

Chapitre I : Recherche bibliographie

I- Introduction

Nous entendons 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 sur ces valeurs (entrées).

Il s'agit 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 rapprocher 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'indice de probabilité. C'est pourquoi sont qualifiés souvent de déterministes.

I-1- 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.

I-2- Classification des modèles hydrologiques

Depuis l'apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés en fonction des objectifs recherchés, sur base de différents choix d'élaboration, menant à une multitude de modèles exploitables dont chacun est doté de champs d'application et de validité restreints.

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 Payraudeau, 2002).

La figure 1 donne une classification des modèles hydrologiques en se basant sur ces critères.

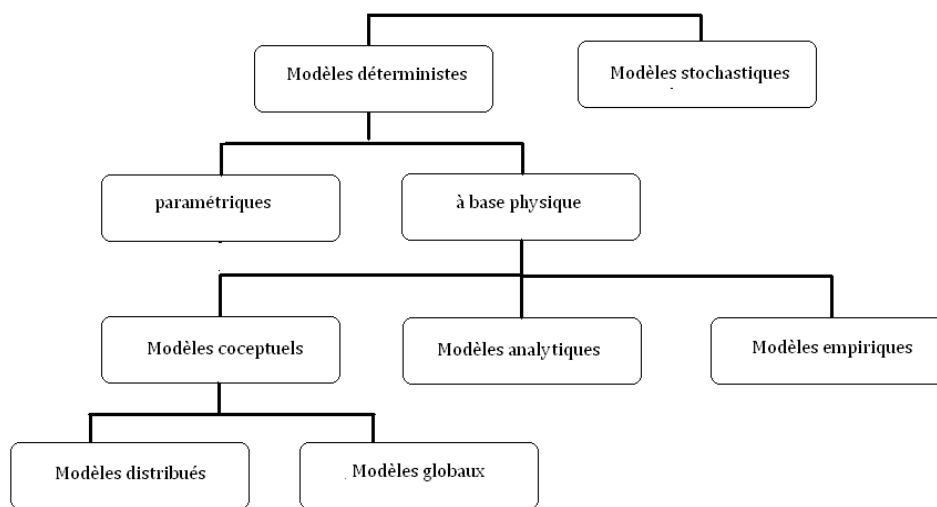


Figure 1- Classification des modèles hydrologiques

I-2-1- Modèles stochastiques

La modélisation stochastique peut être envisagée dans le cas où il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu.

Ainsi Jensen (1992) considère qu'une 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, qui semble par ailleurs 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.

I-2-2- 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 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).

I-2-3- 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.

I-2-4- Modèles paramétriques

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

I-2-5- 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 de ni à expliquer le fonctionnement du système, le système est vu comme une boîte noire.

I-2-6- 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.

I-2-7- Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels considèrent en générale 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.

I-2-8- 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.

I-2-9- Modèles Spatialisés

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à des 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.

I-2-10- 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.

I-2-11- 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.

De 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 ;

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 SHE.

I-2-12- 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 ;

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).

I-3- Conclusion

Il s'avère que la description des processus qui entrent en jeu dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas une tâche aussi facile, cette description demande la connaissance et la maîtrise d'une variété de facteurs et de paramètre.

Des renseignements suffisants sur ces données ne sont pas toujours disponibles pour tous les bassins versants, d'où la nécessité de s'investir d'avantage dans l'étude de détermination de ces données pour développer des modèles qui représentent le mieux la réponse hydrologique du bassin versant .

II- Le modèle HEC-HMS sous WMS :

II-1- La description du logiciel WMS :

II-1-1- Définition de WMS :

Le WMS est une plate-forme performante de modélisation hydrologique et hydraulique, créée pour la première fois par l'USACE en collaboration avec le laboratoire de recherche en modélisation environnementale installé au sein de l'université de Brigham Young (États Unis). Aujourd'hui, c'est l'Aquaveo LLC qui détient ses droits de développement [11].

Son entrée officielle au Algérie était en 2011, par le DRPE avec le concours de la GIZ pour répondre au besoin primordial à des outils de prévention contre les dégâts des biens et des personnes générés par les crues et les inondations. A ce titre, la DRPE le propose à trois agences du bassin hydraulique pour leur constituer un outil commun afin de traiter les aspects liés à la prévision hydraulique et hydrologique.

II-1- 2- Que peut faire WMS ?

Les tâches que ce logiciel peut aider à accomplir sont très diversifiées, mais ce qui l'a rendu sollicité par la DRPE c'est qu'il est apte à supporter la modélisation hydrologique et hydraulique des modèles largement utilisés par les établissements publics et privés marocains pour réaliser ou valider leurs études hydrologiques et hydrauliques, à savoir le HEC-1 et sa nouvelle forme HEC-HMS pour l'hydrologie et le HEC-RAS pour l'hydraulique.

II-1-3- Les apports du WMS dans notre étude :

Dans notre cas, le processus de modélisation est partagé en deux parties, la première a comme objectif la création des fichiers de simulation et sera complètement faite sur le logiciel WMS, la deuxième partie concerne l'exécution des simulations à partir des fichiers issus de la première partie, et ceci va être réalisé entièrement à l'intérieur du logiciel HEC-HMS. Donc, l'utilité de la plate-forme WMS dans cette étude est de préparer les fichiers de simulation, et ceci va se faire en cinq étapes (figure 2) :

- A partir du fichier MNT brute, nous allons procéder à un traitement pour le rendre exploitable, puis nous établissons le réseau hydrographique et la délimitation du bassin versant, finalement nous calculons les paramètres de forme physiques (surface, pente,...) et hydrologiques (TC, St, Lag,...) indispensables pour la fonction de transfert du modèle ;
- A partir de la combinaison des deux cartes d'occupation du sol et des sols que nous avons préparés auparavant, et qui sont importées vers le WMS, nous allons pouvoir calculer un paramètre d'état du bassin nommé CN nécessaire à la fonction de production ;
- Saisir les informations concernant les précipitations : hauteur et type d'averse ;
Saisir les informations concernant le module débit de Td) et compléter les entrées de la fonction de production :

