERER U. (1988) Several principle mechanisms of karstic springs in Switzerland related to physical and geological characteristics of their catchment. In *IAH 21st Congress: Karst hydrogeology and karst environment protect* : 386-393.

LEPILLER M. et MONDAIN P.H. (1988) Les recherches en hydrogéologie karstique menées depuis dix ans dans les massifs subalpins septentrionaux par le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Orléans (France). *Bull. Centre Hydrogéol.*, Neuchâtel, **8** : 27-48

MAILLET E. (1905) Essais d'hydraulique souterraine et fluviale, (ed. Herman), Paris, 218p.

MANGIN A. (1975) Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Thèse Doc. ès Sci., Annales de spéléol.*, 29: 285-382, 495-601, **30** : 21-124.

MANGIN A. (1981a) Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **193** : 401-404.

MANGIN A. (1981b) Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **193** : 1011-1014.

MANGIN A. (1982) Mise en évidence de l'originalité et de la diversité des aquifères karstiques. *Annales Sci. de l'Université de Besançon, Géol.*, **1** : 159-172.

MANGIN A. (1984) Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. Hydrol.*, **67** : 25-34.

MANGIN A. (1986) Reflexion sur l'approche et la modélisation des aquifères karstiques. *Karst Euskadi-86* : 11-30.

MANIA J. et RAMON S. (1980) Reconstitution du débit journalier de trois sources karstiques de l'est de la France. *Agence Financière de bassin rhin-meuse*, 28p.

MARSILY G. de (1981) Hydrogéologie quantitative. (ed. Masson), Paris, 215p.

MATHEY B. (1976) Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon. *Thèse Doc. ès Sci.*, Neuchâtel, 325p.

MERO F. and GILBOA Y. (1974) A methodology for the rapid evaluation of groundwater ressources, Sao Paulo state, Brazil. *Bull. Sci. Hydro.*, XIX, **3** : 346-358.

MERO F. (1978) The MMO8 hydrometeorological simulation system. Basic concepts and operators guide. *Tahal consulting engineers LTD*, Tel Aviv Israel, 18p.

MEURY-FLURY-RIEBEN (1991) Etude géologique et géophysique, reconnaissances indirectes de la route nationale suisse N16 entre jonction de Boncourt et jonction de Porrentruy ouvest. *Rap. Interne* **3**, Delémont, Suisse.

MEUS P. (1993) Hydrogéologie d'un aquifère karstique dans les calcaires carbonifères (Néblon-Anthisnes, Belgique). Apport des traçages à la connaissance des milieux fissurés et karstiques. *Thèse Doc. ès Sci.*, Liège, 323p.

MIJATOVIC B. (1968) A metbod of studying the bydrodynamic regime of karst aquifers by analysis of the discharge curve and level fluctuations during regression. In *Vesnik Zadorn za geoloska i géofizicka intrazivanja*, Serie B, Beograd, **8** : 43-81.

MIJATOVIC B. (1974) Détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement par la courbe de tarissement dans les aquifères karstiques. In *Congrès de Montpellier*, Tome X, 1 : 225-230.

MONDAIN P.H. (1991) Hydrogéologie des sytèmes karstiques de l'unité delphino-helvétique inférieure entre les vallées du Fier et du Borne (massif des Bornes, Haute-Savoie, France). *Thèse Doc. ès Sci.*, Orléans, 2vol., 645p.

MUET P. (1989) Hydrogéologie du nord-est du Causse de Martel (Corrèze). *Bull. BRGM*, 1 : 27-44.

NEVEN-KRESIC A. (1993) Review and selected bibliography on quantitative definition of karst hydrogeological systems. In *Annotaded bibliography of karst terranes*, (ed. Lamoreaux), **14** : 51-87.

PADILLA A. PULIDO-BOSCH A. and MANGIN A. (1994) Relative importance of baseflow and quickflow from bydrographes of karst spring. *Ground Water*, **32**, 2 : 267-277.

PADILLA A. and PULIDO-BOSH A. (1995). Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. J. HYDROL., **168** : 73-89.

PERROCHET P. (1992) Simulation numérique des phénomènes de transport : Application à des milieux fortement convectif. *Thèse Doc. ès Sci.*, EPF Lausanne, 101p.

PULIDO-BOSCH A. et PADILLA-BENITEZ A. (1988) Deux exemples des modélisation d'aquifères karstiques espagnols. *Bull. BRGM*, **4** : 281-291.

REMENIERAS G. (1965) L'hydrologie de l'ingénieur. (ed. Eyrolles), Paris, 456p.

ROCHE M. (1963) L'hydrologie de surface. (eds. Gauthier-Villars), Paris, 430p.

ROSSIER Y. et PERROCHET P. (1991) Etude comparative de modèles de transport appliquée à la convection pure. *Bull. Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **10** : 47-61.

ROSSIER Y. et KIRALY L. (1992) Effet de la dilution sur la détermination des dispersivités par interprétation des essais de traçage dans les aquifères karstiques. *Bull. Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **11** : 1-15.

ROSSIER Y., KIRALY L., TRIPET J.P. et ZWAHLEN F. (1992) Interprétation quantitative des essais de traçage dans les aquifères karstiques. Utilisation pour la protection des eaux. *Annales sci. de l'Université de Besançon*, Géol., 11 : 65-76.

ROSSIER Y. et EISENLOHR L. (1993) Impact des changements climatiques sur les aquifères karstiques. *Projet Fonds National PNR-31*, Centre Hydrogéo. Neuchâtel.

SAUTER M. (1992) Nonpoint-source transport in a karst hydrological system. *Annales sci. de l'Université de Besançon*, Géol., **11** : 169-177.

SCHOELLER H. (1967) Hydrodynamique dans le karst. *Chronique Hydrogéol.*, BRGM, **10** : 7-21.

SCHOUWEY V. (1989) Comparaison des paramètres physico-chimiques de quatre systèmes karstiques (Préalpes fribourgeoises et Jura neuchâtelois). *Bull. Centre hydrogéol.*, Neuchâtel, **9** : 67-79.

SIMEONI J.P. et JAMIER D. (1975) Relations entre éléments structuraux et morphologie dans la région du plateau de Bure (Jura tabulaire). *Bull. Soc. neuchâteloise Sci. Nat.*, **98** : 163-173.

SOULIOS G. (1991) Contribution à l'étude des courbes de récession des sources karstiques : exemples du pays hellenique. *J. Hydrol.*, **124** : 29-42.

SURBECK H. and EISENLOHR L. (1993) Radon is a tracer in hydrology. In 2^e *C.I.G.G. Coll. Int sur la Géochimie des Gaz*, Besançon, France.

