

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

P0003/05B

Département d'Hydraulique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en hydraulique

Intitulé

Contribution à la Modélisation du Transport Solide par la Logique Floue



Réalisé par : Yacine BENALOUANE

Dirigé par : Dr Abdelmalek. BERMAD

Promotion 2005

Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce travail

A la mémoire de Chérif qui nous a prématurément quitté

A ma mère et à mon père

A ma sœur Doria ainsi qu'à mon petit frère Malik

A mes grands parents qui me sont très chers

A mes oncles et à mes tantes

A mes cousins et cousines

A mes amis en particulier Redouane, Amine, Malik, Salim, Sara, Hichem, Sihem, Lamine, Soumeïya, Besma...

Remerciements



Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères au Docteur Bermad, mon encadreur, pour sa disponibilité et ses efforts fournis afin de mener à bien ce projet.

Je tiens aussi à exprimer mon extrême reconnaissance au Professeur Dechemi, dont le soutien sans faille a été d'une immense contribution à la réalisation de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur Benkaci ainsi qu'à Monsieur Zeggane pour leur précieuse aide.

Que tous ce qui ont contribué de près ou de loin, dans ma formation ainsi qu'à la réalisation de ce travail reçoivent ici le témoignage de ma grande sympathie.

<u>Introduction générale</u>	01
<u>Chapitre I : Généralités sur le transport solide</u>	02
<u>I.1- Introduction</u>	02
I.1.1- Généralités	02
I.1.2- Définitions	
<u>I.2- La chaîne des transferts de matière</u>	03
I.2.1- Les étapes de transfert	07
I.2.2- Les modes de transfert	07
I.2.3- Accumulation temporaire lors du transfert	08
I.2.4- Notion de bilan de matière	09
<u>I.3- Transport et évacuation des produits érodés : contexte fluvial</u>	09
I.3.1- Introduction	10
I.3.2- Eléments d'hydraulique fluviale : Rappels	10
I.3.3- Expérience montrant les différents types de transport	11
I.3.4- Chemins empruntés lors du transport	12
I.3.5- Prélèvement et transport des particules	13
<u>I.4- Conclusion</u>	13
<u>Chapitre II : Généralités sur la logique floue</u>	15
<u>II.1- Généralités</u>	15
II.1.1- Introduction	15
II.1.2- Historique	16
<u>II.2- Notions d'ensembles et de sous ensembles</u>	17
II.2.1- Notion d'ensembles classiques	17
II.2.2- Notions d'ensembles flous	17
II.2.3- Comparaison entre les ensembles classiques et les ensembles flous	18
II.2.4- Exemples	18
<u>II.3- Variable linguistique :</u>	20
II.3.1- Fonctions d'appartenance	20
II.3.1.1-Notation	21
<u>II.4- Traitement d'un problème par la logique floue</u>	21
II.4.1- Première étape : quantification floue des entrées / sortie du système	
II.4.2- Deuxième étape : établissement des règles liant les sorties aux entrées	22
II.4.3- Troisième étape : combinaison des règles liant les sorties aux entrées	
II.4.4- Exemple	23
II.5- Combinaison de plusieurs entrées	24
<u>II.6- Modélisation par les systèmes flous (Modèle T.S.K)</u>	25
<u>II.7- Conclusion</u>	26
<u>Chapitre III : Présentation de la région d'étude</u>	27
<u>III.1- Introduction</u>	27
III.1.1- Définition du débit liquide	27
III.1.2- La mesure des débits	27

III.1.2.1- Le jaugeage par exploration du champ de vitesse	28
III.1.2- Définition du débit solide	28
III.1.3- Mesure du débit solide	28
III.1.3.1- Matériel de prélèvements	29
III.1.3.2- Calcul du débit solide en suspension	29
III.1.3.2.1- Mesures en continu	30
III.2- Cadre de l'étude	30
III.3- Base de données	35
<u>Chapitre IV : Modélisation du transport solide</u>	37
<u>IV.1- Définition de la modélisation</u>	37
<u>IV.2- Historique de la modélisation</u>	37
IV.2.1- TIXERONT (1960)	37
IV.2.2- CAPOLINI (1969)	38
IV.2.3- DEMMAK (1982)	38
IV.2.4- SOGREAH (1984)	38
IV.2.5- ARABI (1991)	38
IV.2.6- KOURI (1993)	38
IV.2.7- Projet RAB 80/011	38
IV.2.8- Projet GTZ	39
IV.2.9- REMINI (2003)	39
IV.2.10- TOUAIBIA (2005)	39
<u>IV.3- Modélisation de la relation débit liquide – débit solide</u>	39
IV.3.1- Critères de validation	39
IV.3.2- Modélisation par les modèles régressifs	41
IV.3.3- Modélisation de la relation flux liquide/ flux solide par la logique floue	
IV.3.3.1- Principe de fonctionnement du modèle flou	41
<u>Chapitre V : Résultats de la modélisation</u>	43
<u>V.1- Modélisation de la relation débit liquide / débit solide :</u>	43
V.1.1- Modélisation par les modèles régressifs	43
V.1.1.1- Modélisation à l'échelle annuelle	43
V.1.1.2- Modélisation en période sèche et période humide	44
V.1.1.3- Modélisation à l'échelle saisonnière	44
V.1.1.4- Modélisation à l'échelle mensuelle	46
V.1.1.5- Discussion des résultats	46
V.1.1.6- Conclusion	48
<u>V.1.2- Modélisation par la logique floue</u>	48
V.1.2.1- Structure utilisée	49
V.1.2.2- Etude de la relation flux liquide – flux solide	50
V.1.2.3- Résultats obtenus	52
V.1.2.4- Discussion des résultats	52
V.1.2.5- Conclusion	52
<u>V.2- Etude comparative</u>	53

V.3- Conclusion générale
Conclusion générale

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

54
55

Résumé

Les particules solides transportées en suspension dans les écoulements de surface jouent un très grand rôle dans le dysfonctionnement des installations et ouvrages hydrauliques ainsi que dans la dégradation de la qualité de l'eau

Le présent sujet est proposé dans ce contexte. Il permet d'approcher le problème du transport solide en suspension dans les écoulements de surface au niveau du bassin versant de l'Isser.

Dans le cadre du travail proposé dans ce thème, on développera une méthodologie utilisant l'une des techniques d'intelligence artificielle, qui est la logique floue, pour la caractérisation de la relation débit liquide débit solide.

Mots clés : Débit liquide, Débit solide, Logique Floue.

Abstract

The solid particles transported in suspension in the flows of surface, play a very great part in the dysfunction of the installations and hydraulic works as in the deterioration of the quality of water.

This subject is proposed in this context. It makes possible to approach the problem of transport in suspension in the flows of surface, on the level of the catchment area of Isser.

In the framework of the work suggested in this topic, we will develop a methodology using one of the techniques of artificial intelligence (Fuzzy Logic) for the characterization of the relation between liquid flow and solid flow.

Key words : Liquid flow, Solid flow, Fuzzy Logic.

ملخص:

إن المواد العالقة المتقلة عبر مجاري المياه السطحية تلعب دورا هاما في عطب الإنجازات المائية و منشآت الري و تدهور نوعية المياه.
هذا العمل المقترح لأنه يمكننا التطرق إلى مشكل تنقل المواد العالقة في مجاري المياه السطحية لحوض الصب يسر في هذا الإطار تم إيجاد طريقة جديدة تعتمد على إحدى تقنيات النقاء الإصطناعي ، ألا و هي المنطق الغامض لفهم و دراسة العلاقة بين التدفق السائل و التدفق الصلب.

كلمات مفتاحية : التدفق السائل ، و التدفق الصلب، المنطق الغامض.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale

Introduction générale



L'eau est une ressource vitale, vulnérable, et rare pour l'humanité. Les chiffres sont là, têtus et dérangeants : le Water Resources Institute a comptabilisé plus de **232 millions** d'êtres humains, représentant **26 pays**, qui manquent d'eau ! C'est pour cela certains pays, comme le notre, font appel à des techniques afin d'accroître les ressources en eau.

L'une des techniques utilisées est la construction de barrages, cependant ces ouvrages voient leur capacité de stockage diminuer ainsi que leur durée de vie raccourcir.

Ceci est principalement du au dépôt de particules en suspension transportées à travers les cours d'eau en amont.

En effet, en Algérie, les pertes annuelles en capacité de stockage des eaux dans les barrages sont estimées à environ 20 millions de m³ et sont dues à l'envasement. Outre ces problèmes majeurs, l'envasement des canaux d'irrigation et la détérioration de certains ouvrages hydrauliques, ainsi que la dégradation de la qualité des eaux, représentent les graves conséquences résultantes du transport de matières solides, d'où l'objectif de ce présent travail : *Modéliser le comportement du flux de matières solides en fonction du flux liquide.*

A travers ce projet de fin d'études, différentes approches ont été faites, la première consiste en un ajustement de la relation débit liquide - débit solide par différents modèles régressifs.

La seconde approche consiste à utiliser l'une des méthodes de l'intelligence artificielle qui est la logique floue, elle consiste à implémenter un raisonnement humain dans une machine.

Finalement, pour clore ce travail une étude comparative entre les deux premières approches a été faite, visant à expliciter les limites des modèles régressifs, et l'apport obtenu par l'utilisation d'un modèle basé sur la logique floue.

I. Généralités sur le transport solide

I- Généralités sur le transport solide

I.1- Introduction :

I.1.1- Généralités :

La surface de la terre est une zone où s'exercent les influences de plusieurs milieux aux caractéristiques diverses. Ces milieux se répartissent sous forme d'enveloppes plus ou moins discontinues et imbriquées qui interagissent les unes avec les autres :

- ⊗ La partie superficielle de la lithosphère (enveloppe solide) ;
- ⊗ Deux enveloppes fluides intimement mêlées : atmosphère et hydrosphère ;
- ⊗ La biosphère constituée de l'ensemble du monde vivant (flore, faune dont l'homme) ayant progressivement colonisé les surfaces continentales au cours des temps géologiques. (Figure I.1)

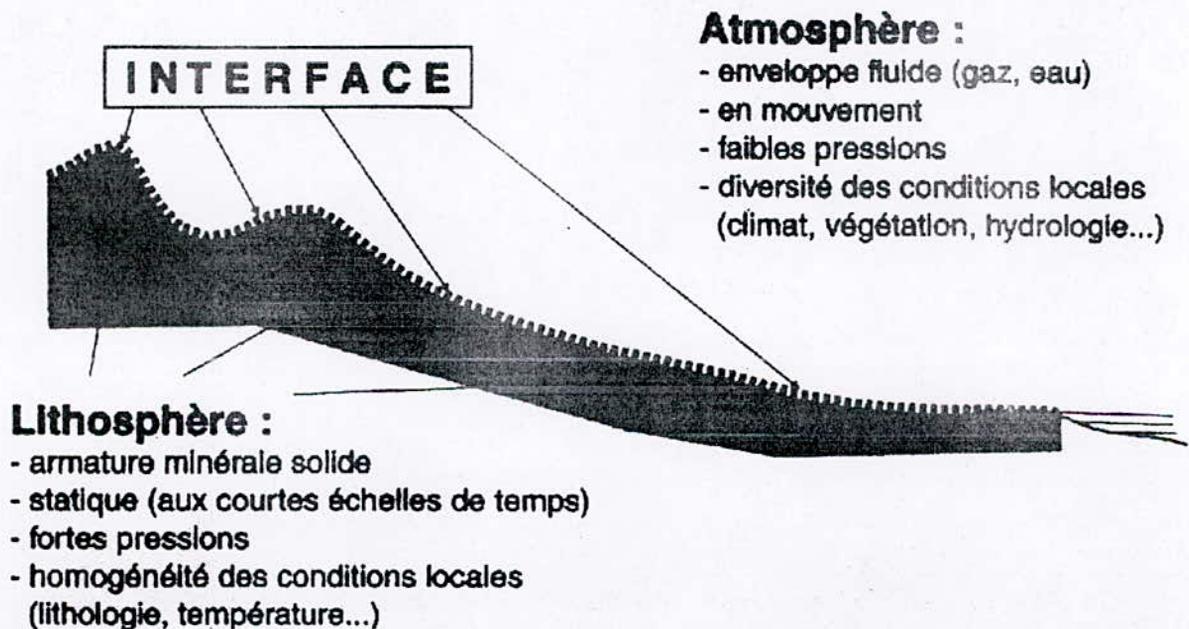


Figure I.1 : Interface entre enveloppes fluides et enveloppes solide.

Dans cette interface les précipitations y circulent et s'y accumulent selon les conditions structurales et topographiques et s'y infiltrent à plus ou moins grande profondeur. Cette eau mobilise les éléments disponibles, les transporte et les redistribue.

I.1.2- Définitions :

L'érosion du sol est une forme de dégradation au même titre que la compaction, la réduction des taux en matière organique, la détérioration de la structure du sol, le drainage souterrain insuffisant, la salinisation et l'acidification du sol. Toutes ces formes de dégradation, sérieuses en elles-mêmes, accélèrent l'érosion du sol.

C'est un processus naturel sur toutes les terres. Les agents de l'érosion sont l'eau et le vent, chacun provoquant une perte importante de sol chaque année dans le monde entier.

L'érosion peut être un processus lent et insoupçonné, ou encore prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme de sol arable. Le lessivage de la terre arable peut résulter en une réduction du potentiel de production, en une réduction de la qualité de l'eau de surface et en l'encrassement des réseaux de drainage.

Toutes les roches ne présentent pas la même sensibilité à l'érosion. Les différences d'érodabilité potentielle dépendent de l'organisation de leurs constituants minéraux et de leur fissuration (*Sundborg, 1986*).

a) Rôle de l'organisation minérale : notion de cohésion

La cohésion peut être assimilée à l'importance des forces qu'il faut vaincre pour séparer les uns des autres les éléments constitutifs de la roche. Cette notion, surtout utilisée par différents ingénieurs pour les problèmes d'aménagement, est importante en ce qui concerne l'aptitude des roches à l'érosion.

➤ Roches de forte cohésion

Les roches endogènes issues de la solidification d'un magma (roche plutonique ou volcanique) ou de la cristallisation de matériel dans des conditions particulières de température et de pression (roches métamorphiques) en font partie. Les cristaux y sont intimement imbriqués et l'eau y pénètre difficilement. Leur résistance à l'érosion dépend du type de structure : les structures macro cristallines (grenue, pegmatitique) résistent mieux à l'érosion du fait de la faible densité des discontinuités inter cristallines. Les structures microcristallines sont plus facilement érodables au niveau de leur pâte fine ou vitrifiée.

De l'importance de l'altérabilité des minéraux qui les composent : l'abondance de matériaux facilement altérables (olivines, plagioclases calciques, pyroxènes) facilite l'érosion.

➤ Roches de faible cohésion

Ce sont les roches non consolidées ou meubles, constituées de grains plus ou moins grossiers libres (graviers, sables, silts ou argiles). Elles sont

facilement érodables à cause de l'isolement de leurs éléments constitutifs. Leur déstabilisation érosive est directement liée à l'importance de l'eau interstitielle libre, saturant ou non les vides inter granulaires. Le coefficient indice des vides représente le rapport du volume des vides au volume des constituants minéraux de la roche. Sa valeur s'échelonne de 0.40 à 0.70 selon la forme et la taille des grains.

b) Rôle de la fracturation : différents types de fracturation

Les roches présentant une forte cohésion ont un comportement rigide vis-à-vis des contraintes lithosphériques. Elles réagissent en se fracturant à des échelles variables, allant du Km au nanomètre. Ces fractures constituent des discontinuités dans la roche, augmentant ainsi sa vulnérabilité vis-à-vis des processus de l'altération. En fonction des différentes échelles, on distingue : les failles, les joints ou diaclases, les clivages schisteux, les clivages des minéraux.