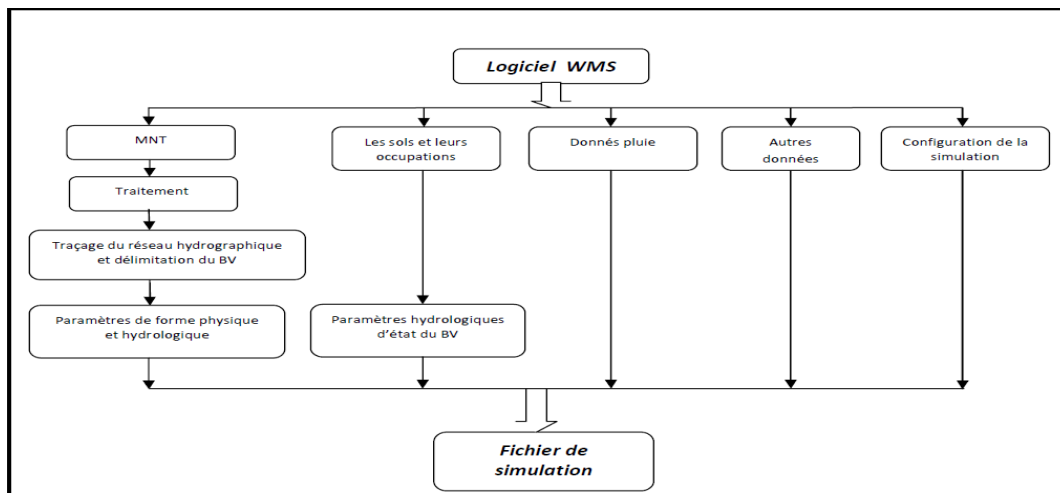


Figure 2- L'utilité du logiciel WMS dans l'étude de modélisation d'oued Cheliff - Ghrib

II-2- La description du modèle HEC-HMS :

Dans cette rubrique, l'accent sera mis sur le modèle HEC-HMS dont nous allons se servir pour la modélisation du oued Cheliff - Ghrib, de point de vue générale, en traitant des points tels que : sa création, son mode de fonctionnement, ses capacités, ses modules, ses formalismes,etc.

Notez bien que cette description ne portera que sur l'aptitude de modélisation événementielle du HEC-HMS, vu que c'est elle qui nous intéresse dans notre étude.

II-2-1- Les caractéristiques générales du modèle :

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié.

Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS ...).

En effet, afin de s'adapter aux différents contextes d'études, ce modèle opère selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il simule le bassin à un système uniforme composé de plusieurs composantes Assurant chacune de représenter un aspect particulier du processus pluie-débit et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement. Pour y parvenir, chaque tâche est confiée à un formalisme d'un module choisi librement par l'utilisateur en fonction de ses besoins et ses données, ainsi, en mutant les formalismes d'un module, le HEC-HMS peut changer de type de modèle, par exemple passer d'un modèle événementiel à un modèle continu, de global au distribué, d'empirique au conceptuel et ainsi de suite.

Le HEC-HMS a été largement employé et validé dans plusieurs bassins versants à climats contrastés à travers le monde ([2], [1], [6], [9], [10] , [11],...), il a été utilisé lors pour la prévention contre les dégâts des inondations dans les zones potentielles à cet aléa, ainsi que par les bureaux d'études, sur les bassins de moyenne et grande taille, pour leurs études hydrologiques de détermination des quantiles de débit.

II-2-2- Le processus de fonctionnement :

Comme nous venons de le mentionner ci-dessus, le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogramme final. En général, dans le cas d'une modélisation événementielle, c'est l'enchaînement schématiser sur la figure suivante qui est suivi à la lettre pour aboutir au débit de l'exutoire :

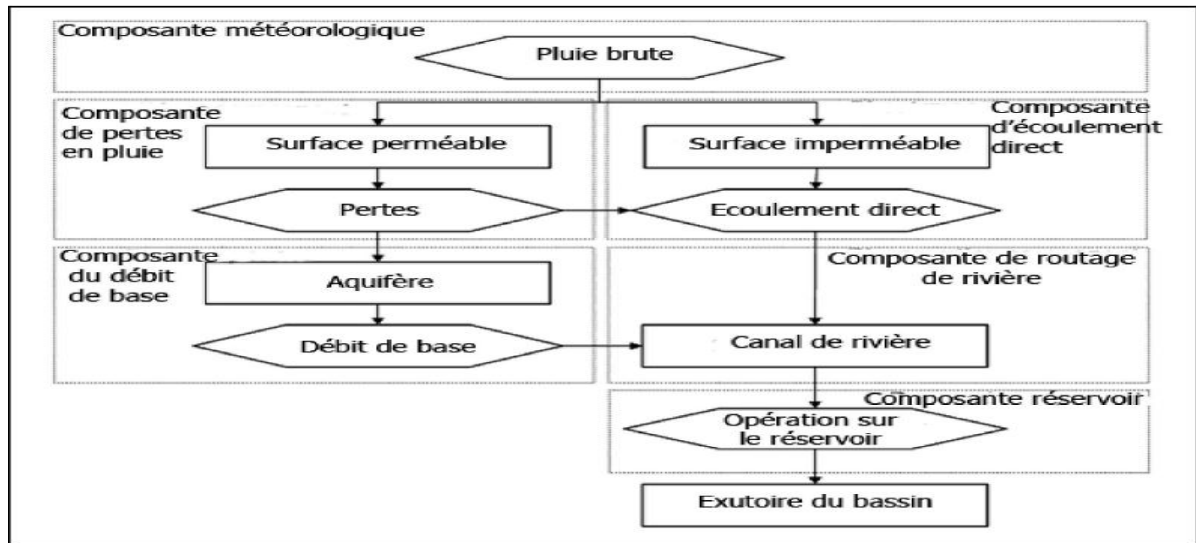


Figure 3- L'enchaînement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du HEC-HMS

Le module météorologique est la première composante à agir, elle vise à répartir sur la surface du bassin, de manière uniforme dans le temps et l'espace, la hauteur des précipitations brutes saisie. Ensuite, le devenir de ces précipitations diffère selon la perméabilité de la surface :

- Pour les surfaces perméables, les précipitations brutes vont subir des pertes suite à des phénomènes d'interception, d'infiltration et d'évapotranspiration, ces pertes seront calculées par la composante de perte en pluie régie par la fonction de production, les précipitations nettes qui en résultant contribuent simultanément à l'écoulement direct et à l'écoulement souterrain dans l'aquifère.
- Pour les surfaces imperméables, les précipitations sont exonérées de toute perte et rejoignent immédiatement la composante d'écoulement direct où elles se transformeront en écoulement de surface.

