USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

COMPÉTITIVITÉ ÉCONOMIQUE DU MAROC

CONCEPTS DE BASE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

APPORTS ET PRINCIPES D'UTILISATION DES OUTILS HEC, HEC-HMS ET HEC-RAS, PLATEFORME D'INTEGRATION WMS ET OUTIL RIBASIM

FASCICULE 1 : INTRODUCTION A LA MODELISATION EN HYDROLOGIE

DATE : JUIN 2013 **MEC DOCUMENT 137fr**

Ce document a été préparé par DAI pour évaluation par l'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID).

COMPÉTITIVITÉ ÉCONOMIQUE DU MAROC

CONCEPTS DE BASE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

APPORTS ET PRINCIPES D'UTILISATION DES OUTILS HEC, HEC-HMS ET HEC-RAS, PLATEFORME D'INTEGRATION WMS ET OUTIL RIBASIM

FASCICULE 1 : INTRODUCTION A LA MODELISATION EN HYDROLOGIE

Soumis à USAID/Maroc, Bureau de croissance économique - Objectif d'aide n° 3 : Réduction des barrières au commerce et à l'investissement

Par DAI

Numéro de contrat : EEM-I-00-07-00009-00 : Ordre de mission : EEM-I-07-07-00009

L'opinion de l'auteur de ce document engage uniquement la responsabilité de ce dernier et ne reflète pas nécessairement le point de vue de l'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID) ni celui du Gouvernement des États-Unis

Programme Compétitivité Economique du Maroc

8, rue du Rif

Souissi

10 000 Rabat

Maroc

Tel: (212) 05 37 63 05 59

Fax: (212) 05 37 63 05 61

andrew_watson@dai.com

Http://www.mecprogram.ma

TABLE DES MATIERES

Préambule ..... *I*

1. Concepts de base de la Modélisation et la Simulation ***3***

1.1. Introduction 3
1.2. Notion de modélisation 3
1.3. Analyse des systèmes pour la Construction de Modèles 4
1.4. Terminologie 4
1.5. Simulation 5
1.6. Aspects statistiques utiles 5
1.6.2. Inférence statistique 8
1.7. Calage/Calibrage d'un modèle 9
1.8. Erreur moyenne / Mean Error (ME) 10
1.9. Erreur absolue moyenne / Mean Absolute Error (MAE) 11
1.10. Erreur quadratique moyenne Root Mean Square Error (RMSE) 11
1.11. Différence percentile Percent Difference (% Diff) 11
1.12. Coefficient d'Efficacité Nash-Sutcliffe (NS ou E) 11
1.13. Coefficient de Détermination (r^2) 13
1.14. La méthode des moindres carrés / Least-Squares Regression 14
1.15. Indice d'ajustement/ Index of Agreement (d) 16
1.16. Erreur systématique / Systematic Error (MSEs) et erreur non systématique Unsystematic Error (MSEu) 16
1.17. Analyses de sensibilité et d'incertitude 16
1.18. Modèle de prédiction 17
1.19. Documentation 17

2. Modélisation en hydrologie ***19***

2.1. Introduction 19
2.2. Processus hydrologiques de genèse des crues 19
2.3. Facteurs de contrôle des processus de genèse des crues 22
2.4. Les modèles hydrologiques 23
2.5. Classification des modèles hydrologiques 24
2.6. Conclusion 27

3. Références bibliographiques ***29***

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 2.1 : Schématisation de processus de genèse des crues.....20
Figure 2.2 : Classification des modèles hydrologiques.....24

PREAMBULE

Une approche de résolution de problèmes quasi universelle dans le domaine de l'ingénierie est de considérer un problème important (système) et le subdiviser en composants (sous-systèmes). Cette méthode d'analyse suppose que les composants sont plus gérables pour analyser et conduire à la résolution du plus grand problème plus efficacement et peut-être avec plus de précision.

Cette méthode de déconstruction d'un problème est parfois utilisée dans le domaine de l'hydrologie et de l'hydraulique. Dans une étude hydrologique, un bassin versant est délimité et analysé afin de déterminer l'hydrogramme de sortie qui sera produit sous des conditions météorologiques spécifiques.

i)La modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique est l'utilisation des mathématiques pour représenter l'écoulement de l'eau dans un bassin versant. Le bassin reçoit généralement de l'eau sous forme de précipitations. Une bonne partie de l'eau se déplace à travers le bassin versant via un réseau de cours d'eau et sort à un exutoire. L'eau peut également être accumulée dans les zones de stockage dans le bassin versant. La modélisation d'un système hydrologique peut être utile pour simuler ces différents processus précipitations-ruissellement (pluie-débit) dans un bassin versant. Les données peuvent être collectées et utilisées comme des éléments importants pour un modèle, tels que les précipitations et les données de jaugeage des cours d'eau. Ces données d'entrée sont combinées avec les processus hydrologiques différents, y compris des méthodes de routage, de perte et de méthodes de transformation. Ces modèles produisent une estimation du volume et du débit d'écoulement à différents éléments du bassin versant.

ii) Le laminage hydrologique (Flood Routing)

Le laminage hydrologique (Flood Routing) est souvent utilisé pour étudier la propagation du débit dans un cours d'eau.

Le laminage hydrologique est une méthode mathématique pour prédire le changement de la taille et de la vitesse d'une onde de crue qui se propage le long des rivières ou à travers des réservoirs. C'est utile pour comprendre l'ensemble du mouvement de l'eau à partir de la pluie pour créer le ruissellement. Le laminage est essentiellement utilisé pour déterminer la vitesse d'écoulement instationnaire, le long d'un cours d'eau. Dans la plupart des cas, Le laminage hydrologique est utilisé pour les bassins et les réservoirs de stockage. Essentiellement, l'équation de continuité est appliquée pour indiquer un stockage entre l'amont et les conditions en aval. Différentes méthodes ont été développées. En fonction de la méthode de calcul utilisée soit pour le laminage réservoir ou canal, la procédure de laminage peut être modifiée. La méthode de Muskingum est la plus couramment

utilisée ; mais d'autres variantes existent.

1. CONCEPTS DE BASE DE LA MODELISATION ET LA SIMULATION

1.1. INTRODUCTION

L'analyse de processus physiques se fait via l'application de méthodes scientifiques pour la reconnaissance et la définition des problèmes ainsi qu'au développement de procédures pour leur solution. Autrement dit :

- Formulation mathématique du problème.
- Analyse détaillée pour l'obtention de modèles mathématiques.
- Synthèse et présentation de résultats.

Quand les erreurs sur le processus existent, la prise de décision devient plus délicate.

Dans ce chapitre, on introduit des notions de modélisation et de simulation de système ainsi que la terminologie associée en mettant plus l'accent sur l'aspect analyse des données.

1.2. NOTION DE MODÉLISATION

Les modèles sont des imitations de la réalité, et sont utilisés pour représenter des situations réelles de manière à pouvoir permettre l'étude de quelques aspects particuliers, sous des conditions de contrôle impossibles à réaliser.

On distingue:

- Les modèles physiques ou iconiques qui représentent des modèles réduits de prototypes.
- Les modèles analogiques qui exploitent l'analogie entre des lois de divers phénomènes.
- Les modèles conceptuels ou symboliques basés sur les équations régissant les phénomènes en jeu.

Dans ce qui suit, on s'intéressera aux modèles symboliques essentiellement. Evidemment, même s'il existe des lois de comportement du système, il se peut que certaines facettes ne soient pas du tout comprises ou formulées, introduisant ainsi un certain degré d'incertitude

Un modèle mathématique est une expression ou une formulation quantitative d'un processus ou d'un phénomène que l'on essaie d'observer, analyser ou prédire. Comme aucun processus ne peut réellement être complètement observé, toute formulation va impliquer un certain degré de

stochastisme. Un modèle mathématique ne sera conceptuel qu'à un certain degré et sa validité et sa fiabilité dépendront de sa vérification expérimentale.