SURBECK H. and EISENLOHR L. (1995) Radon as a natural tracer to study transport processes in a karst system. In *Proceedings of the Congress of I.A.H. : SOLUTIONS'95*, Edmonton, Alberta, Canada.

TRIERRIN J. (1990) Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). *Thèse Doc. ès Sci.*, Neuchâtel, 306p.

TISON G. (1960) Courbe de tarissement, coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin. *Mém. A.I.H.S.*, Helsinki : 229-243.

TISSOT G. et TRESSE P. (1978) Etude des sytèmes karstiques du Lison et du Vernau, région de Nans-sous-Sainte Anne (Doubs). *Thèse Doc. Géol. Appl.*, Besançon, 134p.

TOTH J. (1962) A theory of groudwater motion in a small drainage basins in Central Alberta, Canada. *J. Geophys. Res.*, **67** : 4375-4387.

TOTH J. (1963) A theoretical analysis of groudwater flow in small drainage basins. *J. of Geophys. Res.*, **68** : 4795-4812.

TRIPET J.P. (1969) Une méthode d'approche de l'analyse du tarissement d'une source karstique. Etude préliminaire. *Mém. B.R.G.M.*, **76** : 701-709.

TRIPET J.P. (1972) Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). *Thèse Doc. ès Sci.*, Neuchâtel, 183p.

TURBERG P. (1993) Apport de la cartographie radiomagnétellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés. *Thèse Doc. ès Sci.*, Neuchâtel, 140p.

VENTSEL H. (1973) Théorie des probabilités. (ed. Mir), Moscou,563p.

WHITE W.B. (1988) Geomorphology and Hydrology of karst terrains. Oxford University Press, New York, 464p.

WILKINSON W.B. and COOPER D.M. (1993) The response of idealized aquifer/river systems to climate change. *J. Hydrol. Scie.*, **38**, 5 : 379-390.

YEVJEVITCH V. (1972) Stochastic processes in hydrology. *Water Ressources Publications*, Fort Collins, Colo, 276p.

ZOETL J.G. (1989) Bibliography of the history of karst research. In Lamoreaux , P.E., editor, Hydrologie of limestone terranes. In Annoted Bibliography of carbonate rocks, *IAH int. Contr. Hydrog.*, (ed. Heise), Volume Four, Hannover, Germany, **10** : 1-58.

ZWAHLEN F., BURGER A., THIERRIN J., LAVANCHY Y., OESCHGER H. et SCHOTTERER U. (1990) ISHYDRO : Projet de recherche sur l'application des traceurs hydrochimiques et isotopiques naturels à l'étude des écoulements souterrains. *Proceedings of the* 22^{nd} *Congress of the I.A.H. : Water ressources in montainous regions*, Lausanne, Switzerland.

Liste des figures

1.1 *Région d'investigation du projet ISHYDRO; localisation des sources appartenant au réseau de suivi à long terme des eaux souterraines et citées dans le mémoire.* 4

1.2 *Acquisition et traitement des données; l'exemple de la source de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse). Pour cette source karstique Vauclusienne, un échantillonnage est réalisé mensuellement (depuis 1989) pour les éléments chimiques majeurs (cf. premier paragraphe). L'enregistrement est en continu pour le débit (station Fédérale depuis 1959), la température et la conductivité électrique (depuis 1989) et le radon (depuis 1994 en collaboration avec la Section de Surveillance de la Radioactivité, Office Fédéral de la Santé Publique).* 4

2.1 *Schéma des relations entre facteurs géologiques, propriétés physiques de l'aquifère et caractères géologiques dans le karst (d'après* KIRALY, *1975)* 12

2.2 *Représentation schématique de l'effet d'échelle sur la perméabilité dans le karst (d'après* KIRALY, *1975)* 13

2.3 *Profil schématique avec observation des niveaux d'eau dans les forages et interprétation de l'allure de la zone noyée. Site de Bure en Ajoie (Canton du Jura, Suisse) (d'après* TURBERG, *1993)* 13

2.4 *Tableau synoptique représentant les problèmes à résoudre pour la reconstruction des systèmes d'écoulement (d'après* KIRALY, *1975)* 14

2.5 *Schématisation d'un système karstique (d'après* MANGIN, *1975).* 17

2.6 a, b : *Juxtaposition et superposition des systèmes d'écoulement : l'aquifère (d'après* TOTH, *1962, 1963)* 20

2.7 *Transfert de l'eau entre la surface du sol et la source (d'après* KIRALY *et* MOREL, *1976b)* 22

2.8 *Processus du recours à la modélisation (d'après* KIRALY, *1998)* 23

3.1 *Représentation des diverses parties d'un hydrogramme simple : courbe de concentration, courbe de décrue et courbe de tarissement; des diverses phases de l'écoulement, crue, décrue et tarissement* 28

3.2 *Présentation historique des schémas permettant une décomposition ou l'analyse des hydrogrammes des sources karstiques* 30

3.3 *Hydrogramme simple et sa décomposition en trois fonctions exponentielles (A, B et C). Chaque exponentielle est caractérisée par un coefficient de tarissement (α_1, α_2 et α_3), un temps marquant le début du tarissement (T_1, T_2 et T_3) ainsi qu'un débit initial lors du sommet de la crue ($Q_{0'}$, $Q_{0''}$ et $Q_{0'''}$). (d'après* FORKASIEWICZ *et* PALOC. *1967)* 34

3.4 *Classification des aquifères karstiques en fonction des décompositions des hydrogrammes de récession (d'après* MANGIN, *1975) I : Système très karstifié en aval. Réseau spéléologique très développé. II : Réseau spéléologique développé, débouchant en aval sur un important karst noyé. III : Système plus karstifié en amont qu'en aval, avec des retards dans l'alimentation dus, soit à des terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante. IV : Domaine des systèmes complexes.* 36

3.5 *Représentation d'un hydrogramme simple par l'ajustement d'une fonction homographique notée Ψ_t et d'une fonction exponentielle notée Φ_t (d'après* MANGIN, *1975)* 37

3.6 *Illustration d'un schéma théorique du régime de l'écoulement souterrain pour les aquifères karstiques (d'après* TRIPET, *1972)* 40

3.7 *Décomposition d'une crue de la source karstique de la Milandrine (Suisse, Canton du Jura).* **a** *: Selon* FORKASIEWICZ *et* PALOC *(1967).* **b** *: Selon* DROGUE *(1972).* **c** *: Selon* MANGIN *(1975). (évolution des débits versus temps (h))* . . . 44

3.8 *Classification selon les paramètres i et k tirés de la décomposition des hydrogrammes de récession; v:source de la Venoge (VD), s:source de Sandli (FR), c:source de la Cressonière (VD) et m:source de la Milandrine (JU).* 45