Après, l'écoulement de surface et l'écoulement de sub-surface provenant de la composante du débit de base, intégreront tous les deux le canal de la rivière où se manifesteront les phénomènes d'atténuation et de translation contrôlés par la composante de routage. Finalement, l'effet des constructions hydrauliques naturelles ou artificielles (réservoir, retenue de barrage, dépression, lac) est déterminé par la composante du réservoir.

II-2-3 : L'organisation du modèle :

Pour faciliter la construction d'un modèle complet qui répond aux circonstances spécifiques de chaque étude de cas, il est strictement nécessaire que le modèle se compose d'au moins quatre modules et deux fonctions essentielles à la modélisation par HEC-HMS, deux autres modules de plus si on veut affiner nos résultats et nos analyses. Ces constituants sont classés, ci-après, par ordre de priorité de conception.

a- Le module structural du bassin :

Il consiste à schématiser le bassin versant étudié en éléments fondamentaux connectés entre eux sous forme d'un arbre ramifié.

Le HEC-HMS offre l'opportunité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin et qui influencent le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de rivières et les canaux de diversion d'eau, en passant par les réservoirs, les retenues de barrages,...etc.

Dans ce qui suit, on cite ces éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant :

- L'élément « Subbassin » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- L'élément « Reach » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- L'élément « Reservoir » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,...etc. ses caractéristiques attribués permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- L'élément « Source » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- L'élément « Jonction » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.
- L'élément « Diversion » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants.

Dans notre cas, cette étape sera totalement et automatiquement réalisée par le logiciel WMS lors de la phase de caractérisation physique.

b- Le module météorologique :

Il a comme objectif de répartir les précipitations saisies sur toute la surface étudiée. Pour se faire, le HECHMS dispose de huit méthodes différentes, à choisir entre elles en fonction des objectifs et de la disponibilité des données, mais elles ont presque toutes la spécificité de distribuer la hauteur de pluie de manière homogène dans le temps et dans l'espace.

Ces méthodes sont :

- « Specified Hyetograph » : hyétogramme spécifié, c'est l'utilisateur qui se charge de saisir son hyétogramme dont il dispose.
- « Frequency Storm » : averse de fréquence, utilisé pour développer un événement de précipitation où les hauteurs pour différentes durées dans l'averse ont une probabilité cohérente.
- « Gages weights » : stations pondérées, utilise un coefficient de pondération à chaque station de mesure de précipitations.
- « Inverse distance » : l'inverse de distance, calcule la moyenne de pluie par l'application de la méthode d'inverse carré des distances pour attribuer à chaque station un coefficient de pondération.
- « Gridded precipitations » : précipitations en maille, permet d'introduire les précipitations sous forme de grille de mesure.
- « Standard Project Storm » : averse de projet standard, répartie une hauteur de précipitations donnée sur un intervalle de temps spécifié.
- « SCS Storm » : averse SCS, applique à la hauteur de précipitations journalière une des distributions d'averse de projet définies par le SCS. Cette méthode sera exposée en détails dans le troisième chapitre.

Le choix de telle ou telle méthode est imposé par l'objectif de la modélisation (détermination du débit de projet, étude de fonctionnement hydrologique du bassin versant,...), la quantité (nombre de stations, période de mesure,...), la qualité (pluviomètres, pluviographes, lacune de mesure,...) des données de précipitations et le type de modélisation envisagé (distribuée, globale).

En addition à tout ceci, le modèle possède la capacité d'intégrer l'évapotranspiration et la contribution de la fonte de neige en cas de modélisation continue.

c- Le module de la fonction de production :

La fonction de production assure la transformation de la pluie brute en pluie nette en y retranchant toutes les pertes éventuelles causées par l'interception (obstacles, végétation, cuvettes.) l'infiltration et l'évapotranspiration (en cas de modélisation continue).

La fonction de production du modèle HEC-HMS distingue entre une surface perméable et imperméable.

La première est considérée comme le champ d'intervention de la fonction, afin de ne pas surestimer les pluies qui participent réellement dans le ruissellement appelées pluies nettes.

La deuxième quant à elle, est supposée non affectée par les pertes en pluie surtout si elle est connectée au réseau hydrographique, elle est reconnue dans le modèle par le pourcentage d'imperméable du bassin.

Il existe six formalismes pour représenter cette fonction à savoir :

- « Deficit and Constant Loss » : à déficit et à taux de perte constant. Une variante du premier formalisme avec une possibilité de régénération des pertes initiales durant une période sans pluie au cours de l'événement modélisé [7].
- « Green and Ampt Loss » : formalisme qui s'intéresse plutôt aux pertes par infiltration, cette méthode repose sur l'équation de Darcy et la conservation de masse.
- « Soil Moisture Accounting Loss » : formalisme très poussé qui calcule les 'pertes' par évapotranspiration, infiltration et percolation profonde selon le principe de couche de stockage.
- « SCS Curve Number Loss » : formalisme qui relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente. Cette méthode sera détaillée davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « Gridded SCS Curve Number Loss » : format maillé du formalisme précédent.

La sélection de l'un de ces formalismes est une étape délicate qui va influencer sans doute les sorties du modèle. Une toute première contrainte est que le choix peut être dicté par les formalismes utilisés pour les autres modules (module météorologique, fonction de transfert, ...), la deuxième étant la nature de données disponibles (sous forme de maille, détaillées, plusieurs variables,...).

d- Le module de la fonction de transfert :

Une fois la pluie participante au ruissellement calculée, c'est le rôle de la fonction de transfert qui débute. Elle permet de déterminer l'hydrogramme résultant de la pluie nette. Le modèle offre six formalismes pour y converger :

- « User-Specified Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur. Ce formalisme consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de données complètes d'un événement pluvieux [7].
- « Snyder Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de Snyder.
- « Kinematic Wave » : onde cinétique. Reconnait les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à la pluie nette.
- « SCS Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de la SCS. Résultant de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « Clark Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de Clark. Prend en compte les deux phénomènes de translation et d'atténuation. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « ModClark » : forme maillée du dernier formalisme.