La vérification du modèle dépend des données disponibles et de leur fiabilité ainsi que des ressources disponibles pour la réalisation des essais.

Le processus de modélisation est heuristique et itératif: si le modèle initialement pris ne satisfait pas les objectifs fixés, il est révisé, d'autres essais sont effectués jusqu'a la satisfaction des objectifs.

1.3. ANALYSE DES SYSTÈMES POUR LA CONSTRUCTION DE MODÈLES

Un système est une structure, un appareil, un schéma ou une procédure reliant une entrée a une sortie dans un référentiel de temps donné.

Les concepts clés d'un système sont:

- Un système est constitué d'bêlements connectés entre eux selon un certain arrangement.
- Un système a une référence de temps.
- Un système à une relation cause à effet.
- Un système a comme fonction principale de lier une entrée et une sortie.

L'analyse d'un système comprend les étapes suivantes:

1. Le diagnostic: Il faut identifier les objectifs avec toutes les contraintes.
2. La formulation mathématique.
3. La construction du modèle: Définir les données (les Entrées), les résultats exigés (les Sorties), le domaine temporel E/S et la procédure qui le manipule.

1.4. TERMINOLOGIE

Une variable n'a pas de valeur fixe tandis qu'un paramètre a une valeur constante, fonction des circonstances de son application.

Un système linéaire est régi par un système d'équations linéaires (des équations algébriques ou différentielles, ou des équations aux dérivées partielles). C'est un cas très important, car le principe de superposition des effets peut être utilisé. Un système est dit non-linéaire s'il n'est pas linéaire.

L'état d'un système est défini par les valeurs des variables du système à un certain temps.

Un système invariant du temps est un système pour lequel la relation Entrée-Sortie ne dépend pas du temps auquel l'entrée est appliquée au système.

Une variable ou un système global est un système pour lequel les variations spatiales n'existent pas ou peuvent être négligées.

On parle de système distribué si les variations spatiales sont prises en compte. Sur le plan mathématique, les modèles sont représentés par des équations différentielles ordinaires, et les modèles distribués par des équations aux dérivées partielles.

Un système est dit stochastique si pour une entrée donnée, il existe une certaine probabilité associée à l'entrée (on parle aussi de probabiliste). Par contre, un système déterministe n'est pas probabiliste; pour une entrée donnée, on peut prédire complètement les résultats de sortie.

Un processus purement aléatoire n'a pas de composantes déterministes.

Un modèle boite noire relie l'entrée à la sortie par une fonction arbitraire et donc n'a pas de signification physique. Un modèle conceptuel est par contre basé sur les équations régissant les phénomènes en jeu.

Un processus peut être continu ou discret. Une variable discrète peut prendre des valeurs distinctes dans un intervalle.

1.5. SIMULATION

La simulation est un moyen pour observer le comportement d'un système sous diverses conditions de charge. Aucune solution dans le sens mathématique n'est cherchée. L'objectif est de comprendre les relations entre les composantes du système et de trouver les moyens de la meilleure réalisation. La simulation ne donne pas la solution optimale directement, il est nécessaire d'itérer le processus pour atteindre l'optimum. Elle se résume en une analyse de scénarios, le modèle étant testé, calibré et opérationnel.

Le schéma général de mise en équation d'un problème de modélisation et de simulation consiste d'abord à définir les trois composantes suivantes:

- Système physique: il est considéré comme étant le milieu ou le domaine d'étude, caractérisé par sa structure de forme, ses lois de comportement et ses concepts physiques.
- Système mathématique: il fait appel aux concepts mathématiques théoriques et aux axiomes constitutifs.
- Modèle : c'est le modèle conceptuel qui est basé sur les équations constitutives et les équations champs reliant les variables d'état aux paramètres du système.

1.6. ASPECTS STATISTIQUES UTILES

- Dans cette petite introduction, on rappelle quelques notions et connaissances de bases qu'il est utile de connaître pour la bonne compréhension de certains concepts utilisés dans le cadre de ces tutoriels regroupés en fascicules.
- Les outils mathématiques et statistiques sont utiles pour :
- la modélisation:

- ajustement statistique de paramètres pour le calage (moindres carrés, étude des résidus, tests de sensibilité,..)
- comparaison et mesure de l'adéquation entre les résultats numériques et les observations en réalité

- la conception des aspects lies à l'acquisition de l'information:
  - loi des grands nombres (nombre suffisant pour effectuer des statistiques ou pour
  - avoir des données représentatives)
  - échantillonnage : technique d'échantillonnage, représentativité
  - étude de la structure de la variance pour les analyses expérimentales
  - étude de la structure temporelle: fréquence minimale de l'échantillonnage (exemple: suivi de la qualité de l'eau des rivières).
  - étude de la structure spatiale: densité minimale de l'échantillonnage sur le terrain
  - (cas de données destinées à l'établissement de cartes)
  - ….
- l'interprétation des données:
  - test d'hypothèses
  - étude de relations simples entre les paramètres
  - étude de relations complexes entre les paramètres
  - représentation simple d'une information apparemment complexe du fait du nombre
  - de paramètres par les études factorielles telles que ACP, AFC ou autres.
  - distinction ou ressemblance entre groupes (Analyse discriminante, classification automatique)

1.6.1. Rappels statistiques

Il y a une grande diversité d'approches statistiques, un résumé succinct est donné ici et le lecteur doit se rapporter à la littérature spécialisée pour plus de détails.

Statistiques uni-variées :

- moyenne, écart type, coefficient de variation, histogramme (minimum, maximum, médiane, quartiles, déciles), modalité, distance simple entre deux groupes, distance multiple entre deux groupes.
- Classification automatique
- Test de comparaisons de données (Xhi2,…) et test d'hypothèses

Statistique descriptive classique :

- croisement des données,
- croisement de deux données quantitatives,
- croisement d'une donnée quantitative avec une indicatrice

Analyse de données : données multi-variées.

- Analyse en Composantes Principales (ACP) : groupes et sources de variabilité
- Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) : caractérisation de groupe
- Analyse Factorielle Discriminante (AFD): frontière

Données spatiales ou temporelles:

Géostatistiques et chrono- statistiques

Statistiques à une variable

Pour une série de données, plusieurs descriptifs sont utilisés :

La moyenne

Pour n individus et une variable x

$$Moyenne = \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

d'où

$$\sum (x_i) = n \times \bar{x}$$ (qui sera utilisé pour le calcul de V(x))

et donc

$$\sum (x_i - \bar{x}) = 0$$

Il est possible de centrer la variable x en la remplaçant par la variable (x)

La médiane:

La médiane sépare un histogramme en deux parties de même surface. Il y autant de mesures présentant des valeurs inférieures à la médiane, que de valeurs supérieures à cette dernière. La médiane est facilement déterminée à partir de l'histogramme des fréquences cumulées. Elle correspond alors à la valeur donnant une fréquence cumulée de 0.5 (ou 50% du cumul des individus)

La classe modale

C'est la valeur la plus fréquente.

Remarque :

Dans le cas de distribution symétriques, médiane et moyenne sont identiques. Dans le cas de distribution dissymétriques, elles sont fréquemment différentes (mais pas obligatoirement).

- **Ecart à la moyenne ou dispersion** : étendue, quantiles, variance, écart type:

Comme pour le comportement type, plusieurs notions de même nature mais différentes sont utilisées.

- Etendue
- Quantiles : déciles et quartiles

Elimination des valeurs extrêmes (non représentativité, présomption d'aberration, autre raison) : premier/dernier décile ou premier/dernier quartile. Plus représentatif que l'étendue.

- **Variance et Ecart type**

Sigma carré x = Var(x) = cov (x,x) = E(x- $\bar{x}$)

$$\sigma_x^2 = \mathrm{var}(x)$$

Remarques:

- Moyenne et écart type ont les mêmes unités que les variables: il est difficile de comparer lorsque l'on a plusieurs types de paramètres avec des unités différentes.
- Coefficient de variation (normalisation des variables pour faciliter la comparaison)

  $C.V = \sigma x / \bar{x}$ exprimé en pourcent

1.6.2. Inférence statistique

En analyse de données provenant soit de l'expérimentation au laboratoire ou in-situ, ou directement de mesures recueillies (cas de l'hydrologie), l'objectif principal est de tirer des conclusions sur un ensemble donné à partir d'un échantillon seulement.