Les failles sont des discontinuités se trouvant entre deux compartiments déplacés l'un par rapport à l'autre. L'ordre du déplacement varie du mètre à des dizaines de Km. L'emplacement des failles est marqué par une zone broyée offrant une moindre résistance à l'érosion, ce qui est le cas pour les diaclases qui accélèrent le processus d'érosion à cause de leur organisation en réseaux complexes. Autre types de fentes pouvant accélérer l'érosion, les foliations de schistes qui offrent à l'eau une possibilité de pénétration accrue et accélère le processus d'érosion. Contrairement aux différents types de fissures citées précédemment, les clivages des minéraux qui ont tendance à se cliver selon une ou plusieurs directions préférentielles, offrent une excellente résistance à l'érosion.

c) Rôle des mouvements de la lithosphère sur l'érosion

La représentation des grandes structures géologiques présentes en surface de la lithosphère sont dues à l'activité tectonique. Cette activité se manifeste encore actuellement par les séismes et les volcans, mais aussi par des mouvements épirogéniques moins évidents de relèvement ou d'affaissement et influençant, là où ils s'expriment, les processus d'érosion. Les zones en limite de plaque lithosphérique sont le siège de mouvements horizontaux et verticaux de grande ampleur, entraînant la genèse d'un relief chaotique, faisant voisiner des blocs surélevés et des bassins affaissés. La très forte rugosité de ce relief permet des taux d'érosion très importants. La production de matières érodées, mesurée à l'embouchure des fleuves drainant ces régions est de l'ordre de 10 000 tonnes par Km² et par an, soit 100 fois plus que la moyenne mondiale (Ritchot, 1985).

d) Relief des terres émergées et érosion

Il existe plusieurs types de reliefs des terres émergées, distincts par leur morphologie propre et par les processus d'érosion liés à chacun (Erhart, 1956) :

Les montagnes jeunes : Elles présentent une importante couverture sédimentaire entrecoupée de noyaux de roches endogènes (granites, séries métamorphiques, ...). Les altitudes moyennes y sont importantes, les versants y sont très pentus et l'érosion très active.

Les montagnes anciennes partiellement arasées : Elles sont le plus souvent libérées des couvertures sédimentaires et présentent à l'affleurement des roches endogènes. Les versants sont faiblement pentus et l'érosion est moyennement active.

Les boucliers très anciens totalement arasés : Elles présentent aussi des roches d'origine endogène. Les versants présentent de très faibles pentes et l'érosion y est faible.

Les zones volcaniques. Sur cette répartition générale se surimposent de vastes zones volcaniques. Elles sont liées, soit au type de chaîne de montagne, soit à des émergences de points chauds d'origine profonde qui s'épanche en surface, indépendamment des ensembles tectoniques.

e) Rôle de l'atmosphère

Enveloppe gazeuse de masse faible et de très faible épaisseur relative, l'atmosphère capte l'énergie solaire, assure sa distribution par la circulation des fluides, régularise la température, filtre les rayons nocifs issus du soleil, et permet l'humidification des continents (donc leur érosion) par les pluies (Probst, 1990). De toutes les planètes du système solaire, la terre semble être la seule à posséder une atmosphère permettant la capture de l'énergie solaire et donc le fonctionnement d'un cycle de l'eau et la présence d'une biosphère. La répartition inégalitaire de l'énergie solaire est la première cause essentielle de ce que l'on peut appeler le système climatique qui s'appuie essentiellement sur la circulation atmosphérique. La répartition des climats et des précipitations est la conséquence de cette circulation globale, et présente une distribution zonale.

- ✚ Les basses températures moyennes et les faibles pluviosités des hautes latitudes.
- ✚ Les températures moyennes et plus grande pluviosité.
- ✚ Les ceintures désertiques et les faibles précipitations.
- ✚ Les fortes précipitations et les fortes températures.

Des conditions locales peuvent engendrer un système climatique régional qui échappe partiellement à l'influence directe de la circulation atmosphérique :

- ✚ Un climat méditerranéen caractérisé par une irrégularité saisonnière des précipitations, une clémence et une faible amplitude des températures.
- ✚ Un climat à affinités tropicales mais à hiver relativement froid.

- ★ Un climat à saisons très contrastées et forte amplitude des températures.

Cette répartition des climats conditionne les processus d'érosion et de transfert de matériaux à la surface des continents.

f) Rôle de l'hydrosphère

L'hydrosphère comprend l'ensemble de l'eau à la surface et dans la partie superficielle de la croûte terrestre (Tardy, 1989) : océans, eaux souterraines, rivières et lacs, des glaciers et eaux atmosphériques.

La présence d'eau sur la terre est la chance de cette planète. Sans elle, la vie n'aurait pas pu s'y établir et s'y développer.

L'eau possède des propriétés physico-chimiques exceptionnelles qui lui permettent de jouer un rôle important dans la modification et le transfert d'éléments et de matériaux de la lithosphère :

L'eau liquide est très mobile. La petite taille de sa molécule, sa faible viscosité et sa fluidité lui permettent une grande mobilité et la faculté de pénétrer les plus petits interstices disponibles dans le sol, les roches fissurées...

L'eau est un très bon solvant. Grâce à sa bipolarisation électrique l'eau est un solvant pour la plupart des corps chimiques. Cette propriété lui permet de lessiver les continents et de conduire les éléments ainsi dissous en direction des mers et des océans.

La densité de l'eau. Par définition, celle-ci varie entre 0.9170 g/cm^3 et 1 g/cm^3 . Elle se situe à une position moyenne entre les matières minérales et les matières organiques. Cette valeur est importante pour la mise en suspension des particules, leur transport et leur dépôt.

g) Rôle de la biosphère

La biosphère prélève, redistribue et échange matière et énergie avec le domaine minéral qui l'environne et c'est à ce titre qu'elle joue un rôle important sur le fonctionnement de la surface des terres émergées.

La biosphère est représentée par quatre éléments importants :

- ★ Les végétaux ;
- ★ Les bactéries ;
- ★ Les animaux ;
- ★ L'espèce humaine.

Les végétaux ont un rôle important par leur influence sur le processus d'érosion de leur support (sol et substrat), autre fraction peu ou non

visible, réduite en poids et dont la fonction est essentiellement de décomposer les matières mortes, les bactéries, jouent également un rôle important dans ces processus d'érosion. Parmi les animaux, les vers de terre sont certainement les agents les plus actifs de l'érosion des sols. Leur présence abondante provoque un brassage général de zones meubles superficielles. Leurs terriers accélèrent la pénétration en profondeur d'agents érosifs, favorisant ainsi les processus de dégradation du substrat (*Duchaufour, 2001*). Cependant l'espèce humaine, joue également un rôle de plus en plus actif sur le fonctionnement de la surface.

I.2- La chaîne des transferts de matière

La surface terrestre est une zone de migration de matière entre la partie émergée des continents et les grands domaines de sédimentation. Cette migration suit une chaîne de transfert dont il est possible d'établir les étapes et le bilan quantitatif de matière. Ce fonctionnement recouvre différentes échelles d'espace et de temps. Les flux de matières empruntent des vecteurs et des parcours variés comprenant des phases de stockage temporaire.

Les principaux vecteurs de transfert sont les différents fluides atmosphériques : l'eau (liquide, solide) et secondairement le vent régis par les lois de la physique des fluides.

L'eau précipitée sur les reliefs continentaux, en s'écoulant selon les lois de la gravité sur les pentes topographiques, libère progressivement son énergie potentielle sous forme d'énergie mécanique qui permet à l'eau courante de façonner le lit des rivières et de transporter les particules (*Probst, 1990*). Ce flux d'énergie est permanent depuis les zones humides jusqu'aux océans.

I.2.1- Les étapes de transfert

Lors du transfert deux étapes principales peuvent être distinguées :

1. Altération météorique : c'est l'ensemble des processus d'altération chimique et de désagrégation physique des roches par les agents bioclimatiques. Ces processus ont lieu sur place et consistent en une transformation des roches, avec séparation des phases solides et dissoutes, permettant leur déplacement ultérieur.
2. Ablation : c'est l'ensemble des processus d'évacuation des produits de l'altération météorique d'une zone de production à une autre de dépôt. Cette évacuation peut se faire selon deux modes :

- Sans l'intervention, sinon discrète, d'un vecteur organisé : c'est le cas des versants ou les roches altérées sont déstabilisées par l'insertion de fluides (eau, air) dans les espaces inter granulaires,

peuvent se déplacer localement sur de courtes distances sous l'effet de la gravité.

- Avec l'intervention d'un vecteur bien circonscrit (ruisseau, fleuve, glacier ou vent), portant la matière en un flux organisé.

L'ablation comprend un stade de mise en mouvement de la matière et stade de transport, le premier nécessitant une énergie un peu plus élevée que le second. Au cours du transport, les matériaux peuvent être transitoirement stabilisés et constituer des formations superficielles.

1.2.2- Les modes de transfert

Il existe quatre types de mode de transfert :

- *Transfert sans vecteur organisé* : La dissolution partielle et la fragmentation des roches et une baisse de forces de cohésion entre les particules. En effet, les espaces étant remplis par de l'air, de l'eau ou autres corps biologiques, le comportement des masses rocheuses se retrouve modifié. Des forces de compression ou de tension inter granulaires favorisent le tassement ou l'expansion des roches, ce qui provoque un déséquilibre sur les versants et se déplacer sous l'effet de la gravité jusqu'à atteindre un nouvel équilibre.
- *Transfert par les glaciers* : Les matériaux peuvent aussi être véhiculés par les glaciers
- *Transfert par le vent* : Les vents sont capables de déplacer des particules solides ou des gouttelettes d'eau renfermant des substances dissoutes.
- *Transfert par les cours d'eau* : La matière est portée par l'eau courante sous trois formes selon le diamètre des particules :
 1. **Charge de fond** : Ce sont surtout les particules de diamètre > 0.5 mm (sables grossiers, galets...), dont la progression vers l'aval se fait par traction et ou roulement au fond du chenal.
 2. **Matières en suspension** : Ce sont les particules fines (diamètre 0.5 mm- 0.5 μ m : sables fins, silts, argiles...). Leur progression est rapide dans la masse d'eau. Elles peuvent atteindre directement le domaine marin, parvenir en phase de crue dans les plaines alluviales et se déposer en décrue ou être piégées par décantation dans les lacs. Elles sont issues comme la charge de fond, de l'érosion mécanique du bassin versant. Elles peuvent atteindre plus de 90% de la charge totale en montée de crue.
 3. **Charge dissoute** : Formée essentiellement par les ions issus de l'altération des roches du bassin versant, et par des micro agrégats (diamètre < 0.5 μ m).

1.2.3- Accumulation temporaire lors du transfert

La progression des matériaux des zones d'érosion vers le domaine marin est souvent interrompue pour des raisons d'ordre topographique, hydrologique, climatique et par la présence d'ouvrages hydrauliques d'accumulation, entraînant ainsi l'amoncellement temporaire de ces matériaux, mais de durée variable. Les matériaux collectés par les cours d'eau à la base des versants sont évacués vers l'aval des bassins à des vitesses variables.

1.2.4- Notion de bilan de matière

Dans un bassin versant, le transfert de matière est caractérisé par :

- ❖ L'enlèvement de matière sur les versants qui correspond à l'érosion (E) : érosion mécanique (Em) des particules solides et érosion chimique (Ec) de matières dissoutes.

L'enlèvement de matières se traduit par :

- L'abaissement de la surface du sol exprimé en mm/an.
- La production de matière (P) exprimée en $\text{m}^3 \cdot \text{Km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ ou $\text{t} \cdot \text{Km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$, surtout de matière solide (Ps) qui alimente des sédiments détritiques en aval. La production dissoute (Pd) peut aussi participer à la sédimentation.
- ❖ Le déplacement de matière. Il s'agit d'un flux (F) de matière, solide (Fs) ou dissoute (Fd), exprimé en m^3 ou t/an.
- ❖ Le dépôt de stockage (S) sur le continent d'une partie de la matière déplacée, ce qui engendre des formations superficielles couvrant les versants de façon discontinue et concentrée dans les vallées. Les volumes sont évalués par leur volume (m^3) ou leur masse (t). Dans un bassin versant fluvial ou la matière est issue de l'érosion des versants le bilan de matière simplifié est régi par une relation simple, pour une durée déterminée :

$$P=F+S \quad (\text{I.1})$$

Le flux solide en un point d'un cours d'eau permet le calcul d'un taux d'érosion mécanique ou de la production solide en divisant la valeur du flux par la surface du bassin versant producteur. Ce calcul donne une image moyenne de la production de matière d'un bassin d'une taille et de caractéristiques données (lithologie, climatologie...). La production solide moyenne des continents aux océans a été calculée ainsi à partir des flux de MES à l'embouchure des grands fleuves et des retenues.

Cette approche permet aussi d'analyser le bilan dans le lit d'un cours d'eau, lieu privilégié de prélèvement et de stockage de particules, en comparant les flux à l'amont et à l'aval d'un tronçon sans confluence. Si le

flux amont est supérieur au flux aval, le lit est le siège d'un stockage d'alluvions ; dans le cas inverse, il y a prélèvement de particules dans le lit et incision. Il est rare d'observer une égalité des flux entre l'amont et l'aval en raison des fluctuations de la dynamique fluviale.

I.3- Transport et évacuation des produits érodés : contexte fluviale

I.3.1- Introduction

Les cours d'eau résultent de la concentration des eaux collectées par les bassins versants. Les eaux courantes prélèvent des particules à la surface du sol et les transportent vers les océans ou les bassins continentaux fermés des zones arides. Les particules qui sédimentent dans le cours d'eau forment les alluvions, essentiellement détritiques et très répandues sur les continents (Campy, 2003).

Une rivière transporte des matériaux granulaires qui proviennent soit du bassin versant soit du fond ou des berges du lit mineur.

Les matériaux du bassin versant peuvent provenir de l'ensemble de sa surface principalement sous l'effet de la pluie, de la fonte des neiges et des cycles gel dégel. Ce mode d'érosion est dit aréolaire (par opposition à linéaire) et se produit soit en nappes soit en rigoles. Une partie seulement du produit de cette érosion aréolaire parvient au réseau hydrographique. Dans les bassins versants montagnards, des formes d'érosion plus localisées peuvent produire brutalement de grandes masses de matériaux. Ce sont les glissements de terrain, les avalanches, les laves torrentielles.

L'érosion due au fond du lit ou aux berges est dite linéaire. Elle persiste même lorsque la pluie cesse. Si les matériaux des deux origines se retrouvent dans la rivière, leur comportement est différent. L'érosion du bassin versant produit en particulier des fines qui se propagent ensuite en auto suspension (Wash load) et sont responsables de sa turbidité alors que les matériaux prélevés sur les parois sont alternativement déposés et repris par le courant. Ces fines peuvent se déposer dans le lit majeur mais rarement dans le lit mineur, sauf si elles sont cohésives, elles sont piégées par des particules du lit lors des dépôts consécutifs aux décrues ou bien si elles s'agglomèrent par floculation. Il résulte de tout cela que ces fines en auto suspension n'ont pas de rôle morphologique, sauf lorsqu'elles décantent dans les bassins de retenue ou dans les fosses d'extraction.

I.3.2- Eléments d'hydraulique fluviale : Rappels

Quelques éléments d'hydraulique fluviale sont nécessaires à la compréhension de la géomorphologie fluviale.

Dans un chenal, l'eau est soumise à deux forces principales : la gravité responsable de l'évacuation de l'eau vers l'aval et les forces de friction liées à la rugosité, qui tendent à freiner la vitesse d'écoulement. La vitesse moyenne

de l'eau dans un tel chenal est fréquemment estimée par la formule de Manning-Strickler :

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (I.2)$$

ou V est exprimée en m/s, R est le rayon hydraulique, égal au rapport entre la surface de la section mouillée et le périmètre mouillé, soit approximativement égal à la profondeur moyenne, J la pente de la ligne d'eau et n est une fonction de la rugosité du chenal (Coque, 1994).

L'écoulement dans un chenal peut présenter plusieurs modalités dont la plus fréquente est l'écoulement fluvial non uniforme et irrégulier, c'est-à-dire avec des turbulences. La modalité de l'écoulement, laminaire ou turbulent dépend de la densité, de la profondeur, de la vitesse de l'eau et de sa viscosité.

En mode turbulent, les filets liquides décrivent des trajectoires complexes en forme de tourbillons. Certains à axe vertical se déplacent dans le sens du courant. D'autres stationnaires ont un axe vertical le long des berges et horizontal au voisinage du fond (Coque, 1977).

I.3.3- Expérience montrant les différents types de transport

Dans un canal vitré uniforme, plaçons sur le fond une épaisseur de grains de graviers identiques et faisons ensuite croître la vitesse de l'écoulement (Degoutte, 2002).

⊕ Pour les faibles vitesses, rien ne se passe : les matériaux solides restent au repos. Pour les vitesses plus élevées, les matériaux solides se déplacent sur le fond en roulant, en glissant ou en effectuant des bonds successifs : le phénomène est appelé charriage. Les grains se déplacent à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau.