L'USACE fournit quelques recommandations pour faciliter le choix du formalisme le mieux adapté [30] :

- Disponibilité de données pour la calibration des paramètres ou l'estimation de leurs valeurs : connaissant que la source optimale des paramètres de ces formalismes est la calibration, la possibilité d'exécuter cette opération s'avère fructueux pour les hydrogrammes unitaires. Cependant, si cette possibilité n'est valide, la méthode de l'onde cinétique semble être la plus appropriée mais à condition d'avoir les données mesurées et observées nécessaires.
- · La validation des hypothèses du formalisme sélectionné : vérifier que les hypothèses méthode ne sont pas violées, sinon le risque d'aboutir à des résultats aberrantes est potentiellement présent.

e- Le module du débit de base :

Celui-ci est l'un des deux modules complémentaires du modèle, à défaut duquel le HEC-HMS peut tourner, mais sa présence améliore la compréhension des mécanismes qui contrôlent le ruissellement dans le bassin sujet d'étude.

Le débit de base est la contribution du réservoir souterrain dans l'écoulement, sa connaissance est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme avant et après la pointe de débit et pour mieux estimer le volume de crue. 3 formalismes sont proposés par le modèle :

- « Constant Monthly » : Constante mensuelle. Il considère l'écoulement souterrain comme fixe pendant des durées d'un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes. Cette méthode est très simple, mais
- non adaptée au contexte semi-aride où la variation des conditions de saturation des bassins versants se fait en moins d'un mois.
- « Linear Reservoir » : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.
- « Recession » : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour les bassins où les volumes de crue sont influencés par les événements pluvieux [12]. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.

f- Le module de routage :

C'est le deuxième des deux modules complémentaires, il permet de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces formalismes utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement pour la simulation [30].

- « Lag » ;
- « Muskingum » ;
- « Modified Puls » ;
- « Kinematic-wave » ;
- « Muskingum Cunge ».

g- La fonction objective :

Elle mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé que ce soit en termes de débit, de volume ou du temps. Le HEC-HMS en compte 7 fonctions objectives à savoir :

- « Peak weighted RMS error » : modification de la fonction objective largement utilisée qui est l'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit. Cette méthode donne plus de poids aux débits en dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous.
- « Sum of squared residuals » : la somme des résidus au carré, attribue plus de poids aux larges erreurs et moins aux petits erreurs.
- « Sum of Absolute Residuals » : la somme des résidus absolus, qui ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes. « Percent Error in Peak Flow » : le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, qui se focalise sur l'ajustement des débits de pointe.
- « Percent Error in Volume » : le pourcentage d'erreur sur le volume, qui se focalise sur l'ajustement des volumes de ruissellement.
- « RMS Log Error » : utilise l'erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre en phase les débits faibles et forts.
- « Time weighted » : donne du poids aux erreurs proches de la fin de l'événement et moins aux erreurs du début.

Le choix de telle ou telle fonction est dicté par la problématique étudiée et/ou les objectifs de la modélisation. Par exemple, si on est amené à faire une délimitation des zones inondables, la fonction objective sur le volume est appréciée, si par contre l'objectif étant de déterminer le débit de projet d'un ouvrage quelconque, la fonction objective conseillée est celle jouant sur le débit de pointe.

De l'autre côté si on est en présence d'une modélisation continue pour comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin, il sera préférable d'opter par exemple à la première fonction qui va s'intéresser plutôt aux grands pics de débits. Ainsi, on choisit la fonction qui nous aidera à résoudre notre problématique et atteindre nos objectifs.

h.-La fonction d'optimisation automatique :

Elle sert à rechercher, sans intervention de l'utilisateur, le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. Pour exécuter cette tâche, le HEC-HMS propose 2 méthodes :

- « Univariate Gradient » : le gradient uni-varié, ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres constants.
- « Nelder et Mead » : utilise une approche qui consiste à optimiser tous les paramètres simultanément.

Chacune a les paramètres suivants :

- La tolérance : détermine la valeur de changement de la fonction objective en dessous de laquelle l'optimisation des paramètres s'arrête.
- Maximum d'itérations : détermine le nombre maximal de jeux de paramètres à essayer avant d'arrêter l'optimisation.

La fonction d'optimisation s'arrête une fois l'une de ces conditions est remplie :

- La valeur de la fonction objective est nulle ;
- Le nombre d'itérations est atteint et ceci quel que soit la valeur de la fonction objective ;
- La valeur de variation de la fonction objective est en inférieure à la tolérance.

En conclusion, on peut dire que la diversité des formalismes dont dispose HEC-HMS, le positionne en tête des modèles les plus robustes dans la simulation des ruissellements au sein du bassin, les plus complets dans l'intégration des différentes composantes d'écoulement et les moins exigeants de point de vue données d'entrée.

En outre, sa diversité en matière de combinaisons modulaires possibles, laisse à son utilisateur la capacité de l'adapter à ses données, ses objectifs, ses besoins mais surtout à son expérience.

II-3- La structure du modèle HEC-HMS choisie :

Dans cette section, nous allons évoquer précisément la combinaison modulaire choisie pour modéliser le bassin, en expliquant ses concepts de base, en citant ses variables et ses paramètres et la façon dont nous allons les estimer et en listant ses avantages et ses limites, sans oublier la justification du choix à la fois du modèle et de la combinaison modulaire.

II-3-1- Le type de modélisation : événementielle

Malgré qu'on le considère comme étant le bassin le mieux instrumenté, avec un réseau de mesure composé de : neuf pluviomètres, deux pluviographes, une station hydrométrique, deux stations météorologiques, le bassin versant reste encore mal renseigné, non pas parce que le réseau n'est pas aussi représentatif, mais parce que l'accès à l'ensemble de sa base de données n'était pas possible lors de cette étude vu le caractère privé de 80% de ces stations.

Donc, heurté à cette réalité, où l'accès n'était ouvert en plus de la station hydrométrique qu'à trois stations pluviométriques et sans aucune information sur les stations météorologiques, nous avons décidé de laisser à part l'idée de la modélisation continue avec tout l'apport qu'elle peut constituer dans la compréhension du fonctionnement hydrologique, et de s'orienter – pour le moment - vers une modélisation événementielle qui elle aussi va être confrontée au problème d'absence des distributions temporelles des pluviographes.

Mais ceci va être surmonté en essayant une nouvelle alternative nommée les averses type NRCS décrite dans la partie ci-dessous.