Les techniques utilisées sont :

- L'estimation paramétrique.
- L'estimation par intervalles.
- Le test d'hypothèses.

Quand on souhaite faire la meilleure estimation d'un ou plusieurs paramètres d'une distribution de probabilité ou d'un modèle mathématique suggéré par des analyses préliminaires, on parle **d'estimation paramétrique**.

Les paramètres désignent les coefficients caractéristiques d'une loi de probabilité d'une variable aléatoire (Moyenne et écart type pour le cas d'une loi normale de probabilité), ou les coefficients intervenant dans un modèle de type empirique.

A titre d'exemple, on peut prendre celui d'une densité de probabilité de forme connue f (x, □), x étant la variable en question et □ un paramètre inconnu.

Une estimation de □ est faite à partir de données mesurées. Si (x_1, x_2, ..., x_n) est un échantillon, $\hat{\theta}$ est calculé à partir de statistiques sur les x_i $\hat{\theta}$ désigne l'estimation de □.

Exemple :

L'estimation μ de la moyenne d'une population x peut être calculé à partir d'un échantillon de taille n par :

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

La moyenne μ est approximée alors par son estimation $\hat{\mu} = \overline{X}$ de même, l'estimation de la variance □² = Var (x) peut être déduite à partir de S² :

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2$$

$$\hat{\sigma}^2 = S^2$$

L'estimation par intervalle procède par l'estimation d'un intervalle qui va contenir le paramètre avec un certain niveau de probabilité (ou de confiance).

Dans le test d'hypothèses, un ou plusieurs modèles mathématiques sont suggérés, qui peuvent différer aussi bien dans leurs formes que par les valeurs des paramètres en jeu.

- Des hypothèses sont faites.
- Un critère est sélectionné.
- L'analyse est faite sur la base de données.
- Une décision est atteinte.

1.7. CALAGE/CALIBRAGE D'UN MODÈLE

L'objectif attendu dans le calage d'un modèle est qu'il soit le plus robuste et le plus fiable possible. Apprécier la validité du modèle consiste donc à juger de la proximité des deux séries chronologiques observées et calculées. Pour ce faire, deux approches sont possibles :

- L'approche qualitative (adéquation visuelle) consiste à simplement représenter graphiquement les valeurs observées et les valeurs simulées, et, à partir d'une évaluation visuelle, à émettre un jugement sur la qualité de la simulation. Il est évident qu'un tel jugement manque d'objectivité, surtout quand on traite de des séries chronologiques relativement longues et lorsqu'il faut comparer des performances de modèles sur de nombreux bassins /sous-bassins versants.
- L'approche quantitative plus rigoureuse permet une évaluation et une comparaison raisonnablement objective des performances des modèles. Le critère doit donc être relatif, car il est très subjectif de dire qu'un modèle est bon ou mauvais de manière absolue. Par ailleurs, dans des objectifs de comparaison, il est beaucoup plus objectif de dire qu'un modèle est meilleur ou moins bon qu'un autre modèle.

Cependant, ces questions de qualité sont délicates à quantifier avec un critère mathématique, et diverses méthodes sont utilisées.

Le calibrage à des événements connus ou d'ensembles connus de mesures est une partie essentielle d'un modèle crédible. La calibration du modèle peut être considérée comme un processus d'ajustement des paramètres d'entrée pour obtenir des valeurs simulées suffisamment proches des valeurs observées. Un modèle devrait toujours être calibré si possible, surtout si le modèle est destine à l'aide à la prise de décision opérationnelle et de gestion.

Un élément clé d'un plan de modélisation est l'identification des critères de performance pour permettre une quantification de la certitude du modèle. Un autre élément essentiel du processus de calibrage du modèle est la sélection des périodes de calibrage et des objectifs

cibles, qui finalement permettra de déterminer le niveau de calibrage et aura un impact sur le calendrier du projet et sur le budget. Le succès d'un calibrage du modèle dépend en grande partie de l'utilisation d'ensembles de données suffisamment précises dans le modèle.

Par conséquent, les données extraites de différentes sources devraient subir un processus de QR qui permettrait d'identifier et de signaler tout enregistrement indésirable ou douteux de données. Il est impératif que le plan de la modélisation doit être préparé et inclure un consensus de développement de ces éléments pour que le projet puisse être achevé dans les délais et avec le coût estimatif.

Le calibrage d'un modèle est un art et une science qui dépendent dans une large mesure des modélisateurs eux-mêmes. Un niveau d'acceptabilité doit être basé sur un ou une combinaison des facteurs globaux suivants:

- Bonnes pratiques
- Mandats juridiques
- Exigences des clients / sponsors
- Ressources disponibles

Le processus de calibrage peut être classé comme étant soit «dur» ou «mou». Pour le calibrage soit dur ou mou, il est essentiel d'établir les objectifs cibles de calibrage ou des critères utilisant des méthodes statistiques ou des métriques (indicateurs) pour évaluer le succès de calibrage. Une partie des métriques (indicateurs) couramment utilisées sont donnés ci-dessous.

1.8. ERREUR MOYENNE / MEAN ERROR (ME)

L'erreur moyenne (ME), appelée parfois l'erreur de biais moyen, la différence moyenne entre les valeurs (hauteurs, débits) mesurées (hm) et les valeurs simulées (hs) de chacun des échantillons n i. la formule est donnée par:

$ME = 1/n \Sigma in (hm – hs)i$

La ME est utilisée pour décrire le biais dans le modèle, mais généralement ne fournit pas suffisamment de valeur diagnostique pour justifier l'inclusion en tant que mesure de performance pour le modèle

La ME peut donner une indication pour savoir si un emplacement a tendance à être plus ou sous estimation des valeurs. Cependant, il existe un potentiel pour une différence positive et négative pour annuler l'une ou l'autre.

1.9. ERREUR ABSOLUE MOYENNE / MEAN ABSOLUTE ERROR (MAE)

L'erreur absolue moyenne (MAE) est la moyenne de la valeur absolue de la différence entre les valeurs mesurées et simulées. La formule est donnée par:

$$MAE = 1/n \Sigma in|(hm – hs)\ i|$$

Certains hydrologues considèrent que la MAE peut être la statistique la plus utile car elle fournit une mesure exacte de la différence moyenne entre les valeurs observées et simulées. MAE est un indicateur de la façon dont un modèle simule étroitement les données mesurées. Une petite valeur de la MAE indique que le modèle simule bien les données mesurées. La MAE fournit de meilleures mesures de la performance du modèle. Le MAE est moins sensible aux valeurs extrêmes. La MAE donne une estimation de l'erreur du modèle, mais ne fournit pas d'informations sur la nature ou le type de différences entre les modèles).

1.10. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE ROOT MEAN SQUARE ERROR (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne ou racine carrée de l'écart-type est la racine carrée de la moyenne de l'écart quadratique dans les hauteurs mesurées et simulées. La formule suivante:

$$RMSE = \sqrt{[1/n \Sigma in(hm – hs)i2]}$$

Une RMSE proche de zéro indique une correspondance étroite entre les valeurs observées et simulées.

La RMSE et MAE sont des mesures similaires et permettent de fournir de meilleures mesures de la performance du modèle. La RMSE, comme la MAE, donne une estimation de l'erreur du modèle, mais ne fournit pas d'informations sur la nature ou le type des différences entre les modèles.

1.11. DIFFÉRENCE PERCENTILE PERCENT DIFFERENCE (% DIFF)

Une statistique différence percentile est utilisée pour montrer la différence entre deux valeurs en tant que pourcentage de la valeur de base. La différence percentile du total des débits cumulés sert à évaluer dans quelle mesure un modèle hydrologique simule la quantité totale d'écoulement (débit) par rapport aux débits observés sur une période de temps.