⊕ Pour des vitesses encore plus élevées, les matériaux prélevés sur le fond sont emportés par le courant : le phénomène est appelé transport en suspension. Les grains se déplacent à la vitesse de l'eau au droit du grain (Figure I.2).

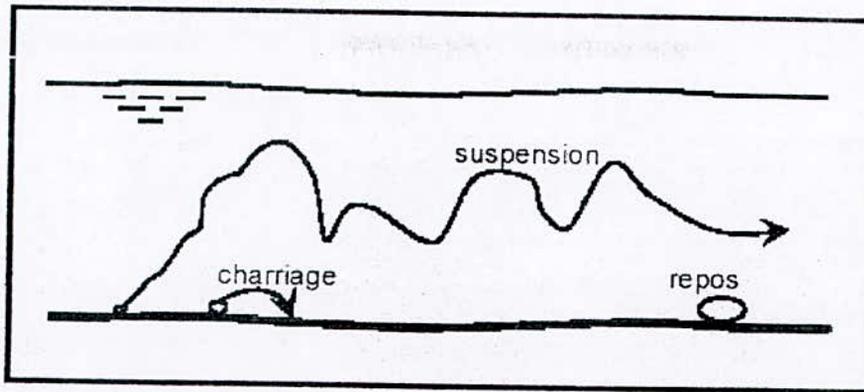


Figure I.2 : Modes de transport solide en hydraulique fluviale.

Les sédiments d'un cours d'eau sont susceptibles d'être mis en mouvement sous l'action des forces hydrodynamiques appliquées par l'écoulement et compte tenu de leur propre poids.

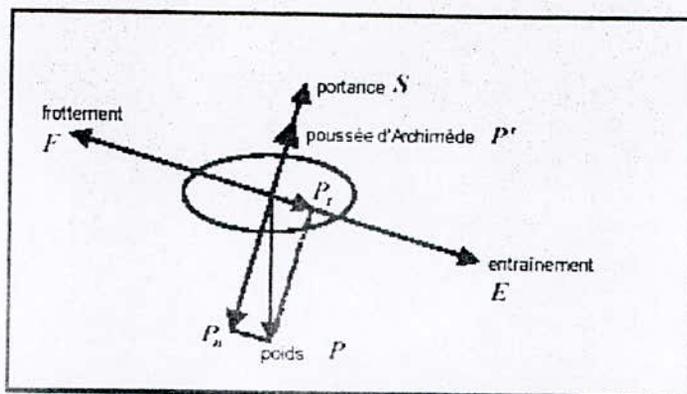


Figure I.3 : Les différentes forces agissant sur une particule solide

Le transport sédimentaire est effectif lorsque la force exercée sur les particules est suffisante pour les déplacer (Cojan, 1999). Les grains sont mis en mouvement à l'encontre de la gravité par l'action de l'écoulement de l'eau.

Les forces agissant sur une particule au repos, sont la gravité et la force liée à l'écoulement du fluide, en plus de la poussée d'Archimède et la force de frottement.

I.3.4- Chemins empruntés lors du transport

Les facteurs contrôlant la relation entre flux liquides et flux solides sont multiples : la lithologie, morphologie et tectonique, climat et végétation et activités humaines. Ils interfèrent de façon complexe, avec cependant une logique permettant de définir trois tronçons dans les grands cours d'eau, d'amont en aval (Schumm, 1977) :

- Un tronçon supérieur, en montagne, à multiples ruisseaux, à fort gradient hydraulique et action essentiellement érosive.

- Un tronçon moyen, en plaine, où le cours d'eau a peu de chenaux, voire un seul chenal, à gradient hydraulique modéré à faible (0.1 à 0.01%). C'est un lieu de transit des matériaux prélevés en amont.
- Un tronçon inférieur à très faible gradient hydraulique (<0.01%). Les cours d'eau âgés se divisent en plusieurs chenaux (delta) ou un seul chenal (estuaire) et la sédimentation est active.

I.3.5- Prélèvement et transport des particules

L'eau courante prélève des particules à la surface du sol et dans les berges des chenaux. Elle s'écoule à une vitesse de quelques mm/s à plusieurs m/s et de façon généralement turbulente: la vitesse et la direction de déplacement des molécules d'eau en un point ne sont pas constantes. L'écoulement laminaire (déplacement de lames d'eau glissant les unes sur les autres) est rare (*Tardy, 1989*).

L'eau courante peut prélever des particules de taille variable (argiles : <2 μ m, limons ou silts : 2-50 μ m, sables : 0.05-2 mm, gravier : 2-20 mm, galets : 2-20 cm, blocs : >20 cm). Les actions d'érosion, transport ou sédimentation par l'eau dépendent de sa vitesse et de la taille des particules disponibles.

Une fois prélevées, les particules sont transportées par l'eau courante, sous trois modes :

- a) *La traction* : glissement ou roulement des particules les plus grossières (galets, graviers ou sables grossiers) sur le fond du lit ;
- b) *La saltation* : progression par bonds successifs de particules (sables principalement) qui restent connectés au fond du lit ;
- c) *La suspension* : transport dans la masse d'eau. La vitesse des filets verticaux de l'eau turbulente est suffisante pour compenser la vitesse de chute des particules. On distingue :
 - La suspension uniforme, relative aux particules les plus fines (sable fins, silts, argiles), réparties de façon homogène dans toute la masse d'eau ;
 - La suspension graduée, localisée dans la tranche d'eau proche du fond où la taille des particules (sables fins et moyens) croît en se rapprochant du lit.

I.4- Conclusion

Depuis longtemps, la description qualitative des formes d'incision et des formes d'accumulation a montré l'importance du jeu de l'érosion dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les pays méditerranéens. Une nécessaire quantification devait être tentée grâce à des méthodes

précises et économiques. Des essais ont été faits à l'échelle du bassin versant. En effet, les oueds de barrage présents dans certains bassins versants peuvent fournir des indications sur la vitesse et l'ampleur de la sédimentation.

II. Généralités sur la logique floue

II- Généralités sur la logique floue

II.1- Généralités

II.1.1- Introduction

Les connaissances dont nous disposons sur une situation quelconque sont généralement imparfaites, soit parce que nous avons un doute sur leur validité, elles sont alors incertaines, soit parce que nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement, elles sont alors imprécises (Bouchon Meunier, 1993). Ces deux types d'imperfections dans les connaissances sont souvent intimement mêlés.

Ainsi, le monde apparaît à la fois imprécis et incertain. Il est rare que deux éléments considérés comme semblables possèdent exactement les mêmes caractéristiques (deux frères jumeaux sont généralement différenciables), aussi, les limites des états de la nature ne sont pas toujours très nettes (passage jour / nuit).

La théorie du flou (*fuzzy theory*) est presque devenue une mode pendant les années 90. Beaucoup de chercheurs, dans différents domaines scientifiques utilisent la théorie formulée par le spécialiste ZADEH (1965), de l'université de BERKLEY (Californie) (ZADEH, 1971).

Cette théorie est très attractive parce qu'elle est basée sur le raisonnement intuitif et prend en compte la subjectivité et l'imprécision. Mais ce n'est pas une théorie imprécise, bien au contraire, c'est une théorie mathématique rigoureuse, adaptée au traitement de tout ce qui est subjectif et/ou incertain, et qui offre des solutions très intéressantes en particulier lorsqu'il s'agit de systèmes non linéaires, difficiles à modéliser.

Les questions qu'on pourrait se poser à propos de la logique floue (*fuzzy logic*) sont :

- ☛ *D'où vient l'idée de la logique floue ?*
- ☛ *La science s'appuie sur la notion de mesure, mais comment représenter les valeurs non mesurables ?*
- ☛ *Comment représenter ce qui est incertain ou subjectif ?*
- ☛ *Comment représenter les termes du langage humain ?*

Des applications en existent dans la plupart des domaines. Citons par exemple l'économie, la médecine, l'aide à la décision, la décision de groupe, la reconnaissance des formes, la classification des systèmes experts, les bases de données, la conception industrielle, ...etc. Les principaux domaines de recherche et d'application de la logique floue sont les suivants :

- >Terrain : Applications majeurs ...
- >Automatisation : Production d'acier et de fer, purification d'eau...
- >Instrumentation : Capteurs, instruments de mesure...
- >Traitement d'information : Base de données, recherches d'informations, modélisation de systèmes ...
- >Conception/jugement : Consultation, investissement et développement...

II.1.2- Historique

Les racines de la logique floue se trouvent dans le principe d'incertitude de HEISENBERG (Godjevac, 1999). Dans les années 20, les physiciens ont introduit la troisième valeur $\frac{1}{2}$ dans le système logique bivalent $\{0,1\}$. Pourquoi $\frac{1}{2}$? Parce que c'est la valeur de vérité de tous les paradoxes. La logique classique interdit tous les paradoxes par ses axiomes.

- Prenons un paradoxe connu, celui de RUSSEL. Il dit : « le barbier rase uniquement les hommes qui ne se rasent pas eux-mêmes et seulement ceux-ci .Qui rase donc le barbier ? ».
- Est-ce que le menteur de Crète ment s'il dit que tous les habitants de Crète sont des menteurs ? S'il ment il dit la vérité, s'il dit la vérité il ment. On peut tirer la même conclusion dans ces deux exemples :

Tous les paradoxes ont la même forme et la même valeur de vérité.

Au début des années 30 BLACK a appliqué la logique floue aux ensembles d'éléments ou de symboles (Glorennec, 1999). Il a appelé imprécision l'incertitude de ces ensembles, et a dessiné la première fonction d'appartenance (membership function) d'un ensemble flou.

En 1965 ZADEH a publié l'article 'fuzzy sets' dans lequel il a développé la théorie des ensembles flous et introduit le terme *fuzzy* dans la littérature technique et a déclaré qu'« un contrôleur électromécanique doté d'un raisonnement humain serait plus performant qu'un contrôleur classique » (Zadeh, 1965) (Kaufman, 1973).

C'est le début des tentatives de modélisation de systèmes par des relations floues. Les premiers résultats en commande floue ont été publiés par MAMDANI et ASSILIAN en 1975, ce qui a encouragé différentes activités en Europe (Bouchon Meunier, 1993).

Après 1980 les recherches s'arrêtent en Europe, mais les japonais les reprennent. Leur industrie a lancé de nombreux produits basés sur la logique floue (Godjevac, 1999). En Occident on a un esprit fort cartésien et le concept du flou viole un des fondements du raisonnement classique qui est le principe du tiers exclus d'Aristote.

⊕ Prémisse 1 : Socrate est un homme ;

- ⌘ Prémisse 2 : tous les hommes sont mortels ;
- ☞ Conclusion : Socrate est mortel.

Dans la théorie classique des ensembles, un objet appartient ou n'appartient pas à un ensemble. En logique floue, un objet peut appartenir à un ensemble et en même temps à son complément.

Cette violation du tiers exclus par la logique floue rend son acceptation difficile en occident, ce qui n'est pas le cas en orient, (Japon), où on accepte facilement qu'un objet soit 'blanc' et 'noir' en même temps, cela vient de leur patrimoine culturel et religieux. Grâce au chercheur japonais SUGENO, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue.

II.2- Notions d'ensembles et de sous ensembles

II.2.1- Notion d'ensembles classiques

Une des notions fondamentales dans les mathématiques est la notion d'ensemble. La théorie des ensembles a été créée par le mathématicien allemand CANTOR. Il a défini les ensembles comme une collection d'objets bien spécifiés et tous différents et qu'on pouvait les décrire de trois manières différentes :

- ① En donnant une liste de ses éléments : $E = \{a, b, c, d, e\}$;
- ② En donnant une propriété pour l'appartenance ;
- ③ En définissant la fonction caractéristique pour tous les éléments x de l'univers de discours U .

L'univers des discours est l'ensemble référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le contexte donné (BUHLER, 1993).

La fonction caractéristique de l'ensemble E est la suivante :

$\mu_E : U \rightarrow \{0,1\}$ est définie comme :

$$\mu_E = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in E \\ 0 & \text{si } x \notin E \end{cases}$$

Nous allons voir que dans la théorie des ensembles flous cette fonction s'appelle fonction d'appartenance (membership function).

II.2.2- Notions d'ensembles flous

Dans son article « Fuzzy sets » (1965) ZADEH, le fondateur des ensembles flous, commence par la collection d'objets. Il donne comme exemple 'la collection des nombres réels beaucoup plus grands que 1' (Godjevac, 1999).

Cet ensemble est défini de manière imprécise par rapport aux ensembles définis par CANTOR, et un ensemble flou peut très bien exprimer cette imprécision. D'après ZADEH un ensemble flou est une collection telle que l'appartenance d'un élément quelconque à cette collection peut prendre toutes les valeurs entre 0 et 1 (Zadeh, 1965).

C'est une extension de la théorie des ensembles classiques ou l'appartenance à un ensemble ne peut avoir que la valeur 0 (n'appartient pas) ou la valeur 1 (appartient).

II.2.3- Comparaison entre les ensembles classiques et les ensembles flous

Tableau II.1 : Comparaison entre ensembles classiques et ensembles flous

Un sous ensemble classique est défini par une fonction caractéristique $\mu_E(x)$ qui prend la valeur 0 pour les éléments de n'appartenant pas à E et la valeur 1 pour ceux qui appartiennent à E. $\mu_E(x) \rightarrow \{0,1\}$	Un ensemble flou E de U est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de E, le degré $\mu_E(x)$ compris entre 0 et 1 avec lequel x appartient à E . $\mu_E(x) : x \rightarrow [0,1]$
--	---

En résumé un ensemble flou est un ensemble dont la frontière n'est pas nette tel que l'on passe graduellement mais non brusquement de l'appartenance à la non appartenance. Donc, un ensemble flou E dans U est un ensemble de couples tel que :

$$E = \{x, \mu_E(x)\} \quad ; \quad \forall x \in U$$

La valeur d'appartenance est le degré de compatibilité d'un élément avec le concept qui est représenté par un ensemble flou.

II.2.4- Exemples

- 1) Soit un ensemble U tel que : $U = \{a, b, c, d, e, f\}$ et soit $A = \{b, d, e, f\}$
($A \subset U$)

$$A = \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ a & b & c & d & e & f \end{matrix}$$

- >La valeur 1 est attribuée aux éléments appartenant à A ;
- >La valeur 0 est attribuée aux éléments n'appartenant pas à A.

$\{0,1\}$ est l'ensemble d'évaluation (valuation set).

- 2) Maintenant prenons l'exemple de la vitesse d'un véhicule sur une route nationale.

La vitesse normale est de 90 Km/h. Une vitesse peut être considérée comme élevée au-dessus de 100 Km/h, et comme plus du tout élevée en dessous de 80 Km/h.

La logique booléenne envisagerait les choses de la manière suivante : (Figure II.1)

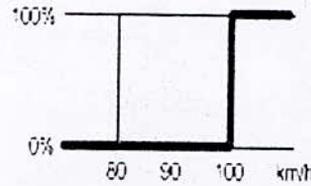


Figure II.1: Représentation de la logique booléenne

- La vitesse est considérée à 100% comme élevée à partir de 100 Km/h, et à 0% en dessous.

La logique floue, à l'inverse, permet des degrés de vérification de la condition « La vitesse est-elle élevée ? » (Figure II.2) :

- La vitesse est considérée comme pas du tout élevée en dessous de 80 Km/h. On peut donc dire qu'en dessous de 80 Km/h, la vitesse est élevée à 0%.
- La vitesse est considérée comme élevée au-dessus de 100 Km/h. La vitesse est donc élevée à 100% au-dessus de 100 Km/h.
- La vitesse est donc élevée à 50% à 90 Km/h, et à 25% à 85 Km/h.

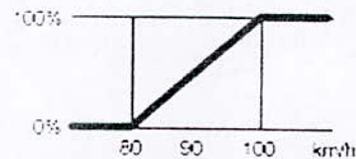


Figure II.2 : Représentation de la logique floue

De la même manière, la fonction « La vitesse est-elle peu élevée ? » sera évaluée de la manière suivante (Figure II.3) :

- La vitesse est considérée comme peu élevée en dessous de 80 Km/h. Elle est donc peu élevée à 100%.
- La vitesse est considérée comme pas du tout peu élevée au-dessus de 100 Km/h. Elle est donc peu élevée à 0%.
- La vitesse est donc peu élevée à 50% à 90km/h, et à 75% à 85 Km/h.