II-3-2 : Le module météorologique : les averses NRCS :

Le NRCS connu auparavant sous le SCS, est un service attaché au département d'agriculture des États Unis, chargé de conserver, planifier et porter de l'assistance dans les domaines de la gestion du sol, l'eau, l'air, la phone et la flore.

Dans cette optique, il a développé en 1986 [18] une méthode pour la construction d'averses de projet nécessaire pour la prévision des débits de projets des ouvrages hydrauliques ou des constructions en contact éventuel avec les cours d'eau, et pour la protection contre les inondations.

Cette approche s'est basée sur l'analyse d'un nombre considérable d'observations d'averses sur tout le pays [6]. Les averses de projet ainsi définies, attribuent une distribution temporelle à une hauteur de pluie donnée enregistrée pendant 24 heures.

Ces observations, faites à travers tout le pays, ont été analysées et ont finalement donné lieu à quatre types d'averses de projet selon la position géographique et donc le climat dominant [13].

Pour assimiler la différence entre ces averses, la figure 4 présente la distribution d'une averse de 20 mm selon les quatre types :

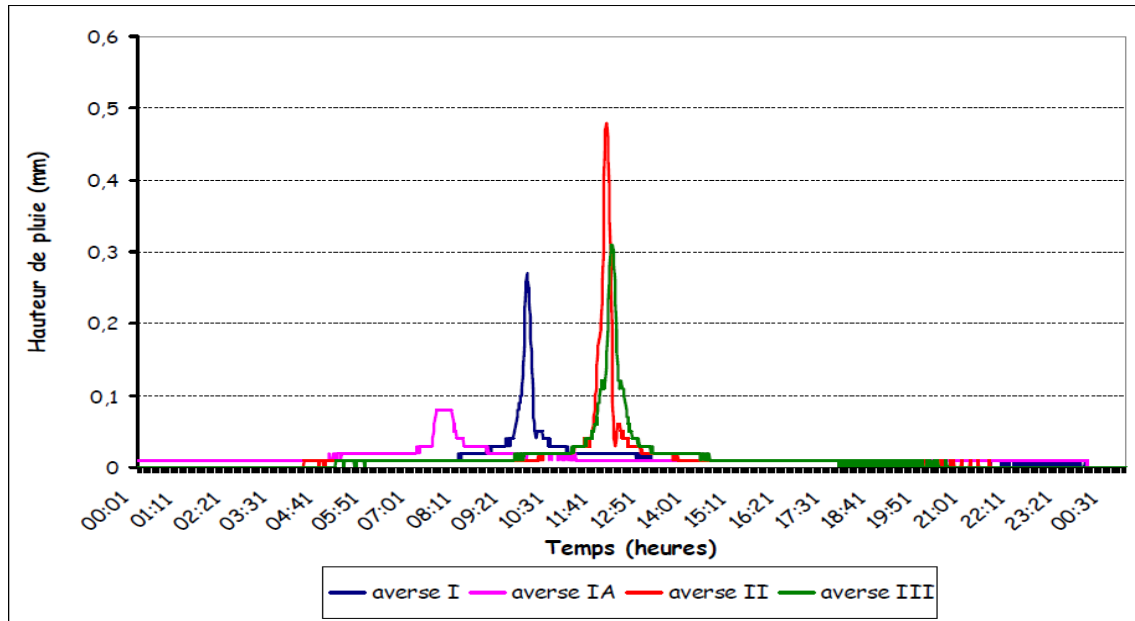


Figure 4- Les distributions temporelles 24h des quatre averses de projet de la NRCS

Dès un premier aperçu, on remarque que les quatre types se distinguent par leurs intensités, leurs heures de pointe et par leurs formes.

Pour ce qui est de l'intensité maximale, l'ordre décroissant commence par le type II, puis le III, ensuite le type I et enfin le IA. Ces intensités différentes vont sans doute provoquer, lors des simulations, des débits de pointe qui vont sous-estimer ou surestimer les débits observés en fonction de l'intensité maximale réelle qu'on aurait enregistrée si on avait un pluviographe.

En ce qui concerne l'heure de pointe, on constate qu'elle est avant midi pour tous les types, débutant par le IA vers 8h, le type I vers 10h et vers 12h pour le II et le III.

Cette propriété d'heure de pointe, va influencer à son tour l'heure du débit pointe simulé qui va se manifester soit tôt soit tard, en fonction de l'heure de pointe réelle de l'averse qu'on aurait enregistrée si on possédait un pluviographe.

Pour la forme, on voit que l'averse type IA est la plus éparpillée sur les 24h suivie par le type III, le type I et enfin le II qui est la plus serrée.

La forme de l'averse va conditionner la forme de l'hydrogramme, puisque on connaît que la forme de ce dernier découle de celle de l'averse, par conséquent cette forme va soit sous-estimer soit surestimer le volume de la crue, tout dépend de la forme réelle de la distribution journalière de l'averse qu'on aurait enregistrée facilement si on avait un pluviographe.

Lors de la modélisation, et puisque il n'y a pas de choix de préférence, nous allons utiliser les quatre types pour chaque événement, et essayer d'en déduire, en comparant les résultats de chaque type, l'averse la mieux appropriée à notre contexte.

II-3-3- La fonction de production : la NRCS CN :

a- Le concept de base :

De même que pour les averses, la mise en place de cette fonction a été réalisée par le NRCS en coopération, cette fois-ci, avec trois consultants privés à savoir : Horner, Horton et Sherman [9].

Cette fonction de production apparue en 1950 et surnommée autrefois la SCS CN est le fruit de plus de deux décennies d'analyses des relations pluies-débits sur des petits bassins. Elle relie la pluie nette participante au ruissellement à trois facteurs fondamentaux : l'occupation du sol, le type de sol et l'humidité antécédente, selon l'équation suivante [14] :

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (1)$$

Avec : Pe : les précipitations nettes au temps t ;

P : les précipitations brutes au temps t ;

Ia : l'abstraction initiale ;

S : le potentiel maximum de rétention.

Après avoir effectué de nombreuses expériences, le NRCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant l'abstraction initiale d'un bassin versant au potentiel maximum de rétention [14]:

$$Ia = 0,2 \times S \quad (2)$$

Ainsi, l'équation (1) devient :

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (3)$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de Pe au début et à la fin du pas de temps.