Différence percentile, Débits cumulés =

1.12. COEFFICIENT D'EFFICACITÉ NASH-SUTCLIFFE (NS OU E)

Lorsqu'on traite des modèles transitoires, le calage de l'historique est important. Les hydrogrammes des valeurs observées et simulées devraient montrer des tendances similaires. Certaines métriques utilisent pour quantifier la relation entre les valeurs observées par rapport aux valeurs simulées dans le temps comprennent le coefficient de détermination, le coefficient de

corrélation, l'erreur cumulative et l'efficacité de Nash-Sutcliffe. L'erreur cumulée est définie comme une erreur dont l'amplitude n'est pas proche de zéro tant que le nombre observations augmente.

De nombreux critères d'évaluation, indépendants du jugement de l'observateur, sont cités dans la littérature. Le plus connu et le plus communément utilisé est le critère de Nash et Sutcliffe (1970). Le critère de Nash (NS), permet de quantifier objectivement la qualité d'une simulation sur une période donnée, et par ailleurs être utilisé comme critère dans l'algorithme d'optimisation du calage automatique des paramètres du modèle.

Le calage se fait « pas à pas », et consiste à faire varier les paramètres l'un après l'autre, de sorte que chaque modification de paramètre permette d'augmenter la valeur du Nash sur la période de calage. Lorsqu'on ne peut plus accroître le critère de Nash, on dit que le modèle est calé. Le jeu de paramètres correspondant à cette valeur du Nash correspond aux paramètres caractéristiques du bassin versant ; ils sont censés intégrer, de façon généralement implicite, les caractéristiques physiques et les singularités du bassin versant lui conférant le type de comportement hydrologique représenté par la série de données dont on dispose.

Une fois le modèle calé sur une période donnée, dite période de calage, on peut procéder à une étape de contrôle (ou validation), qui consiste à évaluer les performances du modèle (avec les paramètres trouvés lors du calage) sur une autre période. On obtient alors le critère de Nash en contrôle.

Ce critère appelé aussi coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe peut être utilisé pour évaluer la puissance prédictive d'un modèle. La formule est:

Soit N le nombre de valeurs que l'on veut comparer, on notera :

la moyenne, $\overline{Q}$ égale $\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{t=N} Q(t)$

l'écart type, σ_Q égale à $\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum\left(Q(t)-\overline{Q}\right)^2}$

Pour estimer les performances de cette modélisation, nous nous appuierons sur les critères suivants :

Biais ou erreur moyenne (BIAIS), en pourcentage :

Biais permet de déterminer si le modèle tend à sur ou sous-estimer les débits.

$$BIAIS = 100 \times \frac{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{t=N}\left(Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)\right)}{\overline{Q}_{obs}}$$

La valeur optimale est 0. Une valeur positive (négative) indique que les débits ont tendance à être sur

(sous) estimés.

Critère de Nash (NS) :

NS permet de calculer la part de la variance expliquée grâce au modèle.

$$NS = 1 - \frac{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{t=N}\left(Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)\right)^2}{\sum_{t=1}^{t=N}\left(Q_{obs}(t) - \overline{Q}_{obs}(t)\right)^2}$$

E ou NS est une mesure de l'efficacité du modèle et peut varier de -∞ à 1. La valeur maximale (optimale) est de 1 pour NS, et les valeurs peuvent être négatives. Une valeur NS de 1 indique que le modèle simule à la perfection. NS proche de 0 indique que le modèle n'est pas meilleur que si, l'on avait remplacé la valeur simulée par le débit moyen. Une valeur supérieure à 0.7 est habituellement considérée comme satisfaisante. Quand les valeurs observées s'approchent de la valeur moyenne, le dénominateur aura tendance à devenir plus petit, le rapport aura tendance à devenir plus grand, ce qui entraîne souvent une NS valeur négative.

Le coefficient de corrélation entre valeurs observées et valeurs simulées (ρ ou rho) :

Ce critère mesure la co-fluctuation des séries simulées et observées.

$$\rho = \frac{1}{N} \times \frac{\sum\left(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}}\right)\left(Q_{sim}(t) - \overline{Q_{sim}}\right)}{\sigma_{Q_{obs}} \times \sigma_{Q_{sim}}}$$

Le calage est d'autant plus satisfaisant que ce coefficient est proche de 1.

1.13. COEFFICIENT DE DÉTERMINATION (R^2)

On définit le coefficient de détermination (r^2) comme le rapport expliquant la variation de la variation totale. La formule est donnée par:

r2 = Σ (y '- ya) 2 / Σ (y - ya) 2

Où y' est la valeur prédite, ya est la valeur moyenne et y est la valeur observée.

Le coefficient de corrélation, r, quantifie la relation linéaire entre deux variables. La signification du coefficient de corrélation est déterminée par la comparaison de la statistique de test, r, de la valeur critique. Par conséquent, en utilisant le coefficient de corrélation en conjonction avec un hydrogramme, le modélisateur peut quantifier la relation entre les valeurs observées et simulées dans le temps

1.14. LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS / LEAST-SQUARES REGRESSION

La méthode consiste en la minimisation du carré des écarts entre les valeurs y mesurées et les valeurs calculées y (suivant une certaine forme).

Si on suppose que la relation qui lie Y à X de type linéaire.

La valeur estimée de y, Y = a*X+b

a et b constantes, $\hat{Y}$ est la valeur prédite de Y, et X une valeur spécifique de la variable indépendante.

Des valeurs de la pente de la droite proches de 1 indiquent un meilleur ajustement entre les valeurs observées et calculées.

De manière générale, la forme générale d'un modèle linéaire est :

$$y = a_i f_i (x_1, x_2, \ldots, x_n)$$

ou y : variable dépendante

a_i : paramètres à déterminer

f_i : fonctions de forme connue

x_i : jeu de variables indépendantes.

- Modèle linéaire simple : $f_i (x_1, x_2, \ldots, x_n) = x_i$
- Modèle linéaire polynomial : $f_i (x_1, x_2, \ldots, x_n) = x^i$ en substituant x_i par x^i.
- Modèle sinusoïdal : $f_i (x_1, x_2, \ldots, x_n) = \sin \square_i$.

L'estimation des paramètres n'est pas suffisante et il impératif de faire des références sur l'adéquation du modèle et l'étude de fiabilité des paramètres estimés et leur interaction.

Pour simplifier l'illustration ; soit un jeu de données comprenant une variable indépendante x et une variable dépendante y. Comment identifier un type de relation entre elles ?

Si on aboutit à une forme linéaire après l'application d'une transformation appropriée, on peut estimer les paramètres du modèle non-linéaire à partir du modèle linaire transformé.

Il est à noter toutefois que si les erreurs sur la variable dépendante sont importantes, les estimations obtenues peuvent être fausses.

Exemple :

$$Y = y + \square$$

Soit le modèle : $Y = \square \times \square$ (non linéaire)

En passant aux logarithmes, on obtient un modèle linéarisé :

$$\text{Log } y = \text{Log } a + B \text{ Log } x$$

Il est clair que :

$$Y = \square \times \square\square + \square$$

est différent de :

$$\text{Log } Y = \text{Log } \square + \square \text{ Log } x\square + \square$$

Il n'existe pas de méthode standard pour résoudre le problème. Néanmoins, on peut tirer pas mal d'informations par le tracé de y en fonction de x.

- si la courbe tend vers un droite, alors y = ax + b devrait approximer la relation ;
- si les points décrivent un courbe, il est conseillé de procéder à des transformations de coordonnées de manière à ramener la courbe à une droite y' = a'x +b' (cf. tableau 1).