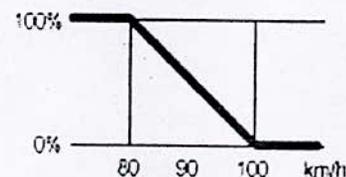


Figure II.3 : Evaluation de la vitesse

On peut également définir une fonction « La vitesse est-elle moyenne ? » (Figure II.4) :

- La vitesse est moyenne à 90 Km/h. À cette allure, la vitesse est moyenne à 100%.
- La vitesse n'est pas du tout moyenne en dessous de 80 Km/h et au-dessus de 100 Km/h. Hors de cet intervalle, la vitesse est moyenne à 0%.
- La vitesse est donc moyenne à 50% à 85 Km/h et 95 Km/h.

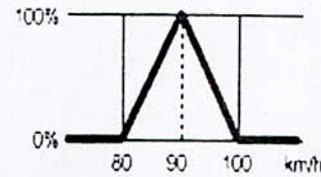


Figure II.4 : Vitesse moyenne

Il n'est pas obligatoire que la transition soit linéaire. Des transitions hyperboliques (comme une sigmoïde ou une tangente hyperbolique), exponentielle, gaussienne sont utilisables (Figure II.5).

II.3- Variable linguistique :

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans des termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel.

Chaque variable est caractérisée par un ensemble tel que :

$$\{x, T(x), U\}$$

ou :

- ▶ x est le nom de la variable ;
- ▶ $T(x)$ est l'ensemble de valeur que peut prendre x ;
- ▶ U est l'univers de discours associé à la valeur de base.

Exemple :

x : température ;
 $T(x)$: {froide, tiède, chaude} ;
 U : [-20°C, 40°C].

II.3.1- Fonctions d'appartenance

Nous avons vu précédemment que l'on peut donner un coefficient de confiance à l'affirmation 'x appartient à A', et on peut pour tout x définir ce coefficient directement à A.

Cette propriété se présente facilement par une fonction dite d'appartenance notée $\mu_A(x)$ à valeurs dans $[0,1]$, la notation signifie coefficient d'appartenance de x à l'ensemble caractérisé par A, l'argument x se rattache à la variable linguistique et l'indice A désigne l'ensemble concerné. Un fait certain aura une fonction d'appartenance égale à 1 pour le point de fonctionnement considéré. Un fait incertain aura une fonction d'appartenance inférieure ou égale à 1. Lorsque le fait certain correspond à l'énoncée de la valeur d'une variable $x=x_0$ on aura :

$\mu_A(x_0)=1$ pour $x=x_0$ et $\mu_A(x_0)=0$ pour $x \neq x_0$ on aura un singleton.

Un fait incertain tel que x à peu près égal à x_0 aura une fonction d'appartenance en forme de triangle. L'affirmation de x à peu près compris entre x_1 et x_2 correspond à une fonction trapézoïdale.

Ces fonctions peuvent avoir aussi d'autres formes :

- > Monotones (croissantes ou décroissantes) ;
- > En forme de cloche (Gaussiennes).

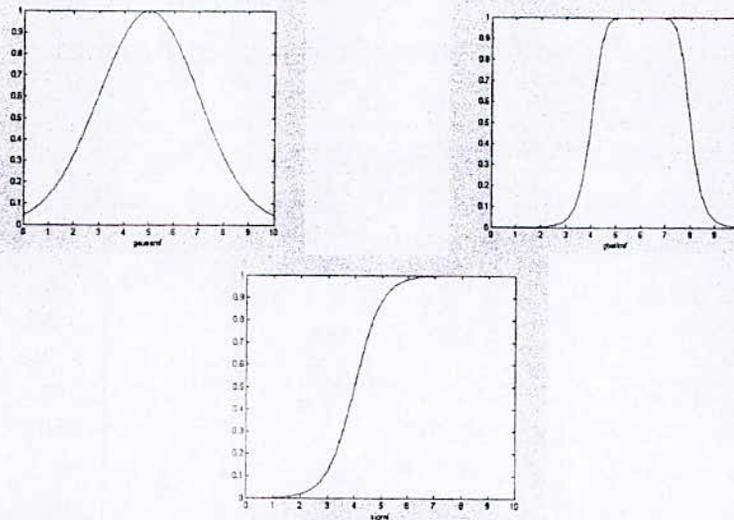


Figure II.5 : Quelques formes de fonctions d'appartenance

II.3.1.1-Notation

Un sous ensemble classique peut être noté comme suit :

$$A = \{(a, 0), (b, 1), (c, 1), (d, 0), (e, 1), (f, 0)\}$$

Et un sous ensemble flou par paires :

$$B = \{(a, 0.4), (b, 0.2), (c, 1), (d, 0.8), (e, 0.5), (f, 0.6)\}$$

La formule générale est dans ce cas :

$$A = \{x, \mu_A(x), x \in U\}$$

De même on utilise la notation suivante :

$$A = \frac{\mu_A(X_1)}{X_1} + \frac{\mu_A(X_2)}{X_2} + \dots + \frac{\mu_A(X_n)}{X_n} = \sum \frac{\mu_A(X_i)}{X_i}$$

II.4- Traitement d'un problème par la logique floue

La résolution d'un problème par la logique floue comprend trois étapes :

II.4.1- Première étape : quantification floue des entrées /sortie du système

Le concept de la logique floue vient de la constatation que la variable booléenne, qui ne peut prendre que deux valeurs (vrai ou faux) est mal adaptée à la représentation de la plupart des phénomènes courants.

La première étape du traitement d'un problème par la logique floue consiste à modéliser chacune des entrées du système par des courbes donnant les degrés d'appartenance à différents états identifiés pour ces entrées. Cette étape de quantification floue des variables d'entrée est aussi appelée *fuzzification*.

II.4.2- Deuxième étape : établissement des règles liant les sorties aux entrées

Après avoir fuzzifié les variables d'entrée et de sortie, il faut établir les règles liant les entrées aux sorties, en effet il ne faut pas perdre de vue le but final que nous poursuivons qui consiste à chaque instant, à analyser l'état ou la valeur des entrées du système pour déterminer l'état ou la valeur de toutes les sorties.

Prenons l'exemple simple d'une régulation de température dont le but est de commander la puissance de chauffe à partir de la température donnée par un thermomètre, on peut imaginer la règle simple suivante :

Si la température est très basse alors chauffer fort.

Dans la pratique les règles font appel à des conditions d'entrée plus complexes mettant en œuvre des conditions logiques du type OU, ET, NON.

II.4.3- Troisième étape : combinaison des règles liant les sorties aux entrées

Nous avons vu la fuzzification des entrées et des sorties, l'établissement des règles liant les entrées aux sorties. Il nous reste un dernier problème à résoudre, qui est la combinaison des règles appelée aussi *défuzzification*.

Composition des règles

Pour un état donné des entrées, plusieurs règles peuvent être validées simultanément et fournir des consignes différentes pour les sorties. Il faut donc disposer d'une méthode de composition des règles pour obtenir la valeur finale des sorties. La composition des règles qui sont validées au prorata de leur degré de validité.

Il existe au moins trois types de composition des règles :

- >La technique du maximum.
- >La technique de la moyenne pondérée.

>La technique du centre de gravité.

Technique du maximum

Elle consiste à ne considérer pour chaque sortie, que la règle présentant le maximum de validité. Cette règle, simple voir simpliste, ignore les règles secondaires qui peuvent néanmoins être importantes pour le fonctionnement et la stabilité du système, elle est peu employée.

Technique de la moyenne pondérée

Cette technique est plus évoluée, elle considère comme valeur de sortie, la moyenne des valeurs préconisées par chaque règle, pondérées par leurs degrés respectifs de validité.

Technique du centre de gravité

Cette technique est la plus performante : elle consiste à tracer sur un même diagramme, les différentes zones trapézoïdales correspondant à chacune des règles, et à calculer le centre de gravité de la zone consolidée.

II.4.4- Exemple

Considérons la fonction « Si la fièvre est forte, alors administrer de l'aspirine ». Une telle fonction est appelée *commande floue*. Elle est composée de deux parties :

- Une entrée : « La fièvre est-elle forte ? ». On considère qu'une fièvre n'est pas forte en dessous de 38°C, et qu'elle est forte au-dessus de 40°C.
- Une sortie : « Administrer de l'aspirine »

Ces deux parties sont liées. On peut les représenter ensemble comme sur la figure II.6.

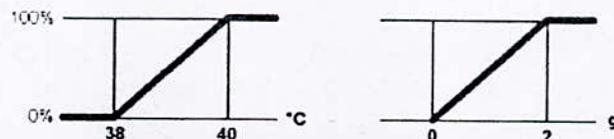


Figure II.6: Représentation des entrées et des sorties

Il existe plusieurs techniques pour déterminer la valeur de la sortie (dans l'exemple : la quantité d'aspirine à administrer) :

- La droite ayant la même ordonnée que le point de la courbe de départ ayant pour abscisse la valeur de l'entrée coupe la courbe de sortie. L'abscisse de ce point d'intersection est une valeur de sortie possible (Figure II.7).

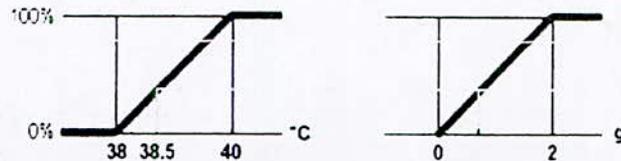


Figure II.7 : Détermination de la valeur de sortie

- La droite ayant la même ordonnée que le point de la courbe de départ ayant pour abscisse la valeur de l'entrée délimite un trapèze au niveau de la sortie. Le centre de gravité de ce trapèze est également une valeur de sortie possible (Figure II.8).

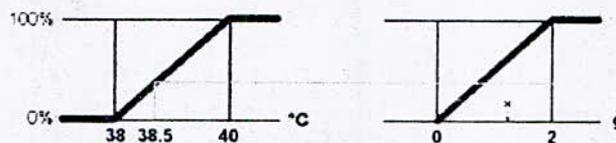


Figure II.8 : Méthode du centre de gravité

II.5- Combinaison de plusieurs entrées

Dans le cas d'une combinaison de plusieurs entrées (« Si le ciel est bleu et si j'ai le temps »), deux cas se présentent :

- Les entrées sont liées par une fonction logique « ET » : dans ce cas, on peut considérer comme première approche seulement l'entrée ayant le degré de vérification le plus faible. En fait il suffit de choisir un opérateur \top tel que $\top(x, y) \leq \min(x, y)$ où \top est appelée une t-norme. \min est la plus *optimiste* des t-normes.
- Les entrées sont liées par une fonction logique « OU » : dans ce cas, on peut considérer comme première approche seulement l'entrée ayant le degré de vérification le plus élevé. En fait il suffit de choisir un opérateur \perp tel que $\perp(x, y) \geq \max(x, y)$ où \perp est appelée une t-conorme. \max est la plus *pessimiste* des t-conormes.

Il est techniquement possible de représenter toutes les opérations binaires de bases en se basant sur la logique floue. En effet, à partir des opérateurs *ET*, *OU* et *NON* (*AND*, *OR*, *NOT*), on peut représenter les 8 opérations de base :

- *OU* (*OR*) : $A \text{ OR } B = \max(A, B)$;
- *ET* (*AND*) : $A \text{ AND } B = \min(A, B)$;
- *NON* (*NOT*) : $\text{NOT } A = 1 - A$;
- *XOR* : $A \text{ XOR } B = (A \text{ OR } B) \text{ AND NOT } (A \text{ AND } B) = A + B - 2 \times \min(A, B)$
- *NON-OU* (*NOR*) : $A \text{ NOR } B = 1 - \max(A, B)$;
- *NON-ET* (*NAND*) : $A \text{ NAND } B = 1 - \min(A, B)$;
- *NON-XOR* (*NXR*) : $A \text{ NXR } B = 1 + 2 \times \min(A, B) - (A + B)$;

- NON-ET (NAND) : $A \text{ NAND } B = 1 - \min(A, B)$;
- NON-XOR (NXR) : $A \text{ NXR } B = 1 + 2 \times \min(A, B) - (A + B)$.

Par ailleurs, la dimension décimale des variables de la logique floue permet d'effectuer des combinaisons non binaires :

- Le produit : $A.B$ ou $A \times B$ (équivalent en binaire à l'opération AND) ;
- L'addition : $A + B$ (équivalent en binaire à l'opération OR).

II.6- Modélisation par les systèmes flous (Modèle T.S.K)

On distingue classiquement deux grandes familles de systèmes flous: systèmes flous à conclusions symboliques (systèmes de Mamdani) (*Mamdani, 1974*) (*Mamdani, 1975*) (*Mamdani, 1976*) et systèmes flous à conclusion fonctionnelle (systèmes flous de Takagi-Sugeno-Kang) (*Takagi, 1983*) (*Takagi, 1985*) (*Sugeno, 1986*).

L'idée d'un auto ajustement des contrôleurs flous basé sur la minimisation d'un critère quadratique (travaux de Procyk et Mamdani) (*Procyk, 1979*) se concrétise avec l'apparition d'un nouveau type de contrôleurs flous: les contrôleurs flous de Takagi-Sugeno-Kang (T.S.K) (*Takagi, 1983*) (*Takagi, 1985*). De par leur structure, ceux-ci fournissent une expression analytique simple de la sortie générée en fonction des entrées considérées. Cette propriété permet alors d'utiliser des mécanismes d'optimisation numérique pour la synthèse de contrôleurs flous. Ainsi, Sugeno et Takagi (*Takagi, 1985*) voient la solution dans les algorithmes des moindres carrés alors que Bersini (*Bersini, 1993*) utilise une méthode de descente de gradient pour minimiser un critère quadratique.

Un modèle T.S.K est constitué d'une base de la forme :

Si (x_1 est A_1) Alors $y=f(x_1)$

Avec x_i : les entrées ;
 y : la sortie.

La modélisation des systèmes flous passe par trois étapes principales :

- L'identification de leur structure externe permet de déterminer les valeurs d'entrée et de sortie nécessaires et ou suffisantes à la modélisation.
- L'identification de leur structure interne basée sur des règles floues, cette étape permet l'identification des paramètres des sous ensembles flous par une méthode d'optimisation.
- L'approximation linguistique utilise des variables linguistiques, cette opération consiste à associer à tout ensemble flou une étiquette linguistique.

II.7- Conclusion

La logique floue a connue un intérêt important dans la communauté scientifique au cours des dernières années. Les opinions sur la logique floue sont divisés. Les ingénieurs traditionnels soutiennent que les méthodes classiques peuvent résoudre la majorité des problèmes rencontrés. De l'autre coté, nous pouvons trouver dans les publications actuelles des articles écrits par des scientifiques et même par des non-spécialistes, après avoir présenté des applications réussies se disent satisfaits et convaincus par les résultats obtenus.

III. Présentation de la région d'étude

III. Présentation de la région d'étude

III.1- Introduction

Le débit liquide et le débit solide sont les deux entités qui vont nous servir dans notre travail, afin d'établir la modélisation du transport solide, ces dernières sont mesurées au niveau d'un bassin versant. C'est pour cela, avant de présenter la région d'étude, on a jugé utile de présenter successivement ces deux entités.

III.1.1- Définition du débit liquide

Masse d'eau traversant une section donnée d'un cours d'eau par unité de temps.

III.1.2- La mesure des débits

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe quatre grandes catégories de méthodes.

- Les méthodes "**volumétriques**" (ou jaugeage capacitif) permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée. Cette méthode n'est généralement pratiquée que pour des débits très faibles, quelques l/s au plus.
- Les méthodes "**d'exploration du champ de vitesse**" consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée. Ces techniques nécessitent un matériel spécifique (moulinet, perche, saumon, courantomètre...) et un personnel formé à son utilisation. Parmi les nombreuses méthodes d'exploration du champ de vitesse, les jaugeages au moulinet.
- Les méthodes "**hydrauliques**" tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...). Ces méthodes obéissent aux lois de l'hydraulique.
- Les méthodes "**physico-chimiques**" prennent en compte les variations, lors de l'écoulement, de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous). Ces méthodes consistent généralement à injecter dans le cours d'eau un corps en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Ce sont les méthodes dites «par **dilution**» ou encore «**chimique**».

Toutes ces méthodes de mesures des débits nécessitent généralement un régime d'écoulement fluvial, sauf les jaugeages chimiques, qui sont appropriés en cas d'écoulement torrentiel.