L'influence des deux premiers facteurs susmentionnés est estimée par le paramètre **CN** qui est relié à **S** par l'équation [14] :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (4)$$

Alors que pour intégrer l'influence de l'humidité antécédente, on fait appel à la hauteur de pluie tombée pendant les cinq derniers jours précédant l'événement de crue (NRCS). Ensuite, on définit soit un CN normal, sec ou humide, tout en respectant le tableau ci-après :

Tableau 1- La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN

Types de CN	Hauteur de pluie (mm) sur les 5 jours antérieurs		
	Base annuelle	Base saisonnière	
		Période de végétation	Période de vegetation
CN(I) : conditions sèches	H<12.5	H<35	H<12.5
CN(II) : conditions normale	12.5<H<37.5	35<H<53	12.5<H<27.5
CN(III) : conditions humides	H>37.5	H>53	H>27.5

Donc, selon les conditions d'humidité antérieure propres à chaque événement, on est amené à convertir la valeur de CN normal (lue sur les tables NRCS) au CN sec (I) ou humide (III) en appliquant les formules ci-dessous [4]:

$$CN(I) = \frac{4,2 \times CN(II)}{10 - 0,058 \times CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0,13 \times CN(II)}$$

b- Les variables :

***La carte d'occupation du sol:** cette donnée sert en combinaison avec la carte des sols à déterminer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol.

Elle doit être conforme à la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes : les zones urbaines, les terres agricoles, les terres agricoles cultivées et les zones arides et semi-arides.

Cette classification renferme la majorité des classes susceptibles d'être présentes sur le terrain avec une précision décisive.

***La carte de sols:** elle aide à estimer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Comme la carte d'occupation du sol, la carte des sols :

Tableau 2- Les capacités initiales i_0 et finales i_f d'infiltration en sol par le NRCS

Type de sol	Groupe	I_0 [mm/h]	I_f [mm/h]
Sable, silt	A	250	12 – 8
Limon sableux	B	200	8 – 4
Limon argileux	C	130	4 – 1
Argiles, sols salins	D	75	1 – 0

***Le pourcentage d'imperméable:** il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol.

c- Les paramètres :

***CN:** sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration [14]. Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS où on combine la nature de l'utilisation du sol, son traitement, les conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN normal, qui va être utilisée directement dans les équations citées, ou après l'avoir convertie selon la hauteur de pluie tombée pendant les cinq jours avant l'événement.

Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation du sol et de type de sols, un composite doit être calculé par la formule :

$$CN_{\text{composité}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i}$$

$CN_{\text{composite}}$: le CN utilisé pour l'ensemble du bassin par la fonction de production ;

CN_i : le CN d'un composé hydrologique du sol ;

A_i : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

***Ia**: abstraction initiale mesurée en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage nature dépressions,...etc.

L'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de Ia. On estime sa valeur le plus souvent par calibration, Il reste à signaler que les valeurs de ces deux paramètres peuvent être calibrées par le modèle HEC-HMS.

II-3-4- Les fonctions de transfert :l'hydrogramme unitaire de la NRCS et de Clark :

4-1-L'hydrogramme unitaire : Comme définit par Sherman en 1932, l'hydrogramme unitaire est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, uniforme et constante, d'une durée de référence (D), suffisamment longue pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin [4].

De cet hydrogramme unitaire on peut facilement ressortir l'hydrogramme provoquée par n'importe quelle hauteur de pluie nette, en se référant à sa règle fondamentale : la relation pluie nette et ruissellement est linéaire. La figure ci-dessous illustre la notion de l'hydrogramme unitaire est ses paramètres clé

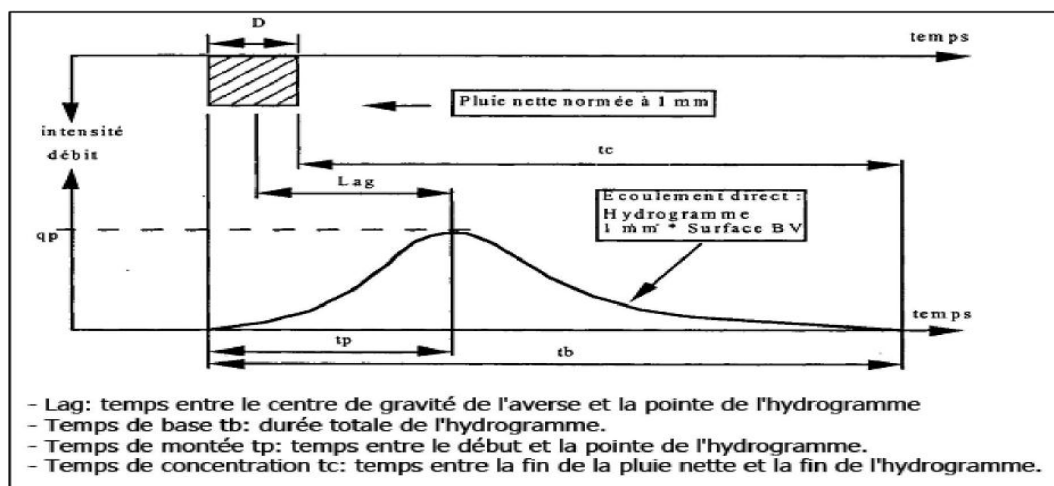


Figure 5- notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristiques fondamentales d'après[6])

Lors de l'utilisation de l'hydrogramme unitaire comme fonction de transfert, il faut valider ses hypothèses qui lui sont associées sur le bassin versant d'étude, ou au moins de les prendre en considération lors de l'analyse des résultats. Ces hypothèses sont :

- La pluie nette est uniforme sur le bassin et constante dans le temps ;

- Les caractéristiques de l'hydrogramme unitaire sont invariantes dans le temps: la durée de l'hydrogramme de ruissellement direct (temps de base T_b) est constante et indépendante de l'intensité de la pluie ;
- La réponse du bassin aux pluies est linéaire: pour une même durée de référence D , les ordonnées de l'hydrogramme unitaire sont proportionnelles au volume de la pluie nette ;
- L'hydrogramme unitaire reflète l'ensemble des caractéristiques physiques du bassin versant.

4-2-L'hydrogramme unitaire de la NRCS :

a- Le concept de base :

Ce hydrogramme développé par le NRCS découle d'un grand nombre de petits bassins sur tous les États-Unis [14]. Il exprime le débit U_t comme proportionnel au débit de pointe U_p , pour chaque temps t , fraction du temps de pointe T_p .