4.1 **a** *: Représentation de trois séries périodiques;* **b** *: Corrélogrammes simples de ces trois séries* 52

4.2 **a** *: Représentation de trois séries périodiques;* **b** *: Corrélogrammes simples des séries 1, 2 et 3* 54

4.3 **a**, **b** *: Représentation de quatre séries périodiques;* **c**, **d** *: Corrélogrammes simples des différentes séries* 55

4.4 *Cycles hyrologiques à l'exutoire de la grotte de la Milandrine (Canton du Jura, Suisse)* **a** *: Cycle 1990-1991;* **b** *: Cycle 1991-1992;* **c** *: Corrélogrammes simples des hydrogrammes (*GRASSO, *1993)* 57

4.5 *a : Hydrogrammes de la source de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse); b : Corrélogrammes simples des hydrogrammes; c : Spectres de densité des différents hydrogrammes* 58

4.6 *Hydrogrammes des sources karstiques de l'Areuse (ligne en pointillée) et de la Serrière (ligne pleine) pour le cycle hydrologique 1984-1985. Les débits moyens journaliers sont collectés au niveau des stations fédérales limnimétriques (Canton de Neuchâtel, Suisse). Précipitations journalières pour la même période à la station climatique des Ponts-de-Martel (Canton de Neuchâtel, Suisse).* 60

4.7 *Corrélogrammes (débits-débits) des sources de l'Areuse et de la Serrière pour 8 années hydrologiques (valeurs journalières de 1982-1989); Corrélogramme (précipitations-précipitations) à la station des Ponts-de-Martel (valeurs journalières de 1982-1989).* 61

5.1 **a** : *Représentation schématique d'un synclinal karstique 3-D. Le réseau karstique est plongé dans un volume de calcaire fissuré peu perméable.* **b** : *Répartition des potentiels hydrauliques dans le synclinal de la figure a pour un taux d'infiltration donné (d'après* KIRALY *dans* BURGER, *1983).* 67

5.2 **a** : *Représentation 2D plan du bassin karstique théorique de référence : Mod1, l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m;* **b** : *Discrétisation des blocs capacitif (volumes fissurés peu perméables);* **c** : *Réponse du bassin karstique théorique Mod1 à une alimentation de type A1 (de durée 24h et de forme triangulaire)* 68

5.3 *Ecoulement en fin de simulation dans le karst théorique de référence Mod1 (13 jours après l'averse)* 70

5.4 *Représentation 2D plan du bassin karstique théorique Mod1.1 par comparaison au bassin Mod1; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m* 71

5.5 **a** : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1 et Mod1.1 répondant à une alimentation de type A1;* **b** : *Echelle logarithmique* 72

5.6 *Ecoulement en fin de simulation dans le karst théorique pour la variante Mod1.1 (13 jours après l'averse)* 73

5.7 *Représentation 2D plan des bassins karstiques théorique Mod2.1 et Mod2.3; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m* 75

5.8 **a** : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod2.1 et Mod2.3 ainsi que la variante de référence Mod1 répondant à une alimentation de type A1;* **b** : *Echelle logarithmique* 76

5.9 *Représentation 2D plan des variantes Mod3.1 et Mod3.2; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m* 78

5.10 **a** : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod3.1 et Mod3.2 répondant à une alimentation de type A1;* **b** : *Echelle logarithmique* . . 78

5.11 **a** : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod4.1 et Mod4.2 répondant à une alimentation de type A1;* **b** : *Echelle logarithmique* . . 80

5.12 *Représentation 2D plan des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod5.1 et Mod5.2; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m* 81

5.13 a : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod5.1 et Mod5.2 répondant à une alimentation de type A1;* b : *Echelle logarithmique* . . 82

5.14 *Représentation des fonctions d'alimentation A1, A2 et A3* 84

5.15 a : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod6.1 (alimentation A2) et Mod6.2 (alimentation A3) ainsi que la variante de référence Mod1 répondant à une alimentation de type A1;* b : *Echelle logarithmique* 85

5.16 *Représentation 2D plan des bassins karstiques théoriques Mod7.1, Mod7.2 et Mod7.3; l'épaisseur de l'aquifère est de 50 m* 86

5.17 a : *hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod7.1 et Mod7.2 ainsi que la variante de référence Mod1;* b : *Echelle logarithmique* 88

5.18 *Représentation paramétrique des courbes de décrue observées; comparaison des réponses de différents aquifères karstiques avec celle d'un milieu poreux. Les points noirs représentent le contraste α fois n pour une décrue analysée pour différentes sources. Source de l'Aare, de la Milandrine (M), de la Cressonnière (C), de la Noiraigue (N), de la Venoge (V), du Seyon (Sy), de la Serrière (Se) et de l'Areuse (A), pour la localisation de ces exutoires voir la figure 1.1. Cette figure représente également la dispersion du contraste α fois n pour les bassins karstiques théoriques* 92

5.19 *Représentation paramétrique des courbes de décrue simulées* 93

5.20 *Représentation paramétrique des courbes de décrue observées. Les points noirs représentent le contraste α fois n pour une décrue analysée pour différentes sources. Pour chaque source étudiée nous avons calculé la transmissivité selon le principe de* MIJATOVIC *(1974) et indiqué la superficie du bassin hydrogéologique. Pour la localisation géographique des sources voir la figure 1.1* 94

6.1 *Réseau à éléments finis pour la variante MOD8. Les lignes fines représentent les limites des éléments. L'épaisseur de l'aquifère théorique est de 50 mètres.* . . 96

6.2 *Hydrogramme simulés pour la même recharge de forme triangulaire MOD1, MOD1.1. MOD8. Pour la signification des numéros voir texte.* 97

6.3 *Corrélogrammes (débits-débits) de l'hydrogramme simulé du MOD1.1 pour trois périodes de temps (voir fig. 6.2, coupure de la chronique des débits à 400 heures (1), 700 heures (2) et 1200 heures (3))* 98

6.4 *hydrogramme simulé pour les variantes MOD1, MOD1.1 pour une recharge sur 5 années. La chronique de recharge est tirée de* BULTOT *et al. (1992). Sur la figure nous avons seulement représenté une partie de l'hydrogramme simulé.* . . . 99

6.5 *Corrélogrammes (débit-débit) pour les hydrogrammes des variantes MOD1, MOD1.1.* 100

6.6 *Corrélogrammes croisés (recharge-débit) pour les hydrogrammes des variantes MOD1, MOD1.1.* 101

6.7 *Réseau à éléments finis pour la variante MOD9. Les lignes fines représentent les limites des éléments. L'épaisseur de l'aquifère théorique est de 50 mètres. (d'après* KIRALY *et al., 1995)* 101