III.1.2.1- Le jaugeage par exploration du champ de vitesse

Le débit Q [m^3/s] s'écoulant dans une section d'écoulement S [m^2] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation :

$$Q = V \cdot S.$$

La section d'écoulement peut être évaluée en relevant la profondeur d'eau en diverses verticales réparties régulièrement sur toute la largeur. Plusieurs méthodes permettent de déterminer la vitesse moyenne de l'eau, telles que le jaugeage au moulinet.

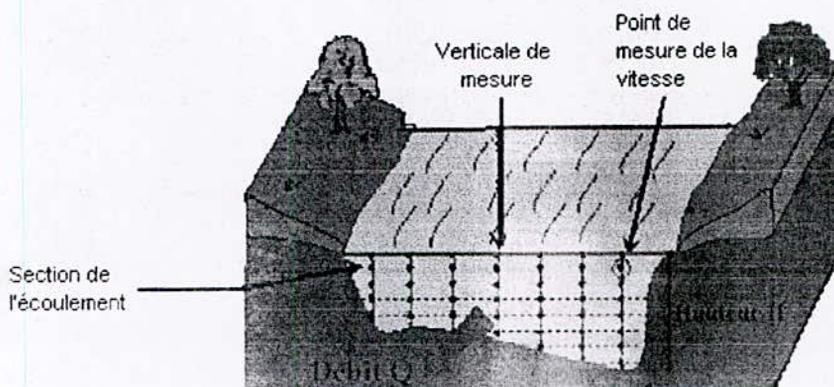


Figure III.1 : Débit et champs de vitesses.

III.1.2- Définition du débit solide

Définitions existantes :

- ◆ *Dictionnaire français d'hydrologie de surface* (M. Roche, 1989) : "Poids total des matériaux transportés par un cours d'eau, d'une manière ou d'une autre, passant à travers une section par unité de temps. Généralement exprimée en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;
- ◆ *Dictionnaire de l'eau* (AQTE, Québec, 1981) : " Masse des sédiments transportés par unité de temps à travers la section transversale d'un cours d'eau " ;
- ◆ *Glossaire international d'Hydrologie* (1992) : " Débit de matériaux transportés à travers une section donnée d'un cours d'eau " ;

Définition proposée : Masse des matières solides traversant une section donnée d'un cours d'eau par unité de temps.

III.1.3- Mesure du débit solide

En pratique, on mesure une concentration en Matières En Suspension (MES) qui correspond à la quantité de matériaux en suspension recueillie à

travers une membrane poreuse (la taille moyenne des pores est en général de $0,2 \mu\text{m}$). Elle s'exprime en Kilogrammes par litre d'eau brute.

Une large gamme d'options est aujourd'hui disponible pour mesurer la quantité de sédiments en suspension transportée par un cours d'eau. La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation de la charge solide en suspension consiste à procéder, comme pour la mesure du débit liquide, à une intégration de différentes concentrations et des vitesses sur plusieurs verticales. Cette technique nécessite un matériel de prélèvement adapté aux caractéristiques de la section de mesure. Le contrôle en continu de la charge solide est possible grâce aux programmes d'échantillonnages intensifs avec des pompes automatiques ou, de manière indirecte, avec l'installation de turbidimètres.

III.1.3.1- Matériel de prélèvements

Outre les prélèvements manuels réalisés dans des récipients généralement en polypropylène, il existe du matériel de prélèvements plus ou moins automatisé qui peut être classé en trois catégories principales :

- **Les préleveurs instantanés** : Ils sont constitués d'un récipient largement ouvert qui peut se refermer, de façon quasi instantanée, au moyen d'une commande appropriée.
- **Les préleveurs à pompe** : Un embout formé d'un tube métallique faiblement coudé, fixé sur un lest ou une perche, permet d'effectuer, à l'aide d'un tuyau flexible et d'une pompe, des prélèvements en divers points de la section de mesures.
- **Les préleveurs par intégration** : Ils prélèvent des échantillons durant un intervalle de temps suffisamment long pour atténuer les fluctuations de concentrations. Ils peuvent selon les modèles, fonctionner point par point ou par intégration le long d'une verticale. Dans ce dernier cas l'échantillon recueilli permet de mesurer la concentration moyenne pondérée par les débits sur toute une verticale. Le plus simple d'entre eux est constitué d'une bouteille à large col fixée à une perche. A travers le bouchon, passe un ajustage d'admission qui doit être dirigé face au courant tandis qu'un deuxième conduit, dirigé vers l'aval, permet à l'air de s'échapper. Des systèmes obéissant au même principe peuvent être installés sur des saumons de lestage.

III.1.3.2- Calcul du débit solide en suspension

En considérant la section S d'un cours d'eau de largeur L , chaque verticale V peut être définie par son abscisse l (distance à l'une des 2 rives), et sa profondeur totale P . Si en un point d'une verticale V , situé à la profondeur p , sont mesurées à la fois la vitesse du courant v et la concentration C_m de matériaux en suspension, le débit solide sur la surface ds de la section S s'écrit : $q_s = C_m * v * ds$. Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration :

$$Q_s = \iint_S q_s = \iint_S C_m * v * ds = \iint_S C_m * v * dldp \quad (III.1)$$

Avec : Q_s : débit solide du cours d'eau [kg/s] ;

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport : $C_m = Q_s / Q_L$, Q_L étant le débit liquide total sur la section S .

Cette méthode pour mesurer la quantité de sédiments transportée par un cours d'eau est évidemment très coûteuse. Les mesures sont donc généralement simplifiées. Elles sont surtout utiles pour valider les protocoles d'échantillonnages des réseaux de surveillance du transport en suspension.

III.1.3.2.1- Mesures en continu

L'échantillonnage en continu est en fait basé sur deux types de mesures :

- Une **mesure des matières en suspension** à l'aide de préleveur d'échantillon automatique réglé pour un certain pas de temps. Ce type d'instrument comprend un dispositif de programmation, une pompe, un tuyau d'aspiration et de transfert entre la crépine (au bout) et la série de flacons. Pour être significatifs, les prélèvements doivent être proportionnels au débit ou effectués à des intervalles de temps prédéterminés lorsque le débit est constant. Si le débit est variable, on peut coupler le préleveur à un débitmètre. Dans ce cas, le préleveur peut être programmé pour fonctionner selon un volume prédéterminé.
- Une **mesure de la turbidité** à l'aide de turbidimètres. La turbidité correspond à la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de particules en suspension. Elle se mesure en faisant passer un faisceau lumineux à travers l'échantillon à tester et en déterminant la lumière qui est diffusée par les particules en suspension. Cette mesure nécessite en générale un calibrage préalable. Les appareils de mesure de turbidité (turbidimètres) sont très nombreux sur le marché.

III.2- Cadre de l'étude

Toutes ces mesures ont été effectuées dans un bassin versant de l'Isser, car le bassin versant est l'unité fonctionnelle idéale pour évaluer l'érosion (Horton, 1945). C'est l'unité la plus utilisée, elle permet de quantifier les transferts de matière dans des limites d'écoulement naturelles et de les comparer entre plusieurs bassins. Le bassin versant est la surface drainée par un réseau hydrologique en amont d'un point (exutoire) par où transitent les produits issus de l'érosion.

Il est caractérisé par plusieurs paramètres, la superficie, le réseau de drainage, le climat, la topographie, la lithologie, l'occupation du sol.

- † La superficie : C'est l'espace compris entre les crêtes topographiques qui se rejoignent à l'exutoire ;

- + Le réseau de drainage : Représenté par les cours d'eau ;
- + Le climat : Caractérisé surtout par les précipitations ;
- + La topographie : Dénivelée, valeur des pentes, forme et régularité des versants ;
- + La lithologie : Nature et surface d'affleurement des différentes roches formant le substrat ;
- + L'occupation du sol : Nature et pourcentage des types de végétation.

Le bassin versant étudié est celui de l' Isser (code 09).

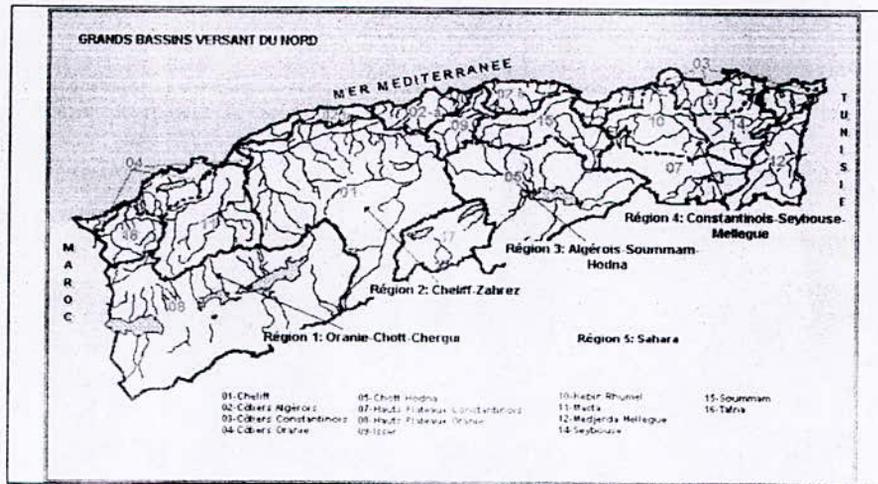


Figure III.2 : Grands bassins versants du nord Algérien

Ce bassin versant est situé à environ 70 Km au Sud Est d'Alger et draine une superficie de 4126 Km², et se situe entre les latitudes 35°90' et 36°85' Nord et les longitudes 2°88' et 3°95' (Figure III.3).

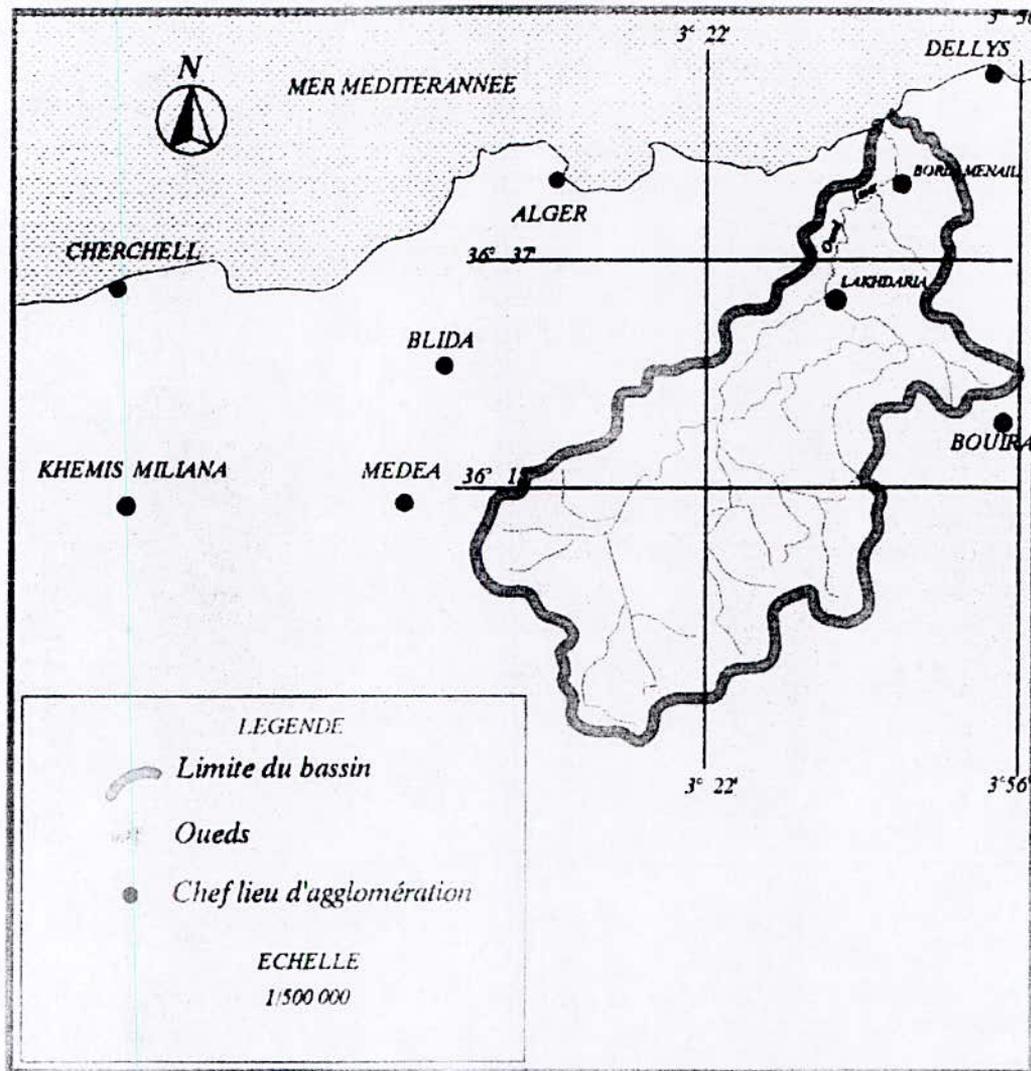


Figure III.3 : Situation géographique du Bassin versant de l'Isser.

La lithologie permet de connaître le degré d'érodabilité et d'exprimer l'effet des formations lithologiques sur le transport solide. Le bassin présente une lithologie d'une extrême sensibilité à l'érosion, car il est constitué en grande partie de formations marneuses et marno-calcaires (Figure III.5).

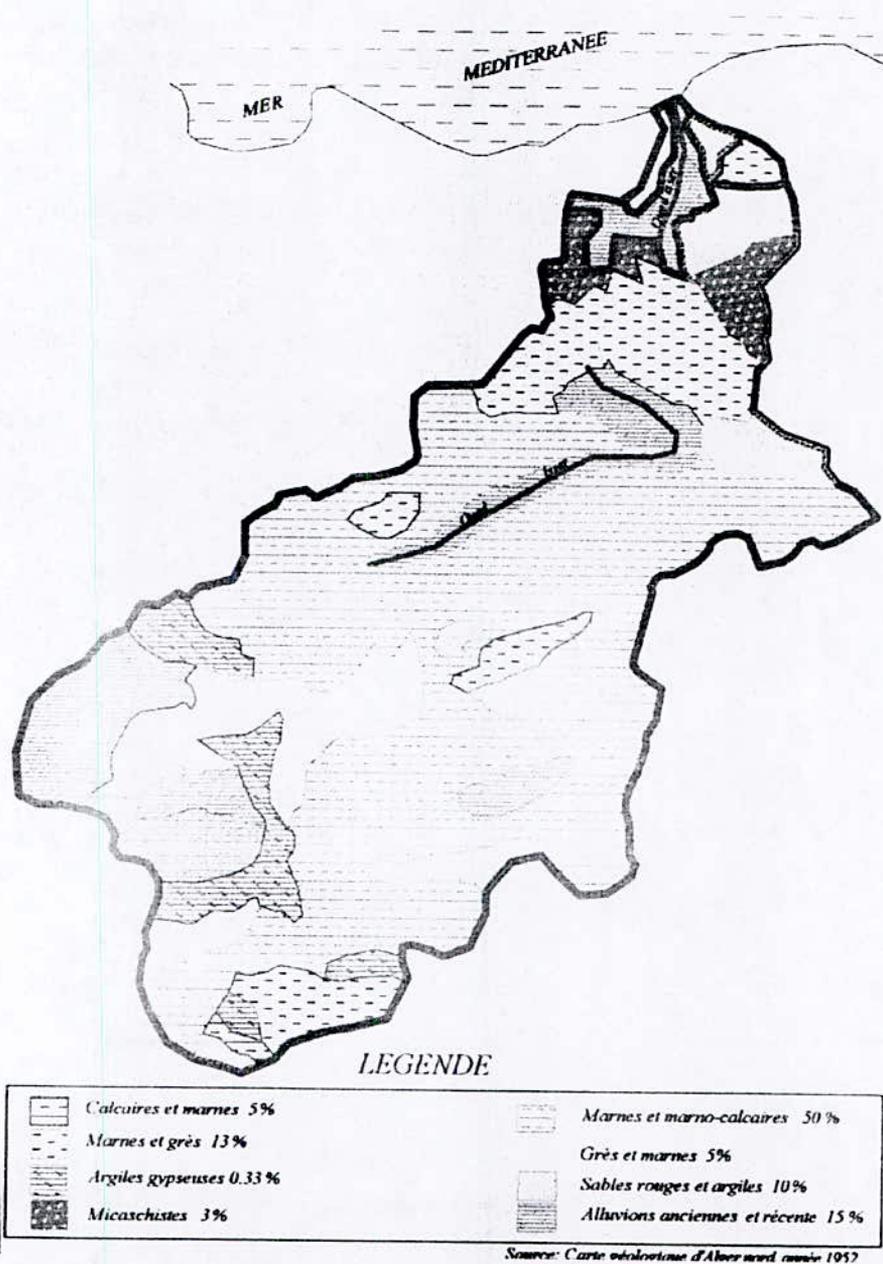


Figure III.5 : Lithologie du bassin versant de l'Isser.