Equation	Coordonnées pour la droite		Equation de la droite
	X	y	
$\frac{1}{y} = \alpha + \beta x$	X	$\frac{1}{y}$	$\frac{1}{y} = \alpha + \beta x$
$y = \alpha + \frac{\beta}{x}$	$\frac{1}{x}$	x	$y = \alpha + \frac{\beta}{x}$
$\frac{x}{y} = \alpha + \beta x$ ou $y = \frac{x}{\alpha + \beta x}$ ou $\frac{1}{y} = \frac{\alpha}{x} + \beta$ $y = \frac{x}{\alpha + \beta x} + \gamma$	$\frac{1}{x}$ X	$\frac{1}{y}$ $\frac{x - x_1}{y - y_1}$ (x_1, y_1) est un point de la courbe expérimentale	$\frac{1}{y} = \beta + \frac{\alpha}{x}$ $\frac{x - x_1}{y - y_1} = (\alpha + \beta x_1)$ $+ \frac{\beta}{\alpha}(\alpha + \beta x_1)^2$
$y = \alpha + x^{\beta}$ ou $y = \alpha + \gamma^{\beta_2 x}$ $y = 10^{\alpha_1} + \beta_1 x$ $y = \alpha 10^{\beta_1 x}$	X	Log y	Log y = Log □ + x Log □

Notion de résidu

L'écart entre la valeur estimée et la valeur mesurée est le résidu. Pour éviter que les écarts positifs et négatifs ne se compensent, on utilise le carré de l'écart.

Pour l'ensemble des points,

Résidu = somme des |y mesuré – y estimé |**2

C'est la variance non expliquée par l'estimation. Cette notion de résidu et assez générale et touche à de nombreux domaines. Elle permet d'étudier l'origine d'un écart entre les résultats d'un modèle (ou prédiction) et les données mesurées.

En d'autres termes, la méthode des moindres carrés consiste en la minimisation du résidu. La méthode de minimisation du carré des écarts vise à déterminer l'équation de la droite qui minimisera la somme des longueurs de écarts (Observés, Estimés).

1.15. INDICE D'AJUSTEMENT/ INDEX OF AGREEMENT (D)

L'indice de l'ajustement (d) est destiné à être une mesure descriptive, et il est à la fois une mesure relative et bornée qui peut être utilisé pour faire des comparaisons croisées entre les modèles. L'équation de d est :

O variante observée
P variante prédite par le modèle.

1.16. ERREUR SYSTÉMATIQUE / SYSTEMATIC ERROR (MSES) ET ERREUR NON SYSTÉMATIQUE UNSYSTEMATIC ERROR (MSEU)

Parce qu'un modèle doit «expliquer» la plupart des grandes tendances ou de comportements présentés dans O, il est également important de savoir combien de RMSE est «systématique» dans la nature et la portion «non systématique». C'est, par rapport à un «bon» modèle, la différence systématique doit tendre vers zéro tandis que la différence non systématique doit s'approcher de RMSE.

Ainsi, l'erreur systématique est :

Le système est conservatif, MSE = MPE + MSEu. MSE est égal à (RMSE)2.

Les équations ci-dessus sont utiles en ce que la proportion de MSE qui provient des erreurs systématiques, probablement contenues dans le modèle, est décrit par (MPE / MSE) et la proportion non systématique par(MSEu / MSE) ou [1 -(MPE / MSE)]. En outre, ces différences peuvent être interprétées, dans les unités de P et O, en prenant la racine carrée de MPE et MSEu, c'est-RMSE et RMSEu, respectivement.

Le calibrage et la vérification permettent de donner la confiance nécessaire pour que le produit final réponde aux besoins de modélisation.. Une composante essentielle du calibrage et de la vérification est la documentation. La documentation est essentielle et doit être ajoutée aux rapports finaux.

1.17. ANALYSES DE SENSIBILITÉ ET D'INCERTITUDE

Une fois qu'un modèle est calibré à un niveau satisfaisant, il est important d'effectuer des analyses de sensibilité et d'incertitude pour les paramètres calibrés critiques. Une analyse de sensibilité indique le niveau de confiance et le degré de fiabilité des prédictions du modèle pour les prises de décisions de planification et de gestion.

L'analyse de sensibilité constitue le test/vérification systématique du comportement du modèle vis à vis des divers changements à l'entrée du système, les conditions initiales et les valeurs des paramètres. Cela peut être fait manuellement ou en utilisant

des programmes écrits spécialement à cet effet. Les résultats de cette étape fournissent des informations sur la précision requise pour l'entrée, conditions initiales et paramètres. En outre, ceci

indique les paramètres bénéficiant de l'estimation paramétrique. L'analyse de l'incertitude ressemble à l'analyse de sensibilité, sauf que cette fois, on s'intéresse à l'effet total des facteurs d'incertitude sur les résultats du modèle, plutôt que de la sensibilité relative des valeurs des paramètres.

Invariablement, lorsque qu'il s'agit de systèmes naturels, les résultats d'un modèle ne sont qu'estimations inexactes de comportement réel. Une bonne compréhension des l'incertitude dans les résultats peuvent être tirées à partir d'une compréhension de l'incertitude dans les valeurs estimées des paramètres du modèle. Souvent, une analyse de sensibilité permet de déterminer si l'incertitude du modèle est importante dans l'atteinte des objectifs du projet. Dans certains cas, une analyse d'incertitude plus détaillée peut être justifiée (à l'aide des simulations de Monte-Carlo, surface de réponse, ou méthodes de sensibilité régionalisées pour définir des intervalles de confiance statistiques pour les résultats du modèle). En outre, la précision d'un modèle peut être limitée en raison de la méthode de modélisation utilisée (par exemple, erreur de discrétisation, erreur numérique). Encore une fois, c'est l'expérience personnelle du modélisateur qui est essentielle pour comprendre les erreurs du modèle et les effets potentiels sur les résultats du modèle.

1.18. MODÈLE DE PRÉDICTION

Un aspect important de l'interprétation du modèle est la compréhension des hypothèses du modèle, les limites et les incertitudes. Des simplifications doivent toujours être effectuées lors de la construction d'un modèle permettant de simuler un véritable système. Comprendre l'importance de ces simplifications est essentielle pour tirer des conclusions significatives à partir d'une analyse de modélisation.

En fin de compte, l'interprétation des résultats du modèle dépend peu du logiciel, mais surtout de l'expertise, la créativité, l'imagination, l'éducation et l'expérience des modélisateurs.

La mise en œuvre du modèle ou l'exécution du modèle pour des alternatives de gestion doit alors être effectué dans la plage des résultats de l'analyse d'incertitude. Le plan de la modélisation doit fournir la conception détaillée des scénarios prédictifs, y compris les systèmes futurs (naturels le cas échéant).

1.19. DOCUMENTATION

Par ailleurs, toutes les activités de modélisations doivent être bien documentées et adaptées pour l'utilisateur approprié, tenir compte du niveau de détail, et inclure un guide de l'utilisateur.

2. MODELISATION EN HYDROLOGIE

2.1. INTRODUCTION

On entend généralement par modélisation des systèmes hydrologiques l'application d'expressions mathématiques et logiques qui définissent les relations quantitatives entre les caractéristiques de l'écoulement (sorties) et les facteurs influant ces valeurs (entrées). Il s'agit là d'une définition très générale qui englobe un large éventail de méthodes. À un extrême se trouvent les techniques purement empiriques, dites de la «boîte noire», dont le but n'est pas de modéliser la structure interne et la réponse physique du bassin versant mais uniquement de mettre en relation les entrées et les sorties du système que constitue un bassin versant. À l'autre extrême, des techniques font intervenir des ensembles complexes d'équations, fondées sur les lois physiques et les concepts théoriques régissant les processus hydrologiques: ce sont les modèles hydrodynamiques. Entre les deux extrêmes se situent divers modèles conceptuels, représentations logiques d'éléments conceptuels simples, par exemple des réservoirs et des chenaux linéaires ou non linéaires, qui simulent les processus en jeu dans le bassin versant. Qu'ils soient purement empiriques, conceptuels ou hydrodynamiques, ces modèles donnent des résultats qui ne sont pas assortis d'indices de probabilité. C'est pourquoi on les qualifie souvent de déterministes.