6.8 Hydrogrammes simulés du Mod9 pour différentes proportions de l'infiltration directement drainée par le réseau karstique. 102

6.9 *Corrélogrammes (débits-débits) des hydrogrammes simulés du MOD9.* 103

Liste des tableaux

2.1 *Classification des aquifères karstiques en fonction des résultats des analyses corrélatoires et spectrales (d'après* MANGIN, *1984)* 16

3.1 *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition* 41

3.2 *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition* 42

3.3 *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition* 42

4.1 *Caractéristiques hydrogéologiques sur les aquifères de l'Areuse et de la Serrière (Canton de Neuchâtel, Suisse).* 59

5.1 *Caractéristiques hydrodynamiques de la variante de référence Mod1* 66

5.2 *Description des variantes Mod1 et Mod1.1; (*) variante de référence* 70

5.3 *Description des variantes Mod1, Mod2.1 et Mod2.3; (*) variante de référence* . . 76

5.4 *Description des variantes Mod1, Mod3.1 et Mod3.2; (*) variante de référence* . . 77

5.5 *Description des variantes Mod1, Mod3.1 et Mod3.2; (*) variante de référence* . . 79

5.6 *Description des variantes Mod1, Mod5.1 et Mod5.2; (*) variante de référence* . . 82

5.7 *Caractéristiques des simulations Mod6.1 et Mod6.2; (*) variante de référence* . . 83

5.8 *Caractéristiques des simulations Mod7.1, Mod7.2 et Mod7.3; (*) variante de référence* 87

6.1 *Paramètres hydrogéologiques introduits dans les modèles karstiques théoriques.* . 96

Annexes

Décomposition des courbes de récession de la source de la Milandrine (Canton du Jura, Suisse)

Voir figure 1, figure 2 et figure 3.

Caractéristiques du modèle	Crue du 18.4-1.6.1990	Crue du 5.7-22.9.1990	Crue du 21.7-Crue du 29.Mod1.1992
Q_{01} l/s	56,4	263,5	104,5
Q_{02} l/s	40,0	40,1	24,5
Q_{03} l/s	19,8	18,62	24,6
α_1	0,9	0,66	9,5
α_2	0,124	$8,45 \cdot 10^{-2}$	0,2
α_3	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Table 1: *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition selon* FORKASIEWICZ *et* PALOC *(1967)*

Caractéristiques du modèle	Crue du 18.4-1.6.1990	Crue du 5.7-22.9.1990	Crue du 21.7-Crue du 29.Mod1.1992
Q_0 l/s	112	210	153,5
α	0,08	0,11	12,8
n	0,41	0,5	0,2

Table 2: *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition Selon* DROGUE *(1972)*

Caractéristiques du modèle	Crue du 18.4-1.6.1990	Crue du 5.7-22.9.1990	Crue du 21.7-Crue du 29.Mod1.1992
Q_0 l/s	120	322	199
Q_{R0} l/s	20	18	24
q_0 l/s	100	304	174
t_i h	1025	1256	600
$\alpha\ j^{-1}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$
ϵ	0,023	0,05	0,35
η	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$

Table 3: *Caractéristiques des paramètres obtenus lors de la décomposition selon* MANGIN *(1975)*

Variantes Mod1 : Influence de la densité du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Voir figure 4. L'alimentation est de type A1 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$; la transmissivité des blocs est de $5 \cdot 10^{-5}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, celle du réseau de référence est de 500 $m^2 \cdot s^{-1}$; le coefficient d'emmagasinement des blocs

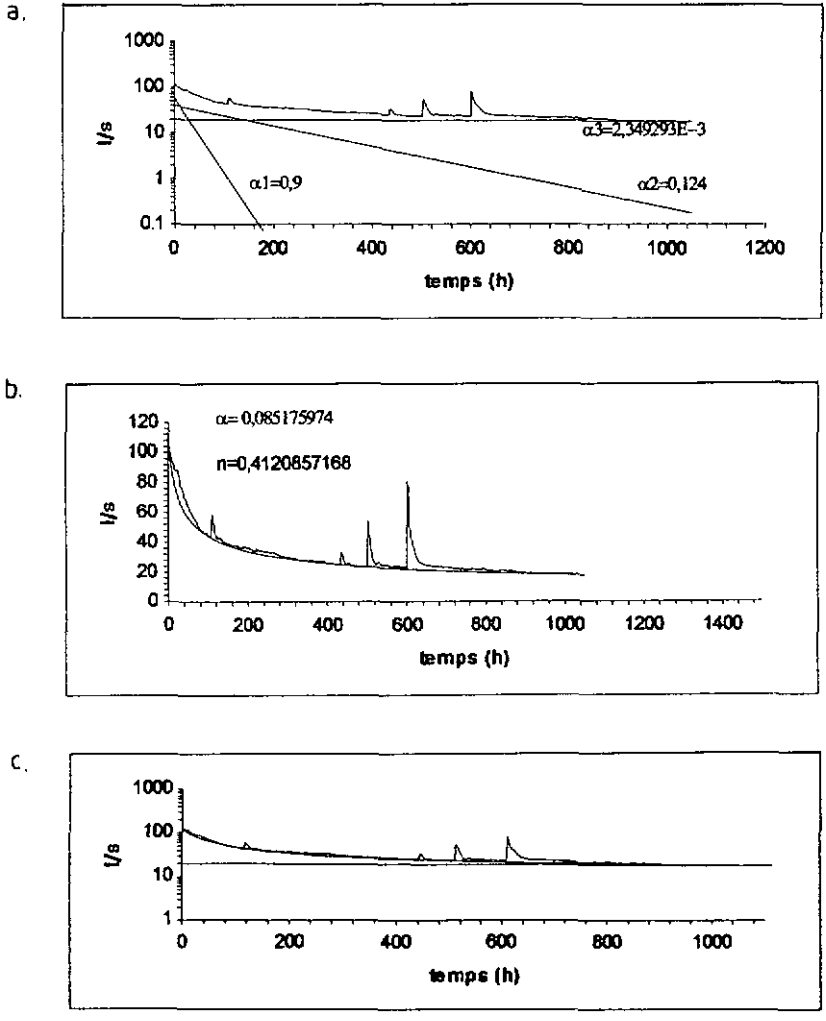
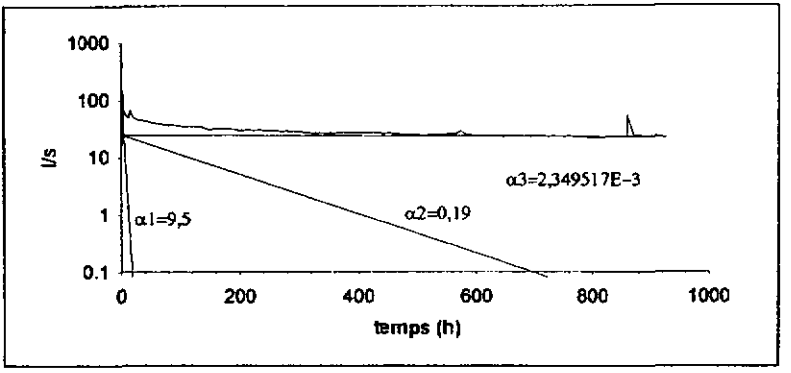
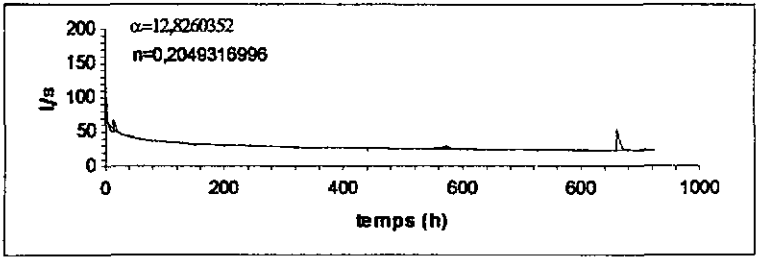