En ce qui concerne le couvert végétal, le bassin est caractérisé par une faible densité végétale, il représente environ 20% de la superficie totale, ce qui accélère le phénomène de l'érosion (Figure III.6).

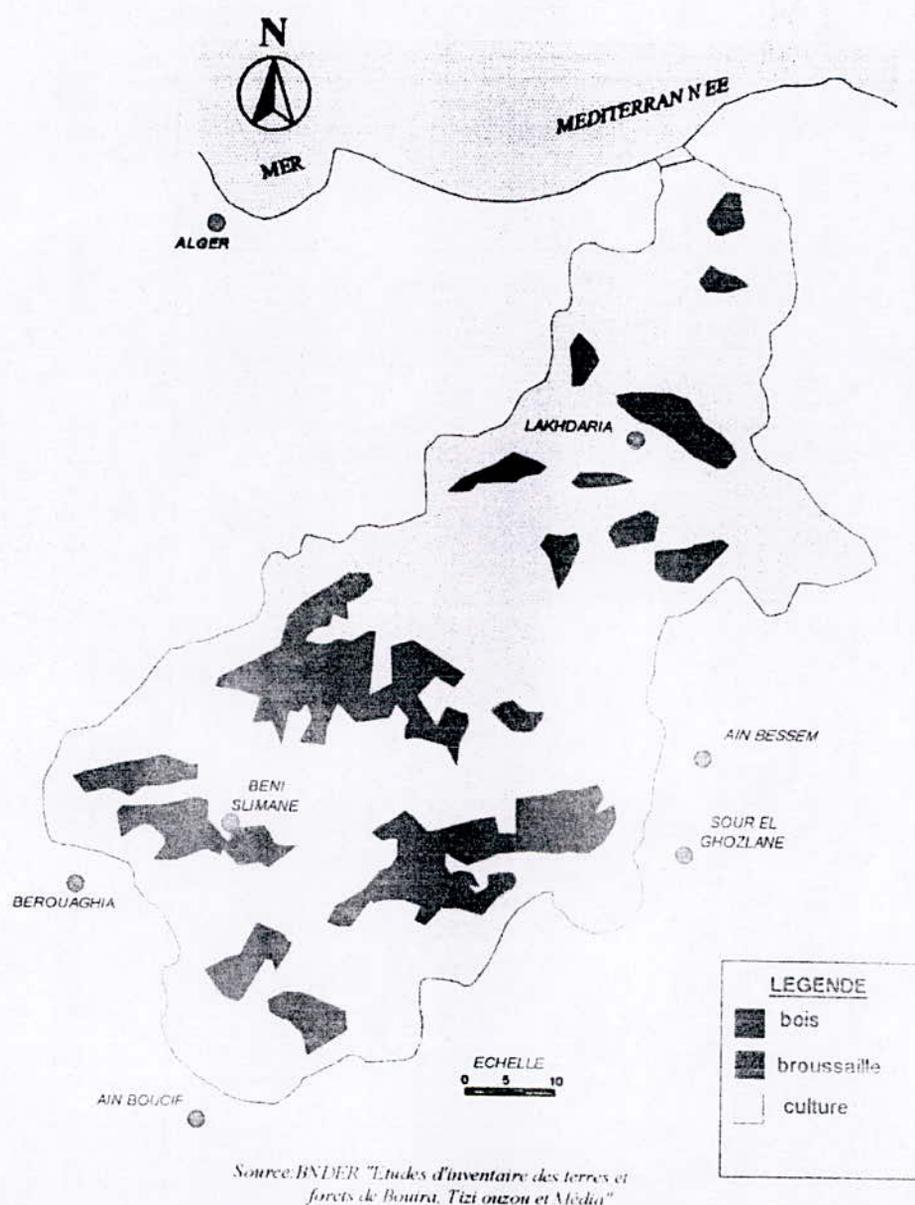


Figure III.6 : Couvert végétal de l'Isser

III.3- Base de données

Afin de modéliser la relation débit liquide / débit solide au bassin versant de l'Isser, une série de données composée de plusieurs paramètres a été utilisée. Cette série est essentiellement composée de débits instantanés s'étendant sur une période allant de 1971/1972 à 1996/1997. Cette série nous a été gracieusement fournie par l'ANRH.

Ces paramètres sont les suivants :

- + Débit liquide : Q_L (m^3/s) ;
- + Débit solide : Q_s (Kg/s) ;
- + Concentration des matières en suspension : C_s (Kg/l).

Sachant que : $Q_s = Q_L * C_s$.

IV. Modélisation du transport solide

IV- Modélisation du transport solide

IV.1- Définition de la modélisation

En littérature un modèle est défini comme suit : C'est ce qui doit servir d'objet d'imitation afin de reproduire quelque chose, ou bien : ce qui représente sous une forme concrète une classe ou une catégorie. Mais, en termes techniques on définit la modélisation comme la représentation formelle d'un phénomène quelconque afin de l'expliquer et de le comprendre.

La modélisation ouvre des espaces immenses à l'investigation de type scientifique, sans contraindre la représentation par un langage trop "fermé". Ce qui justifie l'utilisation de l'une des techniques de l'intelligence artificielle qui est la logique floue.

IV.2- Historique de la modélisation

Plusieurs travaux ont été effectués en Algérie dans le cadre de la modélisation du transport solide, et ont connus une grande évolution, on peut citer les travaux suivants :

IV.2.1- TIXERONT (1960)

Ses travaux se sont étendus sur l'étude de 32 bassins algériens ayant une superficie variant entre 90 Km² et 300 Km², et il en a conclu que :

- ▶ La nature des roches influe sur l'érosion ;
- ▶ La concentration en éléments fins augmente quand le ruissellement diminue ;
- ▶ La répartition saisonnière a son importance ;

TIXERONT (1960) a établie une relation pour le Nord de l'Algérie établissant une relation entre l'érosion spécifique et la lame d'eau écoulée, cette formule est présentée sous la forme suivante :

$$E = a * L^{0.15}$$

ou :

E : Erosion spécifique ;

L : Lamme d'eau écoulée ;

a : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol dans les différentes zones du bassin.

Et le débit solide est donné sous la forme suivante :

$$Q_s = \sum E_i * S_i$$

ou :

S_i : surface des différentes zones.

IV.2.2- CAPOLINI (1969)

Ses travaux consistent en l'étude des processus d'érosion dans le bassin versant du Cheliff d'après ses caractéristiques géomorphologiques. A son tour il en a conclu que :

- ▶ La quantification des débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit solide spécifique ;
- ▶ Une méthode de cartographie de la susceptibilité à l'érosion à partir du coefficient de torrentialité.

IV.2.3- DEMMAK (1982)

DEMMAK (1982) a défini une corrélation multiple incluant plusieurs paramètres physiques pour un bassin versant tellien, et a prédit aussi l'apport de sédiments, pour une période de 50 ans dans le barrage El Ibtissem de l'Oued Deurdeur.

IV.2.4- SOGREAH (1984)

Chez SOGREAH les chercheurs ont optés pour une recherche dans le sens d'une méthodologie de gestion et d'aménagement du périmètre du Cheliff.

IV.2.5- ARABI (1991)

Il a confirmé que le ruissellement joue un très grand rôle dans le transport solide, et il propose plusieurs solutions afin de contrer ce problème comme :

- ▶ Densifier le couvert végétal ;
- ▶ Travailler le sol chaque fois que c'est possible ;
- ▶ Favoriser l'infiltration.

IV.2.6- KOURI (1993)

KOURI (1993) a établi une relation entre l'ampleur de l'érosion et différents paramètres tels que la pente, et la morphologie du bassin.

IV.2.7- Projet RAB 80/011

Ce projet a été mené sous l'égide du PNUD, il vise à atténuer et freiner la dynamique érosive, ce projet consiste à adopter la méthodologie suivante :

- ▶ Quantification de l'érosion à partir de bassins versants expérimentaux ;
- ▶ Cartographie détaillée du bassin versant ;

- ▶ Extrapoler des résultats des bassins expérimentaux au bassin versant de l'Isser ;
- ▶ Modélisation mathématique du transport solide.

IV.2.8- Projet GTZ

Ce projet consiste en l'élaboration d'un modèle pour décrire l'écoulement et l'érosion des sols, et le combiner avec un système d'informations géographiques.

IV.2.9- REMINI (2003)

Il a effectué une série d'analyses statistiques sur différents échantillons afin d'évaluer le transport solide en suspension à l'exutoire du bassin versant du Cheliff.

IV.2.10- TOUAIBIA (2005)

TOUAIBIA (2005) a présenté lors du 'Congrès International de l'Eau pour le Développement Durable dans le Bassin Méditerranéen' une approche par une méthode de régression afin de comprendre le comportement du débit solide en fonction du débit liquide, et la tendance que peut prendre cette relation.

IV.3- Modélisation de la relation débit liquide - débit solide

Dans le présent travail deux approches afin de modéliser, ont été effectuées, dans un premier temps une approche par des modèles régressifs a été tenté, et dans un deuxième temps une approche par l'une des techniques de l'intelligence artificielle qui est la logique floue a été utilisée par soucis d'améliorer les résultats obtenus par les modèles régressifs. Afin de valider et commenter la fiabilité et l'efficacité de ces modèles, des critères de validation ont été utilisés.

IV.3.1- Critères de validation

1. Critère de Nash Sutcliff :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\ mod} - Y_{i\ obs})^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\ mod} - \bar{Y}_{obs})^2}$$

Où :

$Y_{i\ mod}$: Est la variable simulée ;

Y_{obs} : Est la variable observée ;

\bar{Y}_{obs} : Est la moyenne des observations ;

n_{obs} : Le nombre d'observations.

Ce critère quantifie la fraction de la variance observée qui est prise en compte par le modèle. Il prend des valeurs allant de $-\infty$ à 1 ; plus l'efficacité est proche de 1, meilleure est l'accord entre la modélisation et l'observation.

2. L'erreur quadratique moyenne :

Ce critère est utilisé pour calculer l'écart entre les valeurs simulées et celles observées ; il s'exprime par :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left(\frac{1}{n_{\text{obs}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{obs}}} (Y_{i\text{mod}} - Y_{i\text{obs}})^2 \right)}$$

Il donne une idée sur la dispersion entre les valeurs observées et simulées, plus le critère RMSE sera faible plus l'écart entre les valeurs sera limité.

De même que pour le critère de Nash Sutcliff, le critère RMSE a tendance à donner plus de poids aux valeurs fortes et peut être appliqué sur le logarithme ou la racine carrée des valeurs afin d'améliorer la représentation des valeurs faibles.

3. Le coefficient de corrélation :

Il s'exprime par :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}}) \times (Y_{i\text{mod}} - \bar{Y}_{\text{mod}}))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{mod}} - \bar{Y}_{\text{mod}})^2}}$$

4. Le coefficient de détermination :

Il est exprimé par R^2 , il représente le taux de corrélation entre les séries simulées et observées, il faut donc chercher à le maximiser afin de vérifier l'accord entre les deux séries.

5. La moyenne biaisée :

$$B = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{mod}} - Y_{i\text{obs}})$$

La moyenne biaisée permet de mesurer la tendance que le modèle a de sous-estimer ou de surestimer les observations.

En plus de ces critères numériques permettant l'estimation et la quantification de la distance entre les observations et les simulations, deux

autres tests ont été usités, ils consistent en une simple analyse visuelle des résultats sur deux graphes ($Y_{MOD} = f(Y_{OBS})$), et un deuxième graphe montrant le degré de confusion entre les valeurs observées et simulées.

IV.3.2- Modélisation par les modèles régressifs

Tout d'abord cinq modèles classiques ont été utilisés, ceux-ci ont pour but d'expliquer comment varie la relation entre le débit solide et le débit liquide, et sont traduits par des courbes de tendance. Ces modèles sont les suivants :

- Relation linéaire ;
- Relation polynomiale ;
- Relation logarithmique ;
- Variation en modèle puissance ;
- Variation exponentielle.

Ces modèles montrent l'orientation commune de la série de couples débit liquide - débit solide. La tendance obtenue peut être exprimée mathématiquement sous forme d'équation.

IV.3.3- Modélisation de la relation flux liquide/ flux solide par la logique floue

Les modèles débit liquide/débit solide sont utilisés pour décrire le comportement hydrologique d'un bassin versant. De nombreux modèles existent pour simuler les processus physiques déterminant la quantité de matières en suspension résultant d'un débit liquide.

Certains d'entre eux sont basés sur des concepts simples et aisément transposables, tandis que d'autres s'appuient sur des approches physiques et mathématiques très sophistiquées qui nécessitent beaucoup d'efforts au niveau de la prise en compte et du traitement des données.

IV.3.3.1- Principe de fonctionnement du modèle flou

L'éditeur du système flou manipule les entrées et les sorties pour le système, Combien y a-t-il de variables d'entrée? Quel est leur nom? Quelles sont les sorties ?...

La règle générale de ce modèle est :

Si $x=A$ alors $y=B$

L'éditeur de règles définit les caractéristiques floues liant les différentes valeurs du flux liquide et le flux solide, et ceci est exprimé comme suit :

- © Si (le débit liquide est faible) Alors (le débit solide est faible) ;
- © Si (le débit liquide est moyen) Alors (le débit solide est moyen) ;
- © Si (le débit liquide est extrême) Alors (le débit solide est extrême).

L'éditeur des fonctions d'appartenance définit la forme de la fonction d'appartenance, de manière à définir le degré d'appartenance d'une valeur à un état donné. A l'entrée du système flou, les fonctions d'appartenance sont gaussiennes.

La méthode T.S.K, manipule les variables de sortie, c'est à dire, le modèle T.S.K permet le passage aisé d'une expression symbolique à sa traduction numérique.

V. Résultats de la modélisation

V- Résultats de la modélisation

V.1- Modélisation de la relation débit liquide / débit solide :

Comme cela a été spécifié précédemment deux approches ont été tentées en vue de la modélisation de la relation débit liquide – débit solide, ces approches ont été effectuées à différentes échelles temporelles, ces échelles sont représentées comme suit :

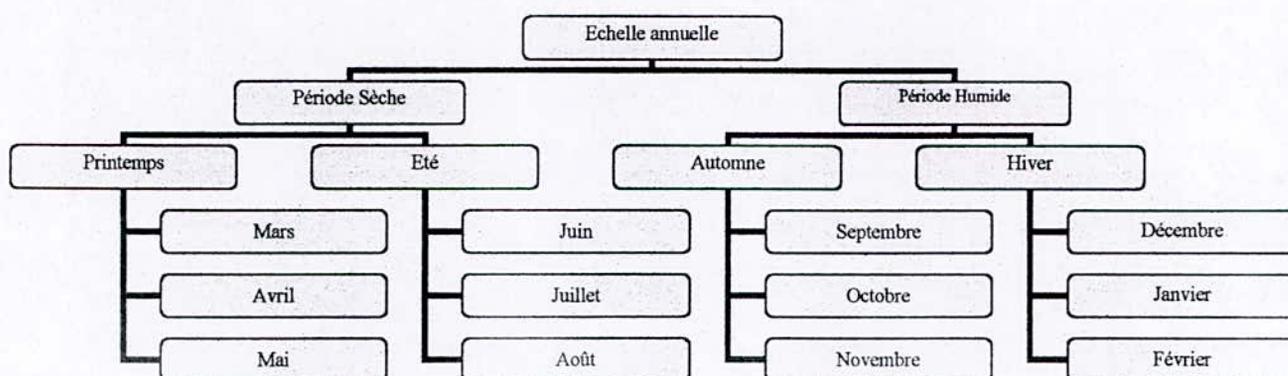


Figure V.1 : Les différentes échelles temporelles.