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (5)$$

Avec, A : surface du bassin versant .

C : constante de conversion (2.08 pour le système international).

Le temps de pointe T_p est relié à la durée de la pluie nette par la formule :

$$T_p = T_{lag} \frac{\Delta t}{2} \quad (6)$$

Où : Δt : la durée de la pluie nette (c'est le pas de temps de simulation) ;

T_{Lag} : le Lag du bassin (différence entre le pic de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme).

Une fois le T_{lag} calculé, le modèle résout l'équation (5), puis (6) pour trouver successivement le temps et le débit de pointe de l'hydrogramme, qui vont permettre de concevoir l'hydrogramme de simulation en reposant sur le principe de linéarité de la réponse.

b. Les paramètres :

Le seul paramètre de cette méthode est le T_{lag} , il sera calculé directement par le WMS qui offre 17 formules pour le faire.

Notez bien que la valeur de ce paramètre peut être calibrée par le modèle HEC-HMS.

4.3. L'hydrogramme Unitaire de Clark :

a. Le concept de base

L'hydrogramme unitaire de Clark interprète deux processus importants dans la transformation pluie nette débit qui sont :

- L'atténuation : reflète le stockage temporaire de la pluie nette dans le bassin versant qui baisse l'ampleur du débit.
- La translation : représente le mouvement de la pluie nette le long du réseau de drainage depuis son origine jusqu'à l'exutoire.

L'hydrogramme en question est fréquemment utilisé pour les modélisations événementielles [11], cette méthode se montre très efficace pour reproduire des hydrogrammes complexes dans des bassins présentant une topographie et occupation du sol variés (Sabol 1988 in [11]).

b. Les paramètres

Cet hydrogramme possède deux paramètres qui renvoient chacun à l'un des processus pris en compte :

***Le temps de concentration T_C** : résume le processus de translation de la pluie nette le long du réseau hydrographique.

***Le coefficient de stockage S_t** : représente le phénomène de stockage provisoire de la pluie nette dans le bassin versant.

Ces deux paramètres sont calculés par le WMS doté de 11 formules pour l'estimation du T_C qui donnera.

Notez bien que les valeurs de ces deux paramètres peuvent être calibrées par le modèle HEC-HMS.

II-3-5- Le débit de base : la récession exponentielle :

a- Le concept de base

Ce formalisme donne la possibilité de simuler la contribution du réservoir souterrain au débit avant et après le pic ou les pics de l'événement de crue, et ceci en établissant une relation exponentielle entre le débit à deux temps consécutifs, cette relation est formalisée par l'équation [14]:

$$Q_t = Q_0 \times K^t$$

Où, **Qt** : le débit au temps t ;

Q₀ : le débit initial ;

K : la constante de décroissance exponentielle.

En effet, avant le pic de l'hydrogramme, et connaissant le débit initial, l'équation (7) s'active et commence à reproduire le débit total composé uniquement du débit de base de la rivière, jusqu'au point de début de la crue, depuis lequel ce module agira en parallèle avec le module de la fonction de transfert pour restituer le débit total composé à la fois d'un débit de base en décroissance et d'un débit de surface en forte action.

Ce constat demeure actif jusqu'à un certain point nommé seuil, où l'ampleur de participation dans le débit total se renverse. La figure ci-après illustre comment intervient ce module dans le ruissellement :

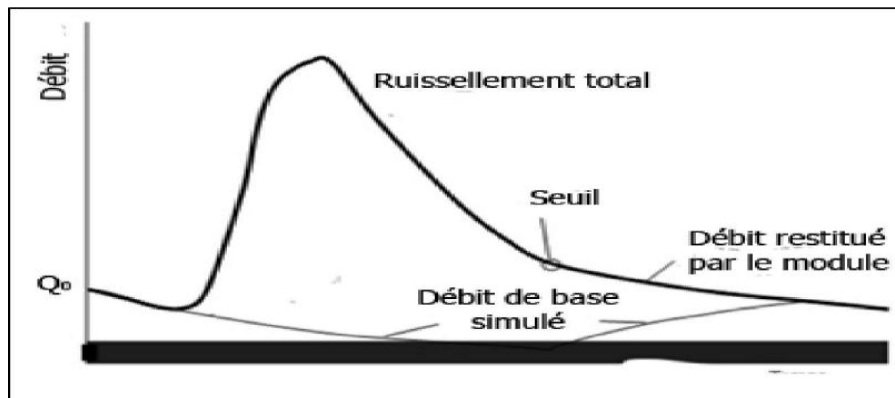


Figure 6- L'illustration de la méthode de la récession exponentielle, d'après [31])

b- La variable

La seule variable d'entrée est le débit initial pour chaque événement de crue, issu de la lecture son hydrogramme.

c- Les paramètres

Les deux paramètres du module sont :

***La constante de récession RC**: ce paramètre dépend des propriétés hydrogéologiques du réservoir souterrain. Elle varie entre 0 et 1. Si sa valeur vaut 1, la contribution du module sera constante avec $Q_t = Q_0$. Puisque, on n'a pas d'informations permettant d'attribuer une valeur

initiale à ce paramètre, et que sa valeur peut être calibrée, on se contentera d'une valeur bibliographique en attendant sa calibration.

* **Le seuil T_d** : lui aussi varie entre 0 et 1. Il est lié au débit de pointe sous forme de rapport. Par exemple, une valeur de 0.1 et un débit de pointe de 10 m³/s signifie que le module reprendra son intervention une fois le débit atteint 1 m³/s. De même que le RC, nous se limiterons à une valeur bibliographique en attendant sa calibration.

II-4-Les avantages et les limites du modèle

Malgré tous tout ce qu'on vient de dire concernant le modèle décrit ci-dessus, la combinaison modulaire choisie et la plate-forme de préparation des fichiers de simulation, le HEC-HMS sous WMS présente des limites liées essentiellement à la conception du modèle lui-même et aux conditions d'utilisation de la combinaison modulaire choisie.

Dans ce qui va suivre, on listera les avantages et les limites dont les trois éléments précités sont pourvus dans la mesure de reconnaître les performances à améliorer et les imperfections à corriger pour une éventuelle future étude.