Figure 1: *Décomposition de la courbe de récession du 18.04 au 01.06.1990.* a : *Selon* FORKASIEWICZ *et* PALOC; b : *Selon* DROGUE; c : *Selon* MANGIN

a.



b.



c.

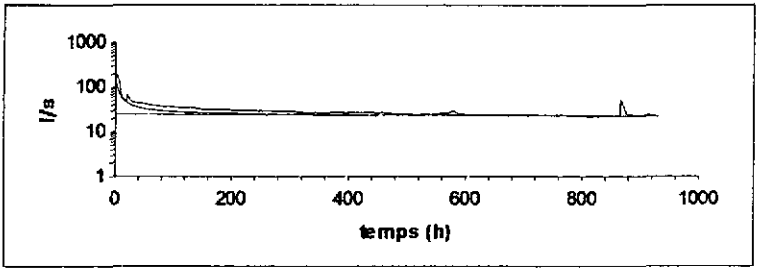


Figure 2: *Décomposition de la courbe de récession du 21.07 au 29.08.1992.* **a** *: Selon* FORKASIEWICZ *et* PALOC*;* **b** *: Selon* DROGUE*;* **c** *: Selon* MANGIN

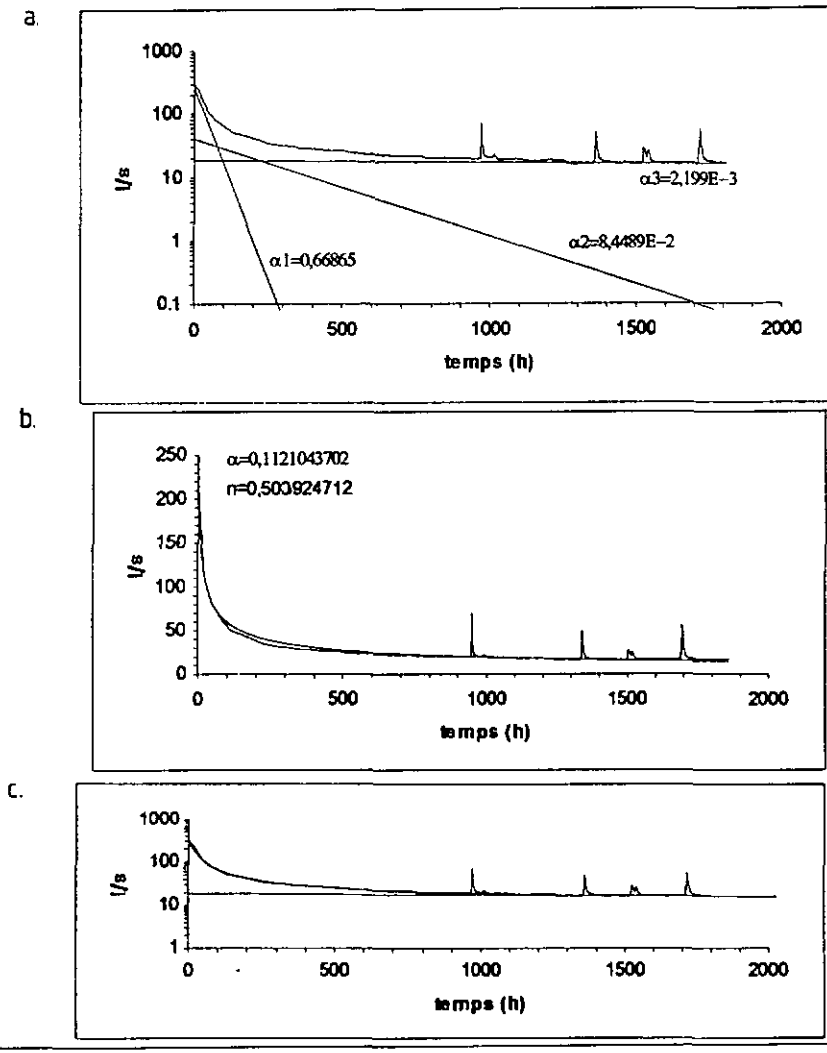


Figure 3: *Décomposition de la courbe de récession du 05.07 au 22.09.1990.* a *: Selon* FORKASIEWICZ *et* PALOC; b *: Selon* DROGUE; c *: Selon* MANGIN

est de 0,005, celui du réseau de 0,05. Les représentations 2D des bassins karstiques théoriques sont de type Mod1 et Mod1.1.