V.1.1- Modélisation par les modèles régressifs

V.1.1.1- Modélisation à l'échelle annuelle

La modélisation à l'échelle annuelle a donné les résultats suivants :

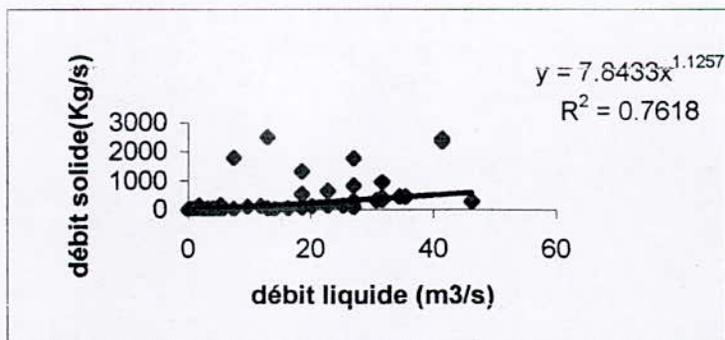


Figure V.2 : Relation débit liquide instantané – débit solide instantané à l'échelle annuelle

La meilleure corrélation est celle obtenue grâce au modèle puissance.

V.1.1.2- Modélisation en période sèche et période humide

Changeons maintenant d'échelle temporelle, et étudions deux périodes : période sèche et période humide.

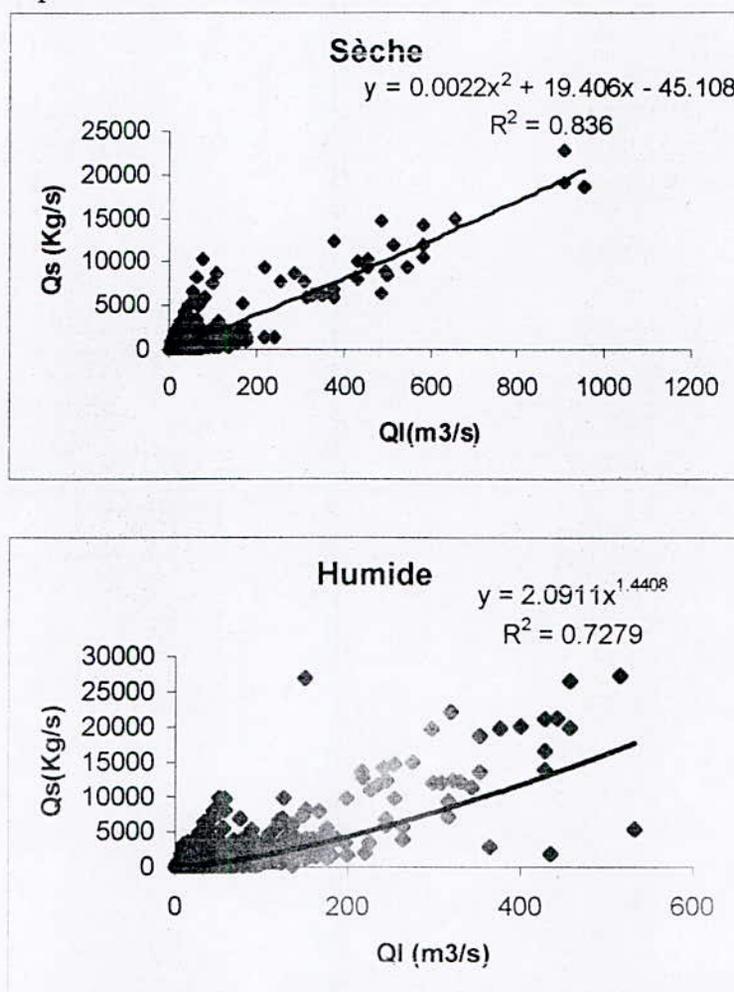


Figure V.3 : Relation débit liquide instantané - débit solide instantané en période sèche et période humide

Commentaire : Pour la période sèche la meilleure corrélation est obtenue par une relation polynomiale, cependant pour la période humide la meilleur corrélation a été obtenue par une relation puissance.

V.1.1.3- Modélisation à l'échelle saisonnière

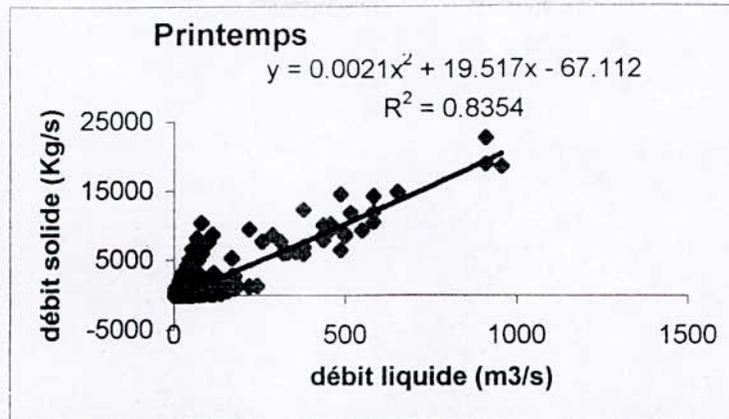


Figure V.4 : Relation débit liquide instantané- débit solide au printemps instantané

Commentaire : Le meilleur R^2 est celui obtenu avec une relation polynomiale suivi de près de la relation linéaire, c'est-à-dire que ces deux modèles représentent le mieux la relation liant le débit liquide au débit solide au printemps.

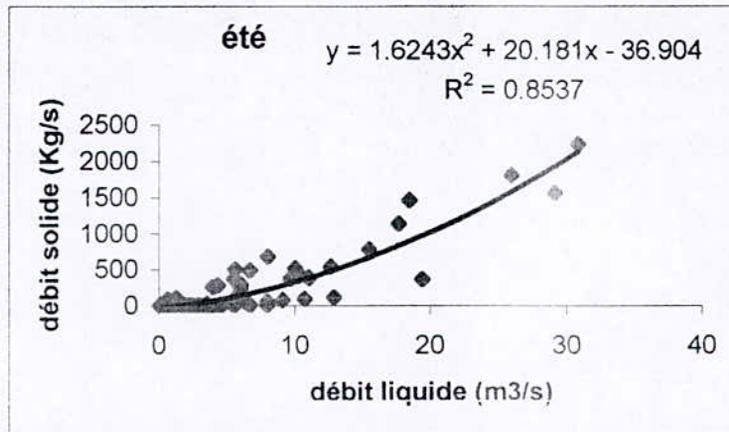


Figure V.5 : Relation débit liquide instantané - débit solide instantané en été

Commentaire : comme la saison précédente le meilleur R^2 est celui obtenu grâce au modèle polynomiale.

Autre saison l'automne :

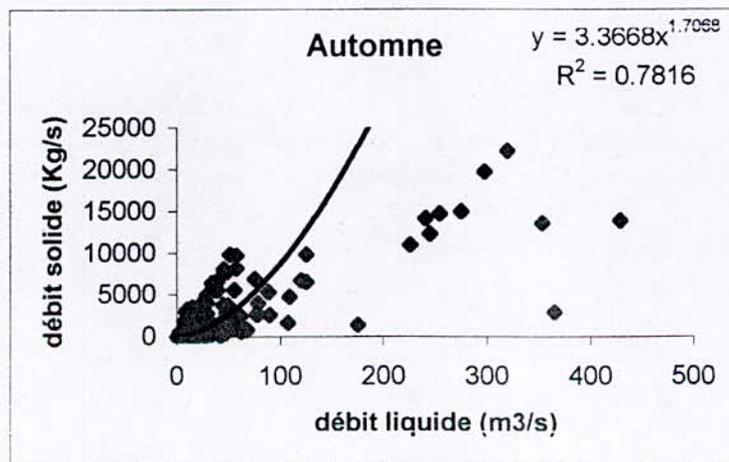


Figure V.6 : Relation débit liquide instantané - débit solide instantané en automne

Commentaire : Contrairement aux deux cas précédents, la meilleure corrélation est donnée par le modèle puissance.

Enfin étudions le cas de l'hiver.

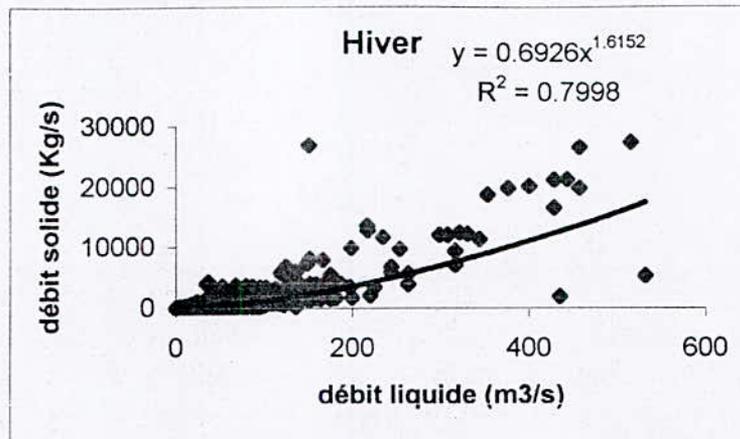


Figure V.7 : Relation débit liquide instantané – débit solide instantané en hiver

Commentaire : Même remarque que celle faite pour la saison précédente. En l'occurrence la meilleure corrélation est obtenue par le modèle puissance.

IV.1.1.4- Modélisation à l'échelle mensuelle

L'application de cette modélisation a été faite pour la totalité des mois de l'année, cependant pour illustrer les résultats obtenus, on a pris comme exemple le mois de Janvier.

A l'échelle mensuelle les résultats sont les suivants :

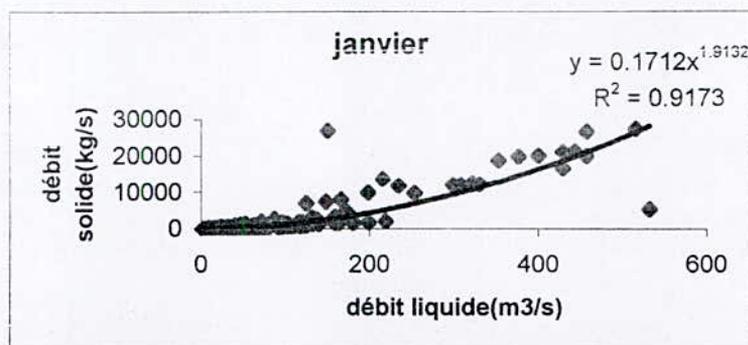


Figure V.8 : Relation débit liquide instantané – débit solide instantané à l'échelle mensuelle

IV.1.1.5- Discussion des résultats

Les résultats obtenus sont très significatifs car le coefficient de détermination varie de 0.72 à 0.92, ces modèles nous donnent une idée sur la variation du débit solide en fonction du débit liquide en différentes périodes de l'année.

Tout d'abord, nous remarquons qu'à l'échelle mensuelle il est plus facile d'étudier la relation débit liquide – débit solide que de l'étudier à l'échelle annuelle, vu la différence entre les coefficients de détermination, ce fait démontre que ces modèles sont limités quant à la modélisation à différentes échelles.

D'autre part, l'étude de la variation du débit solide en fonction du débit liquide à échelle saisonnière et en période sèche et humide met en évidence l'irrégularité du climat et ses conséquences sur le transport solide. En effet, en périodes humides les apports liquides sont irréguliers, contrairement aux périodes sèches où les apports ne sont pas très importants, donc il n'y a pas de grandes variations, ce qui explique le fait que les coefficients de détermination des périodes sèches sont plus importants que ceux des périodes humides.

En plus de cette étude, un programme informatique a été conçu afin de tester ces différents modèles, et les résultats obtenus sont les suivants :

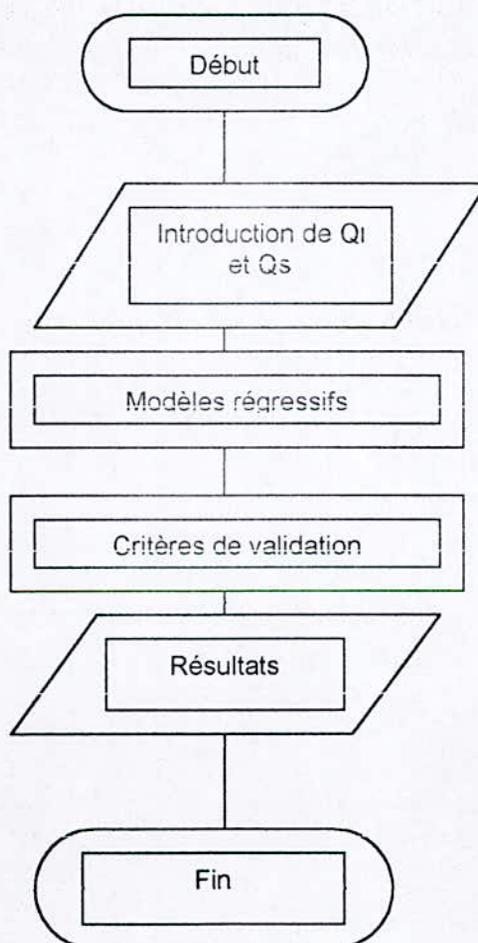


Figure V.9 : Organigramme pour les modèles régressifs.

Afin d'apprécier l'efficacité de ces modèles, d'autres critères de validation ont été appliqués et les résultats obtenus sont donnés dans le tableau **V.1**.

Tableau V.1 : Résultats de la totalité des critères.

Echelle	Nash (%)	RMSE (Kg/s)	B (Kg/s)	R	R ²	Modèle retenu
Humide	-160.3	287.92	41.40	0.8531	0.7279	$Q_s = 2.0911 * Q_l^{1.4408}$
Sèche	83.97	127.23	128.91	0.9143	0.8360	$Q_s = 0.0022Q_l^2 + 19.406Q_l - 45.1$
Automne	78.71	147.00	128.91	0.8898	0.7916	$Q_s = 0.6926 * Q_l^{1.61}$
Hiver	50.09	126.09	14.90	0.8943	0.7998	$Q_s = 0.0021Q_l^2 + 19.517Q_l - 67.1$
Printemps	88.86	306.97	97.39	0.9140	0.8354	$Q_s = 1.6243Q_l^2 + 20.181Q_l - 36.1$
Eté	82.06	297.00	540.36	0.9129	0.8500	$Q_s = 3.3668 * Q_l^{1.7068}$
Annuelle	-20.65	540.32	231.55	0.8728	0.7618	$Q_s = 7.8433 * Q_l^{1.1257}$
Mensuelle (Janvier)	79.35	110.33	80.32	0.9577	0.9173	$Q_s = 0.1715 * Q_l^{1.9132}$

De ce tableau nous remarquons que certaines valeurs des tests effectués ne sont pas vraiment convaincantes. En effet, ces modèles surestiment les valeurs simulées par rapport aux valeurs observées, avec des écarts assez importants.

IV.1.1.6- Conclusion

Ces modèles régressifs, fournissent une idée sur la variation du débit solide en fonction du débit liquide, et la tendance que peut prendre cette variation.

Cependant, après avoir soumis ces modèles à certains critères de validation, il a été démontré que ces derniers surestimaient les valeurs simulées par rapport aux valeurs observées, ce qui veut dire que ces modèles ne sont pas fiables au point de les utiliser pour la prévision et surtout pour quantifier correctement les apports solides. Ajouté à cela le fait que ces modèles donnent plutôt de meilleurs résultats en période sèche qu'en période humide, ceci représente une limite d'utilisation de ces modèles étant donné que la période qui nous intéresse est la période humide vu l'importance du phénomène du transport des matières en suspension lors de cette période, ou plus généralement le fait que ces modèles donnent de meilleurs résultats à certaines échelles plutôt qu'à d'autres définies les limites de ce type d'approche.

V.1.2- Modélisation par la logique floue

Par soucis d'améliorer les résultats obtenus précédemment, on se propose d'utiliser une des techniques de l'intelligence artificielle qui est la logique floue.

V.1.2.1- Structure utilisée

Il s'agit d'un système flou du type Takagi-Sugeno-Kang. Le système flou utilise des fonctions d'appartenance Gaussiennes. Ce choix pour les fonctions d'appartenance a été motivé par la simplicité d'implémentation.