2.2. PROCESSUS HYDROLOGIQUES DE GENÈSE DES CRUES

Le volume d'une crue peut être décomposé en trois principales parties : le ruissellement de surface, l'écoulement hypodermique et l'écoulement de base. L'importance de chacune de ces grandeurs dépend du milieu étudié, des conditions initiales de l'écoulement, et des caractéristiques de l'événement pluvieux (distribution spatiotemporelle, intensité et volume).

Durant ces dernières décennies, on a assisté à une avancée considérable dans le domaine hydrologique. Plusieurs études ont été menées et consacrées à l'identification des processus hydrologiques au niveau des bassins versants. De nombreuses expérimentations ont été réalisées sur une grande variété de bassins. Parmi les outils importants qui ont favorisé cette évolution et qui ont aidé dans le processus d'identification des facteurs principaux contrôlant la réponse hydrologique à l'exutoire d'un bassin versant on peut citer l'instrumentation des bassins et leur échantillonnage en plusieurs stations associés à des traceurs géochimiques et/ou isotopiques.

Au niveau de la littérature, plusieurs travaux retracent la logique de progression et de compréhension des processus hydrologiques et des outils qui ont permis l'identification de ces processus. Dans cette partie on

abordera les grands axes de cette évolution.

Le premier pas et la première théorie importante concernant ce sujet, est apparue au début du siècle dernier avec les travaux d'Horton (1933). Cette théorie est basée sur le concept de capacité d'infiltration des sols et la notion de dépassement de capacité. La logique du concept est simple, tant que la capacité maximale d'infiltration du sol concernant le bassin en question n'est pas dépassée, la totalité de l'eau de pluie se trouve dans le sol par infiltration ; et dès que les intensités pluviométriques dépassent ce seuil maximal, le surplus d'apport d'eau se trouve en surface et présente un volume d'eau ruisselée, c'est ce ruissellement qui va former l'écoulement rapide de crue, quand à l'eau infiltrée elle se trouve dans les couches inférieures du sol et contribue très lentement à la recharge des nappes et au soutien du débit de base. Ce processus est conditionné par les états de surface du sol qui décident de la fraction d'eau de pluie qui peut être infiltrée ou pas.

Vers les débuts des années 60, on a commencé à mettre en cause cette théorie suite à des observations directes sur le terrain, et qui ont montré sous certaines conditions et restrictions, que l'écoulement souterrain pouvait participer directement ou indirectement à la formation des crues. Plusieurs autres mécanismes ont été proposés par la suite pour expliquer la formation des écoulements dans un bassin versant.

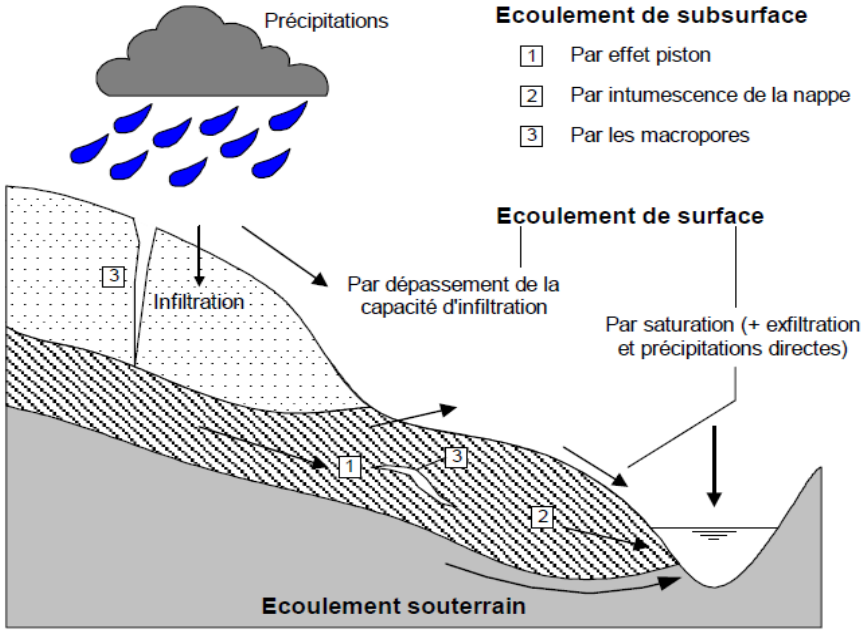

Figure 2.1 : Schématisation de processus de genèse des crues

L'écoulement de surface se produit quand l'eau de la nouvelle pluie tombe sur des zones saturées. Le mélange entre la nouvelle eau et l'eau ancienne, forme l'écoulement sur des surfaces saturées. Une fois que l'apport de l'écoulement de subsurface dépasse la capacité du sol à transmettre un flux d'eau transversal, le processus d'exfiltration de l'eau souterraine s'active et l'eau subsurfacique se trouve émergée à la surface du sol, la logique de ce concept est illustrée dans la Figure 2.1.

La prise en considération de l'effet de l'écoulement de subsurface (appelé aussi écoulement hypodermique ou retardé) dans la genèse des crues a été évoquée par plusieurs auteurs mais sans le même succès que la théorie de Horton. Il a fallu plusieurs années pour que les hydrologues reconnaissent la contribution de l'écoulement hypodermique à l'écoulement rapide des crues.

Ce type d'écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogramme. On distingue souvent entre les deux types d'écoulement, celui de proche subsurface et celui en profondeur.

Un peu partout dans la littérature, on trouve plusieurs autres mécanismes expliquant le phénomène en supposant que les écoulements latéraux de subsurface résultent de processus diffus impliquant des flux d'eau matricielle. Certains auteurs ont expliqué le phénomène par un concept dit effet piston ; l'eau se trouvant en surface s'infiltre dans le sol non saturé et percole verticalement en poussant l'eau contenue dans le sol vers les profondeurs du sol, d'où l'appellation effet de piston. Quand à Ambroise (1967), la formation du front d'infiltration est d'autant moins régulière et l'effet piston est d'autant moins efficace que l'apport en surface et la distribution de la porosité sont localement plus hétérogènes.

Sklash et Farvolden (1979) ont proposé un nouveau mécanisme expliquant la contribution de l'écoulement de base à la génération des crues nommée « intumescence de la nappe ». Ce mécanisme considère que le déficit de saturation dans les régions proches de la rivière est inférieur à celui des versants, ce qui provoque des gradients hydrauliques très élevés au niveau de la rivière et donc libération facile de l'écoulement souterrain vers la rivière. Les mêmes auteurs montrent dans une étude menée sur deux petits bassins versants (Ruisseau des eaux Volées et Hillman Creek) à l'aide de l'approche isotopique, que pour des intensités pluviométriques modérées sur un bassin ayant des sols gorgés d'eau, l'écoulement de surface et celui de la rivière sont dominés par l'écoulement souterrain. Par contre, pour un événement pluvieux intense sur un bassin dont les sols sont très secs, l'écoulement de surface et celui de la rivière sont dominés par l'eau de pluie.

Le concept qui a été considéré comme une révolution importante dans le domaine de l'hydrologie est celui du développement de la notion des surfaces contributives variables**.** Ce concept a été évoqué par Hewlett et Hibbert (1967), n'ayant pas observé d'écoulement sur l'ensemble du bassin de Coweeta aux USA, ils ont proposé le concept de zones contributives variables pour expliquer l'hydrogramme observé. Le concept suppose que la contribution du bassin à l'écoulement total varie dans l'espace durant l'événement pluvieux. En fait l'eau de pluie parvient à s'infiltrer et alimente une nappe qui remonte dans le

sol sous-jacent. Là où cette nappe finit par affleurer, c'est la totalité de la pluie qui est rejetée et qui génère le ruissellement. Le contrôle se fait dans ce cas, du sol vers la surface, par la capacité locale de transit dans la couche superficielle du sol qui contrôle la remontée de la nappe et son affleurement.