Variantes simulées	Transmissivité du réseau additionnel ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Type de structure du bassin théorique
Mod1	-	Mod1
Mod1.1	500	Mod1.1
Mod1.2	50	Mod1.1
Mod1.3	5	Mod1.1
Mod1.4	$5 \cdot 10^{-2}$	Mod1.1
Mod1.5	$5 \cdot 10^{-1}$	Mod1.1

Table 4: *Caractéristiques des simulations Mod1, Mod1.1, Mod1.2, Mod1.3, Mod1.4 et Mod1.5*

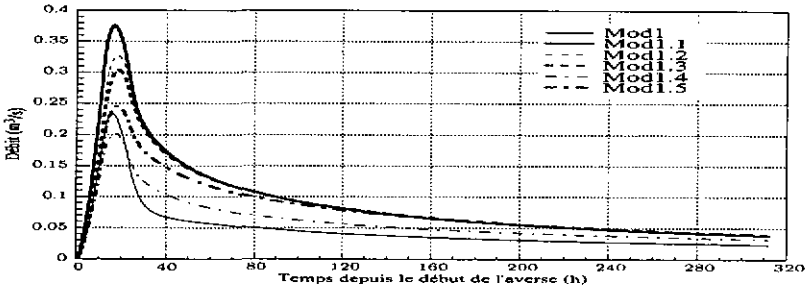


Figure 4: *Hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod1.1, Mod1.2, Mod1.3, Mod1.4 et Mod1.5*

Variantes Mod2 : Influence de l'extension du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Voir figure 5. L'alimentation est de type A1 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$; la transmissivité des blocs est de $5 \cdot 10^{-5}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, celle du réseau de référence est de 500 $m^2 \cdot s^{-1}$; le coefficient d'emmagasinement des blocs est de 0,005, celui du réseau de 0,05. Les représentations 2D des bassins karstiques théoriques sont de type Mod1, Mod2.1 et Mod2.3.

Variantes Mod3 : Influence de la hiérarchisation du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Voir figure 6. L'alimentation est de type A1 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$; la transmissivité des blocs est de $5 \cdot 10^{-5}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, celle du réseau de référence est de 500 $m^2 \cdot s^{-1}$; le coefficient d'emmagasinement des blocs est de 0,005, celui du réseau de 0,05. Les représentations 2D des bassins karstiques théoriques sont de type Mod1 et Mod3.1.

Variantes Mod4 : Influence du coefficient d'emmagasinement du réseau karstique sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Variantes simulées	Transmissivité du réseau additionnel ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Développement du réseau supplémentaire
Mod1	-	-
Mod2.1	500	est-ouest
Mod2.2	50	est-ouest
Mod2.3	500	nord-sud
Mod2.4	$5 \cdot 10^{-2}$	nord-sud

Table 5: *Caractéristiques des simulations Mod1, Mod2.1, Mod2.2, Mod2.3 et Mod2.4*

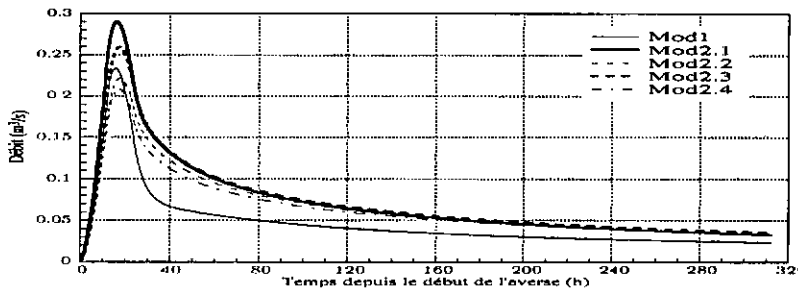


Figure 5: *Hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod2.1, Mod2.2, Mod2.3 et Mod2.4*

Variantes simulées	Présence d'un réseau	Transmissivité du réseau additionnel
Mod1	non	
Mod3.1	oui	500
Mod3.2	oui	$5 \cdot 10^{-2}$

Table 6: *Caractéristiques des simulations Mod1, Mod3.1 et Mod3.2*

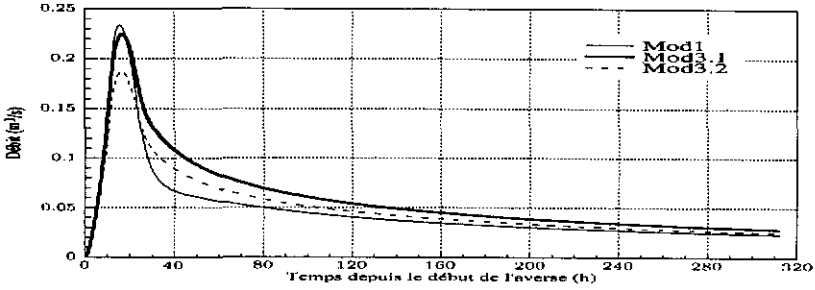


Figure 6: *Hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod3.1 et Mod3.2*

Voir figure 7. L'alimentation est de type A1 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$; la transmissivité des blocs est de $5 \cdot 10^{-5}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, celle du réseau de référence est de 500 $m^2 \cdot s^{-1}$; le coefficient d'emmagasinement des blocs est de 0,005, celui du réseau de 0,05. La représentation 2D des bassins karstiques théoriques est de type Mod1.

Variantes simulées	Coefficient d'emmagasinement réseau karstique	Coefficient d'emmagasinement des blocs capacitifs
Mod1	0,05	0,005
Mod4.1	0,5	0,05
Mod4.2	0,005	0,005
Mod4.3	0,005	0,005

Table 7: *Caractéristiques des simulations Mod1, Mod4.1, Mod4.2 et Mod4.3*

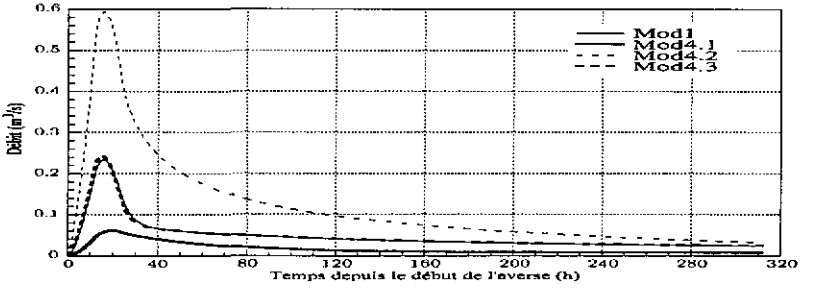


Figure 7: *Hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod4.1, Mod4.2 et Mod4.3*

Variantes Mod5 : Influence de l'extension du bassin d'alimentation sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Voir figure 8. L'alimentation est de type A1 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$; la transmissivité des blocs est de $5 \cdot 10^{-5}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, celle du réseau de référence est de 500 $m^2 \cdot s^{-1}$; le coefficient d'emmagasinement des blocs est de 0,005, celui du réseau de 0,05. La représentation 2D des bassins karstiques théoriques est de type Mod1.