II-4-1- WMS : le logiciel de préparation des fichiers de simulation

a- Les avantages

Ils sont loin d'être dénombrés, alors on se contentera des plus décisifs :

- Calcul des valeurs initiales des paramètres (CN, TC, St et T_{Lag}), qui aurait dû se faire soit manuellement avec tout le risque d'erreur très probable et de difficulté incontournable, soit estimer en se basant sur la bibliographie qui elle n'est pas toujours fructueuse, voir même leur attribuer des valeurs arbitraires en attendant la calibration qui n'est pas toujours réaliste vu les problèmes d'équi-finalité et de compensation entre les paramètres.
- Automatisation de la description physique du bassin versant, qui est normalement effectuée en partie restreinte par les logiciels de SIG, mais le WMS lui permet en plus de faire une liste considérable d'indices morphométriques qui peuvent aider en les analysant, à mieux comprendre l'influence de la morphologie du bassin étudié sur son régime hydrologique.
- Diversité dans le choix des formules de calcul des paramètres : il permet ainsi de choisir la formule la mieux adaptée au contexte, la plus utilisée dans un pays, celle dont on connaît les valeurs de ses facteurs. En outre, il offre l'aptitude d'étudier la sensibilité du modèle à telle ou telle formule.

b- Les limites

A part le point suivant, il ne semble pas que le WMS ait limité l'avancement droit de cette étude de modélisation.

Impossibilité d'exécution des simulations : certes, celle-ci reste une contrainte, mais puisque le logiciel HEC-HMS assume cette mission, donc l'étude n'a pas été influencée par les effets de ce défaut.

II-4-2- HEC-HMS : le modèle de simulation hydrologique**a- Les avantages**

Puisque, nous avons très bien détaillé la description du modèle, nous n'allons mentionner que les points forts résumés comme suit :

- Diversité dans les formalismes proposés : la variété remarquable de ces méthodes de calcul, offre à l'utilisateur l'opportunité du choix en fonction de ses moyens, ses finalités et de son expérience.
- Diversité dans les combinaisons modulaires possibles : ce critère est garanti par le principe de tâches séparées qui le distingue des autres modèles, et qui lui confie une caractéristique incroyable : « plusieurs modèles en un modèle ».
- Aptitude de calibration et nature des résultats issus : pour plusieurs modèles la calibration est effectuée par un autre programme, d'autres peuvent même la faire, mais avec un choix limité de fonctions objectives et d'optimisation. En plus, ces modèles ne peuvent afficher à la fin que les valeurs des paramètres calibrés,

b- Les limites

- Tous les formalismes utilisent des valeurs constantes des paramètres c'est-à-dire qu'ils sont indépendants du temps, alors que pour de longues durées ces paramètres peuvent changer pour diverses motifs. il y a une alternative que le développeur propose à ceci c'est de diviser une longue simulation en plusieurs et de changer manuellement les paramètres entre les simulations [14].

Cette contrainte est loin de détériorer nos résultats, car nous avons opté pour une modélisation événementielle.

- Tous les modules ne sont pas accouplés, c'est-à-dire que chaque partie du modèle est calculée indépendamment de l'autre, mais l'erreur liée à ce problème est minimisée par l'utilisation de courts temps de calcul [13].

Cette limite touche en particulier les modèles continus de HEC-HMS qui intègrent des facteurs étroitement liés comme l'évapotranspiration, la fonte de neige et l'infiltration. Par conséquent les erreurs liées à cet inconvénient est à rejeter dans notre cas.

- La représentation de la structure du bassin : représentée dans le HEC-HMS, par un arbre ramifié qui rend son assimilation difficile. Un élément ne peut avoir qu'une seule sortie de débit, l'élément de diversion ne peut pas piquer le débit d'un endroit et le verser dans un autre [12].

Toutes ces limites de représentation sont gênantes, mais dans notre cas, leurs effets sont neutralisés, parce que notre bassin est très simplifié (un élément de « Subbassin », un élément « Reach » et un exutoire).

II-4-3- La combinaison modulaire choisie :

a- Les avantages

- Le module météorologique adopté a permis de surmonter le problème d'absence des données de pluviographe.
- La méthode NRCS CN est simple, fidèle, ne nécessite pas d'énormes quantités de données, et dépend directement d'un seul paramètre qui renferme trois facteurs de base dans la modélisation pluie-débit (l'occupation du sol, les sols et l'humidité antécédente).
- La méthode NRCS CN va nous permettre entre autres de faire des prédictions concernant la réponse du bassin versant à des scénarios de changements susceptibles d'affecter son occupation du sol (urbanisation, déforestation, reboisement,...).
- Les deux fonctions de transferts sélectionnées n'exigent pas de données de plus, et montrent des résultats satisfaisants chaque fois qu'on les utilise.
- Le module de débit de base est le mieux adapté au contexte semi-aride, et va aider à mieux restituer les hydrogrammes de crues.
- La combinaison ne contient que peu de paramètres ce qui diminue les erreurs causées par les phénomènes de compensation entre les paramètres et d'équi-finalité.

b- Les limites

- Le recours à une modélisation événementielle, va restreindre les bénéfices de la modélisation en matière de compréhension du fonctionnement hydrologique.
- L'utilisation des averses NRCS va certainement influencer les résultats des simulations en termes du débit, du volume et de la forme de l'hydrogramme simulé. La méthode

NRCS CN peut produire des erreurs en cas d'utilisation directe des tables NRCS, puisque ces tables sont issues de l'analyse de petits bassins des États-Unis.

- L'utilisation d'hydrogramme unitaire peut influencer les résultats si ses hypothèses ne sont pas valides .

II-5- Justification du choix du modèle

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :

- Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles. Donc, le modèle peut donc tourner sans soucis.
- Possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie-débit (morphométrie du bassin versant, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure), et donc les résultats seront plus réalistes.
- La NRCS CN a été validée sur plusieurs bassins versants dans le monde, et ses résultats sont fiables et similaires aux modèles complexes [7]
- Le modèle HEC-HMS et en particulier la méthode NRCS CN est largement utilisée au Maroc, ce qui rend sa validation dans notre bassin très probable.
- Avoir une base commune pour la comparaison avec les deux premières études de modélisation menées sur le bassin. Cette base c'est la description physique du bassin versant, plus précisément l'occupation du sol et le type de sol.
- La connaissance préalable du modèle lors d'une initiation à son utilisation et application pendant un stage antérieure.