2.3. FACTEURS DE CONTRÔLE DES PROCESSUS DE GENÈSE DES CRUES

D'après ce qu'on a vu dans la partie précédente concernant les processus hydrologique et de par leur diversité, on peut se faire une idée globale sur le débit que l'on mesure à l'exutoire d'un bassin versant, ce débit est le résultat d'une succession de processus simultanés avec la prise en compte de la variabilité spatio-temporelle. L'activation des processus hydrologiques qui régissent le phénomène d'écoulement dépend en grande partie des propriétés physiques du bassin, des paramètres météorologiques, de l'occupation des sols et des conditions hydriques initiales.

2.3.1. Topographie et pédologie

Des travaux récents ont montré que la topographie et parfois la géologie des couches profondes du sol jouent un rôle important dans le contrôle des processus hydrologiques au niveau des bassins versants et que la topographie est un facteur déterminant qui entre directement dans le comportement du système hydrique du sol. Ces études ont été d'une grande utilité dans le domaine d'hydrologie vu que les informations sur la topographie du bassin et la connaissance géomorphologique des sols sont indispensables à la compréhension des écoulements et par la suite à une modélisation plus réaliste.

La mise en évidence du rôle de la morphologie dans le processus des écoulements a permis d'avoir une autre logique et une autre vision du phénomène. De nos jours cette variabilité topographique est souvent prise en compte par exemple dans les entrées des modèles telles que les MNT (Modèles Numériques du Terrain).

2.3.2. Occupation du sol

Quand à l'occupation du sol, elle a une influence directe sur le processus hydrologique. Dans les zones urbanisées ayant des sols imperméables ou en zones de cultures avec des sols tassés, les écoulements se concentrent en surface. Par contre, pour les zones forestières où la porosité du sol est beaucoup plus importante, on assiste à une prépondérance de l'écoulement de subsurface par rapport aux autres types d'écoulements.

Les zones forestières jouent un rôle important dans les processus de contrôle du cycle de l'eau. L'influence de la forêt sur le cycle de l'eau ou sur le fonctionnement et la contribution des arbres dans le conditionnement des données climatiques de la zone, est largement démontrée.

2.3.3. Conditions météorologiques

Les facteurs météorologiques jouent aussi un rôle dans le phénomène de génération des crues. L'intensité et le volume des précipitations influencent fortement la réponse hydrologique. Le rayonnement solaire ainsi que la température du bassin nous aide à avoir une bonne estimation du phénomène de

l'évapotranspiration.

2.3.4. Variabilité spatiale des paramètres

Cette variabilité est un facteur important dans le processus d'infiltration et de l'écoulement de surface. Les paramètres régissant le phénomène d'écoulement peuvent avoir une variabilité spatiale et temporelle avec l'état hydrique du bassin versant.

Il convient de signaler que ces facteurs, à savoir topographiques, morphologiques, pédologiques et des caractéristiques d'occupation du sol et de la végétation avec la prise en compte de leurs variabilités spatio-temporelle sont étroitement liés. Ces facteurs constituent l'entrée principale pour tout modèle hydrologique, ils constituent des paramètres d'entrée importants pour la modélisation des bassins versants

2.4. LES MODÈLES HYDROLOGIQUES

Un modèle est une représentation d'un phénomène physique, dans le but de comprendre les processus qui le régissent. Cette représentation peut être physique, analogique ou mathématique. Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d'une manière plus au moins adéquate la réalité. Les modèles analogiques se basent sur les similitudes entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique. La modélisation mathématique est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels, elle essaye d'établir un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques.

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versants, rivières, nappes, etc.), associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie:

- La modélisation comme outil de recherche : La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- La modélisation comme outil de prévision : elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques.

Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

- La modélisation comme outil d'extrapolation : reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables.
- La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable chaque

fois qu'on s'intéresse à des problèmes liés à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risques hydrologiques (sécheresse, inondation. …). Cette modélisation doit décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. On l'utilise aussi pour obtenir des informations intéressantes pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

2.5. CLASSIFICATION DES MODÈLES HYDROLOGIQUES

Depuis l'apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés en fonction des objectifs recherchés, sur la base de différents choix d'élaboration, menant à une multitude de modèles exploitables, chacun étant doté de champs d'application et de validité restreinte. Les différences portent notamment sur les options de simulation en termes de discrétisation spatiale : les modèles sont globaux ou distribués. Et enfin, ils diffèrent au point de vue de l'expression des phénomènes hydrologiques, liés soit à des équations empiriques, soit à des équations physiques, soit à une simplification plus ou moins poussée de ces équations physiques (approche conceptuelle). Bref, les critères de classification des modèles reposent principalement sur la représentation de l'espace, du temps et des processus décrits (Singh, 1995). La figure I.1 donne une classification des modèles hydrologiques basée sur ces critères.

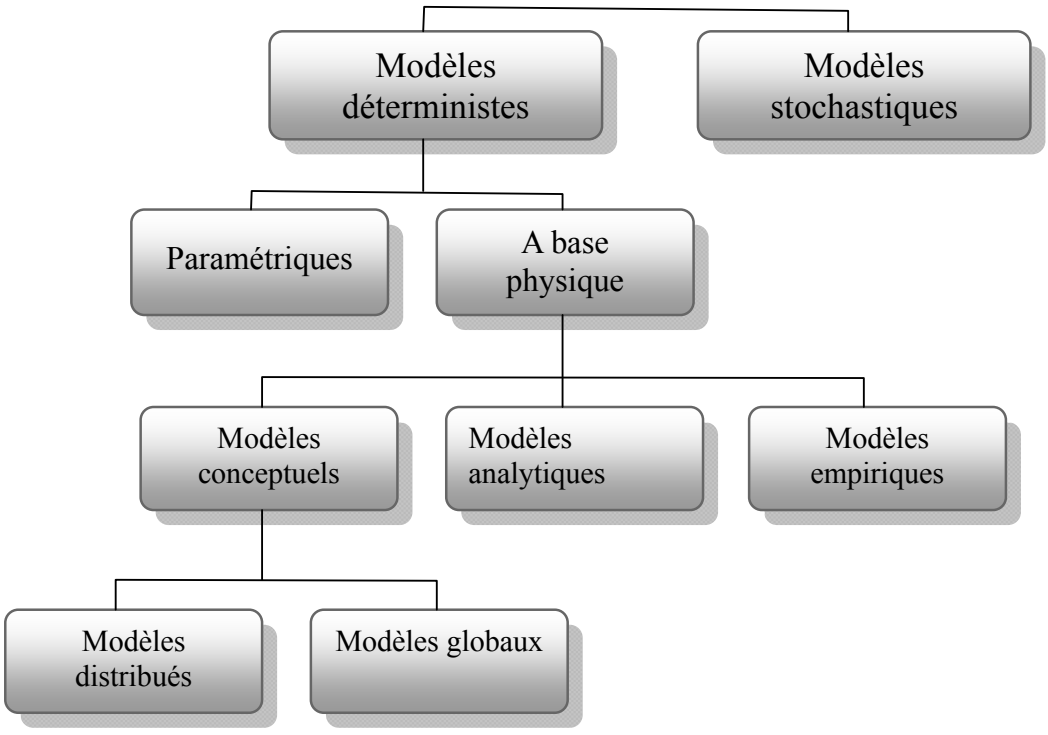

Figure 2.2 : Classification des modèles hydrologiques

2.5.1. Modèles stochastiques

La modélisation stochastique peut être envisagée toutes les fois qu'il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. On considère que l'approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, bien qu'elle soit le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments.

2.5.2. Modèles déterministes

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles sont associés à chaque jeu de variables de forçage, de variables d'état et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

2.5.3. Modèles à base physique

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles. La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatifs de sous parties du bassin versant, doivent être évaluées par calage.

Modèles paramétriques

2.5.4. Modèles empiriques

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

2.5.5. Modèles empiriques

Les modèles empiriques reposent sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydrosystème considéré. Ils expriment la relation entre variables d'entrée et de sortie du système (relation pluie débit) à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système. Un modèle empirique ne cherche pas à décrire les causes du phénomène hydrologique considéré ni à expliquer le fonctionnement du système, le système est considéré comme une boite noire.

2.5.6. Modèles analytiques

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont

été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables.