Variantes simulées	Extension du bassin karstique théorique	Surface du bassin karstique théorique
Mod1	-	12
Mod5.1	nord-sud	24
12.2	est-ouest	24
12.3	nord-sud et est-ouest	48
Mod5.4	nord-sud	12
Mod5.5	est-ouest	12

Table 8: *Caractéristiques des simulations Mod1, Mod5.1, 12.2, 12.3, Mod5.4 et Mod5.5*

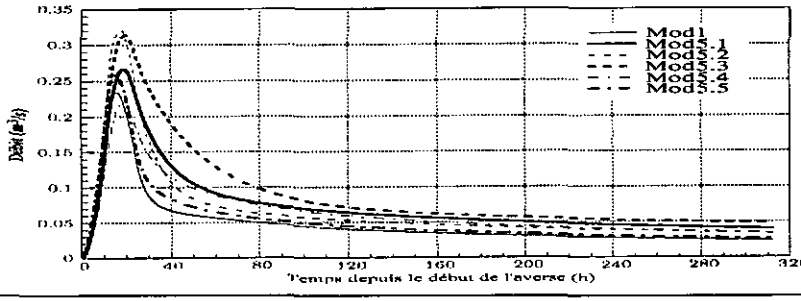


Figure 8: *Hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod5.1, Mod5.2, Mod5.3, Mod5.4 et Mod5.5*

Variantes Mod6 : Influence de la configuration de la fonction d'alimentation sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Voir figure 9. La transmissivité des blocs est de $5 \cdot 10^{-5}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, celle du réseau de référence est de 500 $m^2 \cdot s^{-1}$; le coefficient d'emmagasinement des blocs est de 0,005, celui du réseau de 0,05. La représentation 2D des bassins karstiques théoriques est de type Mod1.

Variantes Mod7 : Influence d'une répartition spatiale hétérogène des alimentations sur la forme de l'hydrogramme des sources karstiques

Voir figure 10. L'alimentation est de type A1 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2$; la transmissivité des blocs est de $5 \cdot 10^{-5}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, celle du réseau de référence est de 50 $m^2 \cdot s^{-1}$; le coefficient d'emmagasinement des blocs est de 0,005, celui du réseau de 0,05. La représentation 2D des bassins karstiques théoriques est de type Mod1.

Décomposition de l'hydrogramme simulé Mod1 en trois fonctions exponentielles

Variantes simulées	Fonction d'alimentation $(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^2)$
Mod1	A1
Mod6.1	A2
Mod6.2	A3

Table 9: *Caractéristiques des simulations Mod1, Mod6.1 et Mod6.2*

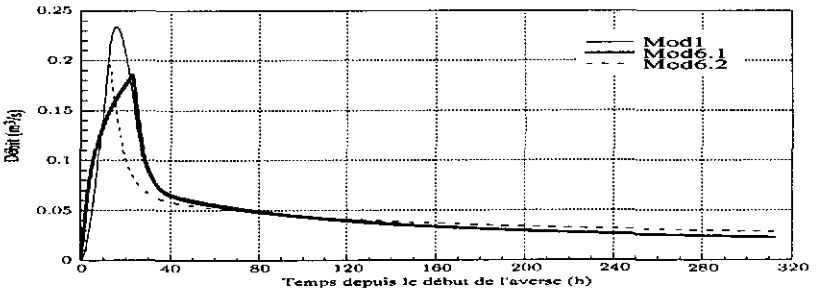


Figure 9: *Hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod6.1 et Mod6.2*

Variantes simulées	Répartition spatiale de l'alimentation à l'échelle du bassin karstique théorique	Surface du bassin karstique théorique
Mod1	toute la surface du bassin	12
Mod7.1	moitié est	12
Mod7.2	moitié ouest	12
Mod7.3	décalage de 16h entre l'alimentation de la moitié est et ouest du bassin	12
Mod7.4	moitié est	24
Mod7.5	moitié ouest	24

Table 10: *Caractéristiques des simulations Mod1, Mod7.1, Mod7.2, Mod7.3, Mod7.4 et Mod7.5*

Variante simulée	Coefficient de tarissement (j-1)	Qmo (m3/s)	H max en fin de simulation (m)	Longueur du réseau (m)	Sommet de la crue (h)	Alpha de Drogue	n de Drogue	Log(alpha*n)	Q max (m3/s)
Mod1	4.69E-02	0.0429	2.09	23	16	0.7467	0.4023	-0.5229	0.2337
Mod1.1	7.05E-02	0.0936	2.20	47	17	0.1030	0.6475	-1.1760	0.3753
Mod1.2	6.96E-02	0.0935	2.22	47	18	0.0815	0.6507	-1.2097	0.3763
Mod1.3	6.83E-02	0.0938	2.24	47	19	0.0693	0.6604	-1.3395	0.3030
Mod1.4	4.90E-02	0.0600	2.47	47	17	0.0885	0.5395	-1.3213	0.2022
Mod1.5	6.39E-02	0.0896	2.31	47	19	0.0696	0.5685	-1.3992	0.2448
Mod2.1	5.90E-02	0.0698	2.51	35	16	0.1208	0.5778	-1.1248	0.2900
Mod2.2	5.67E-02	0.0686	2.53	35	18	0.0806	0.5872	-1.3251	0.2214
Mod2.3	5.40E-02	0.0708	2.21	35	18	0.1096	0.5550	-1.2159	0.2591
Mod2.4	5.02E-02	0.0643	2.31	35	17	0.1078	0.5067	-1.2626	0.2087
Mod3.1	5.45E-02	0.0576	2.52	29	17	0.1268	0.5545	-1.1530	0.2248
Mod3.2	5.07E-02	0.0488	2.52	29	16	0.1238	0.5238	-1.1881	0.1872
Mod4.1	2.30E-02	0.0087	0.26	23	20	0.0392	1.0110	-1.4015	0.0613
Mod4.2	1.25E-01	0.1619	10.94	23	16	0.0771	0.8838	-1.1666	0.5028
Mod4.3	4.68E-02	0.0428	2.69	23	15	0.9341	0.3970	-0.4308	0.2443
Mod5.1	4.06E-02	0.0673	2.64	38	19	0.1251	0.5129	-1.1927	0.2663
Mod5.2	4.00E-02	0.0567	2.64	31	17	0.3226	0.4848	-0.8057	0.3210
Mod5.3	3.25E-02	0.0723	2.59	46	20	0.0825	0.5794	-1.3205	0.3135
Mod5.4	4.68E-02	0.0623	2.20	23	19	0.1179	0.5114	-1.2199	0.2176
Mod5.5	4.84E-02	0.0479	2.54	23	15	0.3903	0.4455	-0.7597	0.2579
Mod6.1	4.67E-02	0.0411	2.58	23	21	0.8516	0.3834	-0.4861	0.1852
Mod6.2	3.22E-02	0.0433	2.39	23	12	1.4280	0.3160	-0.3455	0.1972
Mod7.1	4.68E-02	0.0215	2.69	23	16	0.5533	0.4427	-0.6110	0.1175
Mod7.2	4.69E-02	0.0215	2.69	23	15	0.6457	0.4334	-0.5531	0.1226
Mod7.3	4.80E-02	0.0454	2.69	23	15/32	0.3090	0.3981	-0.9100	0.1224
Mod7.4	3.99E-02	0.0283	2.61	31	20	0.4222	0.4449	-0.7262	0.15256
Mod7.5	4.84E-02	0.0240	2.54	23	17	0.3724	0.4482	-0.7775	0.1252

Table 11: *Tableau regroupant les caractéristiques des hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod2, Mod3, Mod4, Mod5, Mod6 et Mod7*

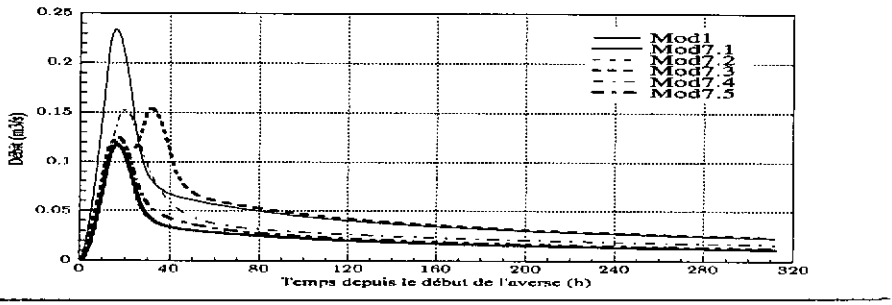


Figure 10: *Hydrogrammes simulés des bassins karstiques théoriques Mod1, Mod7.1, Mod7.2, Mod7.3, Mod7.4 et Mod7.5*

Voir figure 11. Le débit de la source karstique théorique, que l'on assimile dans ce cas à la somme de trois composantes d'écoulements s'écrit :

$$Q_t = 0,12 \cdot e^{-0,23 \cdot t} + 0,06 \cdot e^{-0,035 \cdot t} + 0,049 \cdot e^{-0,0025 \cdot t} \quad (1)$$

Reconstitution du débit journalier de la source de l'Areuse pour la période de septembre 1988 à août 1989 (modèle MERO)

Voir figure 12. Nous présentons sommairement un essai d'application du principe de MERO pour la source Vauclusienne de l'Areuse (Canton de Neuchâtel, Suisse). La conception du modèle utilisé est basée sur la vidange de réservoirs multiples représentants des volumes hydrogéologiques composant le système aquifère (MERO and GILBOA, 1974). Le volume total de l'eau écoulable stockée dans un système aquifère peut s'écrire :

$$V_j = \sum_{j=1}^{n} \int_0^{\infty} Qj(t) \cdot dt = \sum_{j=1}^{n} \int_0^{\infty} Q_{0,j} \cdot exp(-t/t_{0,j}) \cdot dt \quad (2)$$

avec, j le numéro d'ordre de l'unité de stockage (aquifères superficiels ou profonds, surfaces de ruissellement; $Q_{0,j}$ le débit initial au début du cycle hydrologique du jème volume et $t_{0,j}$ le coefficient du temps de tarissement du jème volume. La décharge Q d'un volume de stockage est proportionnel au changement de volume V et à la variation de la surface piézométrique des nappes d'où :

$$\sum_{j=1}^{n} dV/dt = \sum_{j=1}^{n} S_j \cdot A_j \cdot d\bar{h}_j/dt = \sum_{j=1}^{n} Q_{i,j} \quad (3)$$

avec, $\bar{h}_j$ la profondeur de la nappe pour le jème volume; i le temps, S_j le coefficient d'emmagasinement du jème volume et A_j la surface de l'affleurement des volumes de recharge quand le mouvement libre de l'eau peut prendre place.

L'intérêt d'un tel modèle est, entre autre, de reconstituer les débits à l'exutoire à partir des données météorologiques journalières et de paramètres équivalents aux mécanismes de l'infiltration et de la vidange du système aquifère karstique. Cette démarche peu permettre :

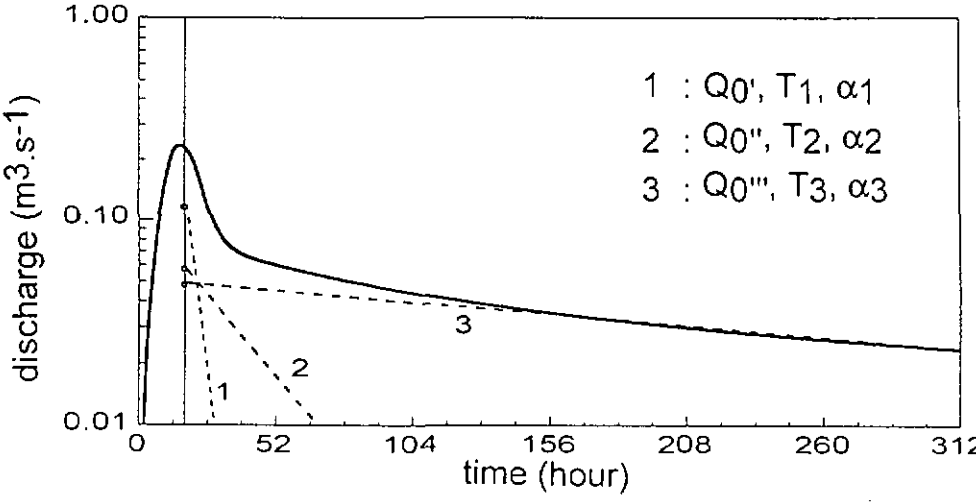


Figure 11: *Hydrogramme simulé du bassin karstique théorique Mod1 et sa décomposition en trois fonctions exponentielles.*

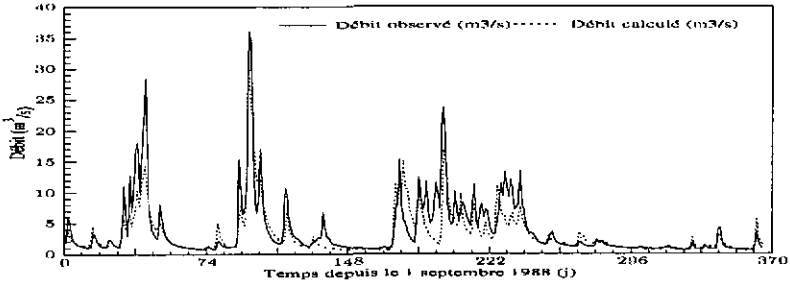


Figure 12: *Simulation des débits de la source de l'Areuse du 1.Mod2.1988 au 31.Mod1.1989*

- L'estimation de la surface du bassin d'alimentation des sources,
- L'appréhension du mécanisme de l'alimentation de la nappe des eaux souterraines,
- L'appréciation de la vulnérabilité de la nappe.