2.5.7. Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels considèrent en général le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans la section suivante.

2.5.8. Modèles globaux

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique.

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

2.5.9. Modèles spatialisés

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant aux différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives)

Nous pouvons classer les modèles spatialisés en trois grands types :

- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés ;
- Modèles physiques spatialisés ;
- Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.

a. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés

Les modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin. Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous-bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin. C'est le cas du modèle

CEQUEAU et du modèle HEC-HMS.

b. Modèles physiques spatialisés

Les modèles à base physique spatialisés sont des modèles qui décrivent les mécanismes internes d'un système (bassin versant) ayant comme base les lois de la mécanique, de la physique, de la thermodynamique, etc. Du point de vue théorique, ces modèles sont indépendants de tout calage parce que leurs paramètres sont mesurables. Ils permettent une description théorique unifiée de la plupart des flux observés dans un bassin versant et servent à modéliser les principaux processus hydrologiques comme :

- L'écoulement de surface à partir des équations de Saint-Venant ;
- L'écoulement en milieu saturé à partir des équations de Darcy ;
- L'écoulement en milieu non saturé à partir des équations de Richards ;
- L'évapotranspiration à partir des équations de conservation ou de relations entre flux.

A partir d'un découpage de l'espace en mailles de taille adaptée au problème à traiter, ils simulent les diverses composantes du cycle de l'eau sur chaque maille (ruissellement, infiltration, évapotranspiration) et convolent les transferts de maille à maille, jusqu'au réseau hydrographique constitué. Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre et exigent d'importantes quantités de données. Ils sont bien adaptés à la simulation de la diversité d'un bassin.

Cependant, ces modèles ne peuvent traiter les grands bassins en raison de leur grande hétérogénéité morphologique et météorologique. Parmi ces modèles on peut citer le modèle Mike SHE.

c. Modèles physiques-conceptuels semi-spatialisés

Pour dépasser les limites de chacune des approches précédentes (modèles conceptuels trop peu réalistes, modèles à base physique trop complexes), il est intéressant d'essayer une modélisation hydrologique qui peut être :

- A base physique, fondée sur les processus réels mais simplifiés ;
- Semi-spatialisée, fondée sur une discrétisation en unités relativement homogènes, qui permettent de tenir compte de la variabilité spatiale de la structure du bassin versant.

La méthode de discrétisation spatiale varie d'un modèle à l'autre : mailles carrées, sous- bassins versants, éléments de versant, plans versant et canal, unités hydrologiques ou aires contributives (modèle TOPMODEL).

2.6. CONCLUSION

La description des processus qui entrent en jeu dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas évidente et requiert la connaissance et la maîtrise d'une variété de facteurs et de paramètres. Des informations suffisantes sur ces données ne sont pas toujours disponibles pour tous les bassins versants,

d'où la nécessité de s'investir davantage dans l'étude de détermination de ces données pour développer des modèles qui représentent le mieux la réponse hydrologique du bassin versant.

3. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aspects Hydrologiques, hydrauliques, logiciels

Vieux, B.E., 2004. Distributed Hydrologic Modeling using GIS. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Davie, T., 2008. Fundamentals of Hydrology, Second edition, Routledge, Taylor & Francis Group, 200p.

Ambroise, B., 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du département « Science du Sol » de l'Institut National de Recherches Agronomiques de Dijon, 26-27 mars 1991.

Ambroise, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, Facteurs, Modèles. Editions H.G.A., Bucarest.

Hydrologic Engineering Center. 2003. Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC- GeoHMS User's Manual Version 1.1. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.

Hydrologic Engineering Center. 2006. GageInterp A Program for Creating a Sequence of

HEC-DSS Grids from Time-Series Measurements Version 1.4. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.

Hydrologic Engineering Center. 2006. HEC Data Storage System Visual Utility Engine (DSSVue) User's Manual Version 1.2. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.

Hydrologic Engineering Center. 2008. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 3.2. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.

Panigrahi, B.K., Harris, D.J., and C.S. Pathak, 2012. Hydrology and Hydraulics: Watershed Management and Flood Assessment, Short Course offered during 5th International Perspective on Water Resources & the Environment January 4-7, 2012, Marrakech, Morocco

Beven, K.J., 2002. Rainfall-Runoff Modelling The Primer, John Wiley & Sons Ltd, 359 p.

Singh V.P., 1995. Watershed modeling. In: Singh V.P., ed. Computer models of watershed

Davie, T. (2008) : FUNDAMENTALS OF HYDROLOGY, Second edition

Routledge Fundamentals of Physical Geography, Routledge Taylor and francis Group

Vieux, B.E., 2004. Distributed Hydrologic Modeling using GIS. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Singh, V.P. and Frevert, D.K., editors, 2002a. Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.

William A. Scharffenberg and Matthew J. Fleming (2010) : Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, Version 3.5 August 2010, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center

Ancey, C. (2012) : Notes de cours Hydraulique à surface libre, version 4.2 du 2 mai 2012, Laboratoire hydraulique environnementale (LHE), École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Chow, V.T., 1959, Open-Channel Hydraulics , McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y.

French, R. H., 1985, Open-Channel Hydraulics , McGraw-Hill Book Co., New York, NY.

Henderson, F.M., 1966, Open-Channel Flow , Macmillan Co., London, UK.

Abbott, M. B., 1979, Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free Surface Flows, Pitman, London.

Abbott, M. B., and Basco, D. R., 1990, Computational Fluid Dynamics, John Wiley, New York, NY.

Basco, D. R., 1983, Computation of Rapidly Varied, Unsteady Free-Surface Flow, U. S. Geological Survey Report WRI 83-4284.

Bell, S. W., Elliot, R. C., and Chaudhry, M. H., 1992, "Experimental results of two-dimensional dam-break flows," Jour. Hyd. Research, vol. 30, no. 2, pp. 225-252.

Boussinesq, J., 1877, "Essais sur la theorie des eaux courantes," Memoires pre- sertes par divers Savants a l'Academie des Sciences de l'Institut de France, vol. 23, pp. 1-680; vol. 24, 1-64.

Chow, V.T., 1959, Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York, NY. Cunge, J. A., Holly, F. M., and Verwey, A., 1980, Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman, London.

DHI. MIKE 21 Flow Model: Hydrodynamic Module Scientific Documentation. MIKE by DHI, 2009.

Guide de laboratoire HEC-RAS (2009): Exemple pour la rivière du Loup, HEC-RAS Version 3.1.3, CTN-762 Ressources hydriques, Ecole supérieure de Technologie, Montréal,

Gary W. Brunner (2010) ; HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 4.1, January 2010 Approved for Public Release. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center

Ouazar, D. (2006) : Ecoulements en régime permanent et transitoire, Notes de cours, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat.

Ouazar, D. (2010) : Modèles numériques pour l'ingénieur, Notes de cours, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat

Ouazar, D. (2001) : Modélisation des problèmes d'hydrologie et d'hydraulique, Notes de cours, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat

Manuel d'utilisation du logiciel WMS, Aquaveo

Projets de fin d'études :

Bennajah, A., et E. Messka, 2011. Modélisation de Prévision des crues par utilisation de la Plateforme WMS, Cas d'étude Bassin de l'Ouergha, Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Mohamed V Agdal, Rabat

AIT ZEOUAY, H. 2011. Modélisation de prévision des crues par utilisation de la plateforme ATHYS, Cas d'étude Bassin de l'Ouergha, Mémoire de Projet de Fin d''Etudes, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Mohamed V Agdal, Rabat

ESSADAOUI, M., 2012). Modélisation de Prévision des crues par utilisation de la Plateforme WMS, Cas d'étude Bassin de l'Ouergha, Mémoire de Projet de Fin d''Etudes, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Mohamed V Agdal, Rabat

Sites internet

http://www.aquaveo.com/wms-intro

http://www.xmswiki.com/xms/WMS:Quick_Tour_-_Layout

http://www.xpsoftware.com/products/watershed-modeling-system-wms/

http://srtm.csi.cgiar.org