L'algorithme principal est divisé en trois algorithmes correspondants à trois étapes différentes :

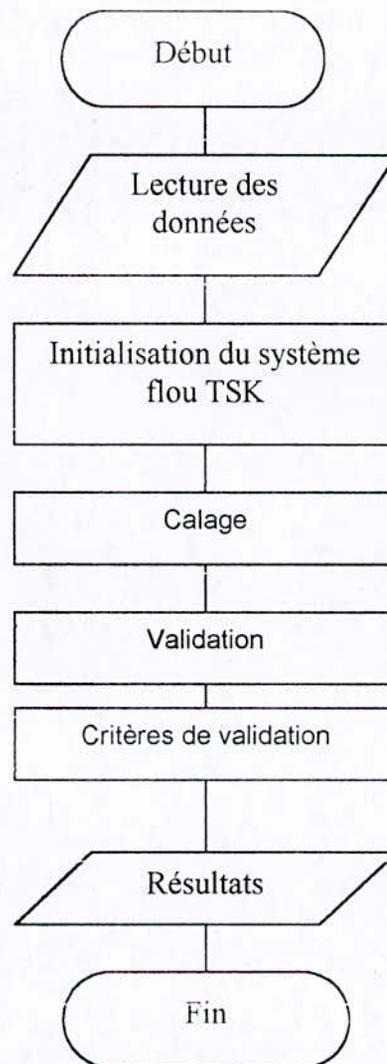


Figure V.10 : Organigramme pour la modélisation par la logique floue.

© Algorithme d'apprentissage

Après avoir lu le fichier de données qui est composé d'une série de couples (Q_i, Q_s) , à son tour cet algorithme comprend les étapes suivantes :

- + Initialisation du système flou (T.S.K) ;
- + Initialisation des fonctions d'appartenance (fonctions Gaussiennes)
- + Traitement du problème par la logique floue ;

© Algorithme de calage

Avant d'extraire les résultats, la série de données est subdivisée en deux parties, en suite le calcul passe par une étape appelée étape de calage. Celle ci consiste à analyser une partie des données, et à les ajuster.

⊙ *Algorithme de validation*

Après avoir caler le modèle, la deuxième partie de la série de données va servir de référence, c'est-à-dire que le modèle va comparer les résultats obtenus avec une série de données inconnues. En suite, pour pouvoir juger de la fiabilité du modèle, les résultats obtenus vont subir les critères de validation précédemment cités (voir § **IV.3**).

V.1.2.2- Etude de la relation flux liquide – flux solide

La même démarche a été appliquée un système flou de type T S K. Pour avoir des résultats optimaux, une variation des tailles de calage et de validation a été effectuée, les résultats obtenus sont les suivants :

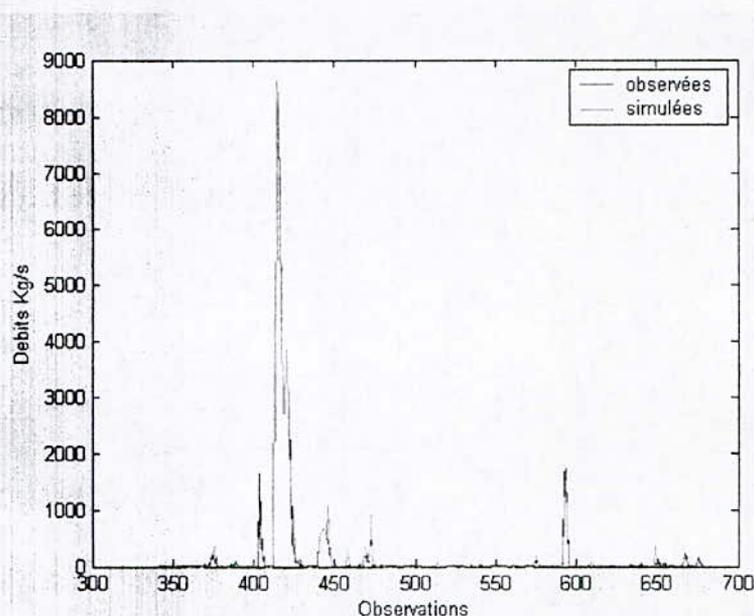


Figure V.11 : Modélisation de la relation Q_l/Q_s en hiver par la logique floue.

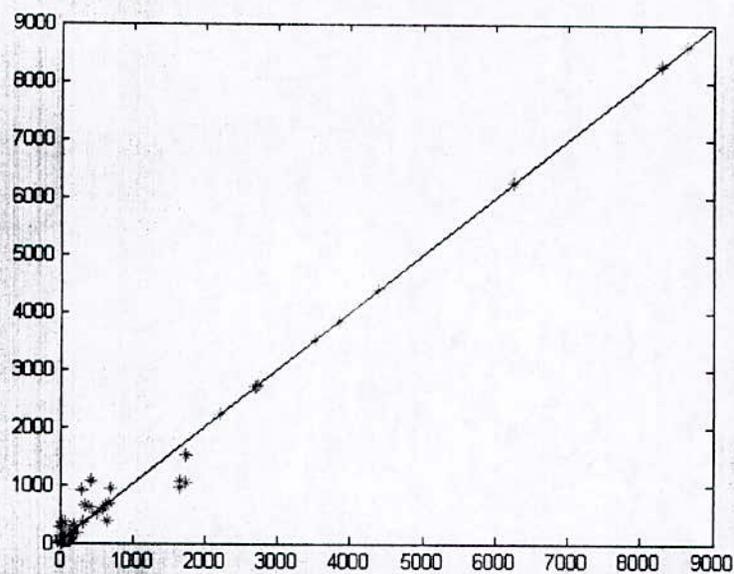


Figure V.12 : Corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs observées. (Hiver)

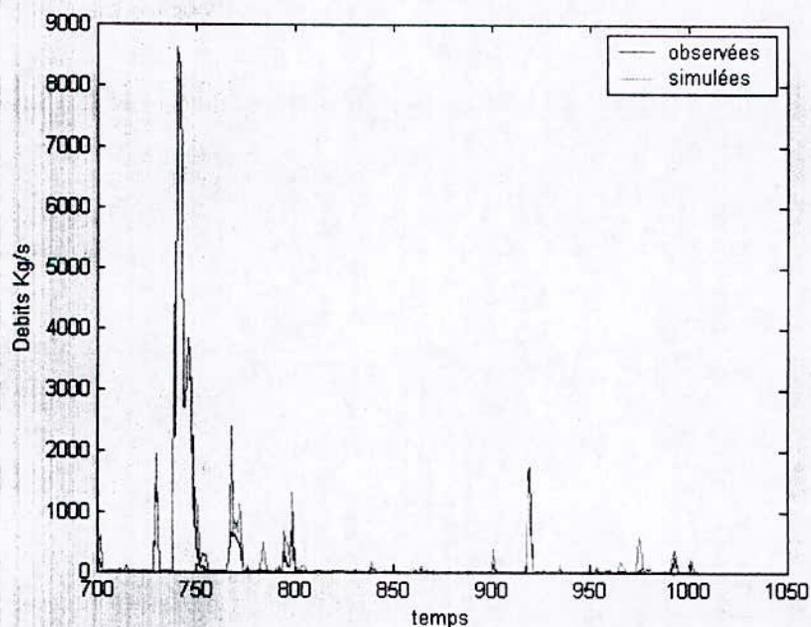


Figure V.13 : modélisation de la relation $Q1/Qs$ en période humide par la logique floue.

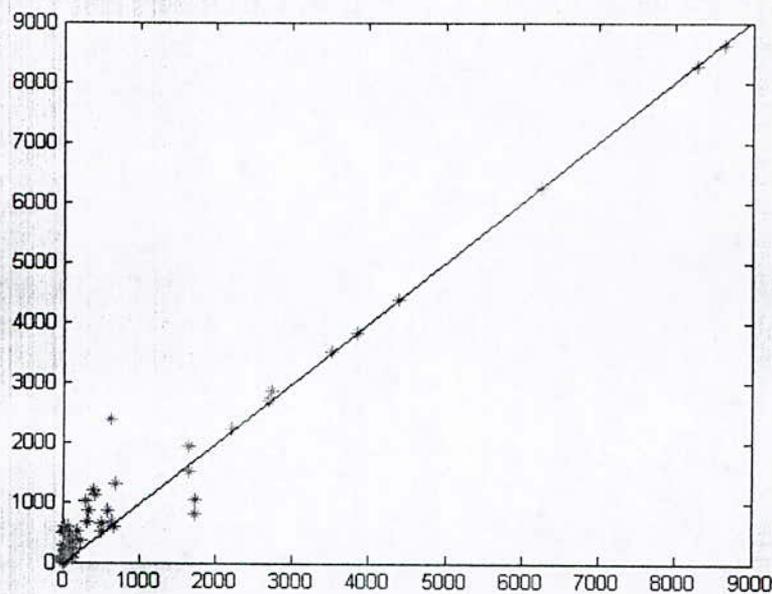


Figure V.14 : Corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs observées.
(Période humide)

V.1.2.3- Résultats obtenus

Tableau V.2 : totalité des résultats obtenus

Echelle	Nash (%)	RMSE (Kg/s)	R ²	R	B
Hiver	98.92	90.46	0.9905	0.9952	5.14
Printemps	95.37	100.23	0.9741	0.9870	6.62
Été	99.95	88.54	0.9998	0.9999	4.94
Automne	96.90	95.46	0.9754	0.9876	5.90
Période sèche	94.59	106.33	0.9500	0.9747	7.06
Période humide	96.60	95.61	0.9621	0.9809	5.01
Interannuelle	97.35	93.65	0.9698	0.9848	6.03
Mensuelle (Janvier)	97.85	93.02	0.9874	0.9937	5.92

V.1.2.4- Discussion des résultats

A partir de ce tableau on remarque que le modèle flou du type T.S.K donne d'excellents résultats. En effet, les valeurs modélisées ne sont pas sous estimées ou bien surestimées par rapport aux valeurs observées, de plus les écarts entre les séries observées et les séries modélisées ne sont pas très importants.

V.1.2.5- Conclusion

La théorie des ensembles flous a permis de modéliser une relation assez complexe qui est la relation liant le débit solide au débit liquide. Grâce à la

modélisation par la logique floue tous les critères quadratiques ont été minimisés et les résultats modélisés ont été très proches de la réalité c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu de grands écarts entre les valeurs observées et les valeurs modélisées.

V.2- Etude comparative

Afin d'expliciter la différence de résultats obtenus par les deux modèles précédents, ces derniers sont mis sous forme graphique.

Prenons par exemple l'hiver :

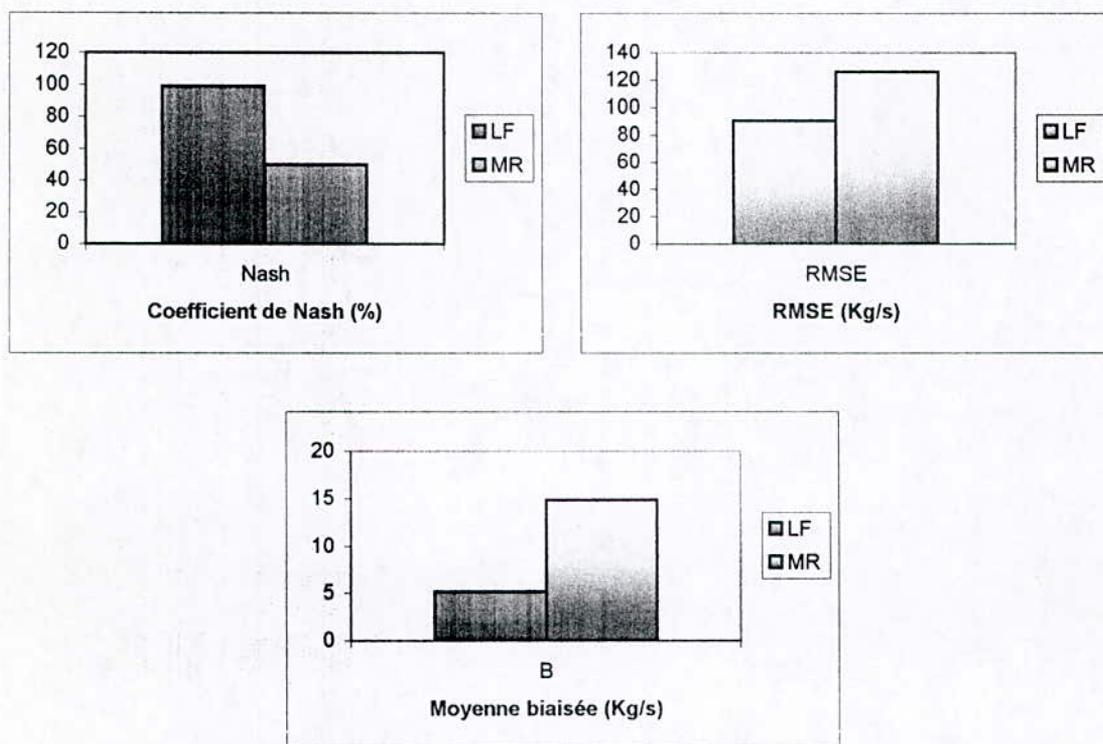


Figure V.15 : Comparaison entre les résultats par la logique floue et ceux obtenus par les modèles régressifs.

V.2.1- Conclusion

On remarque que le critère de Nash pour le modèle floue est plus élevé que celui obtenu par les modèles régressifs, cela signifie que le modèle floue est parvenu au meilleur accord entre la série observée et la série modélisée.

En ce qui concerne l'erreur quadratique moyenne, on remarque que le modèle floue minimise l'écart entre les valeurs observées et les valeurs simulées.

En utilisant la moyenne biaisée comme critère de validation ceci nous a permis de constater que les modèles régressifs avaient tendance à surestimer ce qui a été modélisé par rapport à ce qui a été observé.

V.3- Conclusion générale

Après avoir étudié la relation liant le débit liquide au débit solide par deux approches différentes en premier temps et ensuite comparer ces deux méthodologies il a été constaté que la logique floue a permis l'élaboration d'un modèle liant le flux solide au flux liquide en obtenant d'excellents résultats (critères de validation), contrairement aux modèles régressifs.

Conclusion générale

Conclusion générale

De part l'irrégularité des apports en eau, un autre phénomène participe activement dans la baisse des ressources hydriques en Algérie, ce phénomène est connu sous le nom de transport solide.

En effet, en Algérie on s'appuie sur une méthode nous permettant d'accroître les ressources en eau, celle-ci est la construction de barrages.

Cependant ces derniers souffrent à leur tour du problème cité précédemment qui est le transport de particules solides et leur dépôt au niveau de ces barrages, affectant ainsi leur capacité de stockage et leur durée de vie.

Outre cette conséquence, le transport de sédiments peut provoquer d'autres dégâts tels que l'obstruction de certains réseaux, ou bien le déplacement de certaines matières polluantes dégradant par ce fait sa qualité. Et c'est dans cet optique que s'inscrit ce projet de fin d'études.

Le but de travail a été d'élaborer une méthodologie pouvant servir à modéliser la relation entre le débit liquide et le débit solide au niveau du bassin versant de l'Isser.

Dans un premier temps, une approche par des modèles régressifs a été réalisée, cependant les résultats obtenus par ces modèles sont relativement moyens, du point de vue écart obtenu entre les séries observées et les séries modélisées.

Par suite, une méthodologie portant sur une nouvelle approche entrant dans le contexte de l'intelligence artificielle a été mise au point, se basant sur l'intégration et l'implémentation du raisonnement humain dans une machine, elle a permis d'obtenir un modèle présentant un excellent accord entre les séries observées et les séries simulées. Ceci est considéré comme un indéniable apport à la modélisation du transport solide.

Partant de ses résultats, et partant du fait que la modélisation du transport solide soit un sujet d'une extrême importance quelques recommandations ou perspectives pourront faire l'objet d'une étude antérieure visant à prévoir ce phénomène de la manière la plus précise possible :

- ▶ Combinaison du modèle flou et des systèmes d'information géographique afin de faciliter la prise en compte la base de données ;
- ▶ Etablir un modèle prévisionnel se basant sur les erreurs minimales obtenues lors de la modélisation par la logique floue ;
- ▶ Créer un lien direct entre les précipitations et le débit solide ;
- ▶ Mettre au point un modèle liant les apports solides au volume mort des barrages, afin d'optimiser les dimensions de l'ouvrage.
- ▶ Etablir un lien direct entre les précipitations et les dimensions de l'ouvrage.

Références bibliographiques

- ▶ Bersini P , Adaptive fuzzy systems, Prentice Hall 1993.
- ▶ Bouchon Meunier B, La logique floue, collection Que sais je 1995.
- ▶ Buhler H, Réglage par la logique floue, Presses polytechniques romandes 1993.
- ▶ Cojan M, Bassins sédimentaires, Springer 1999.
- ▶ Coque J, Ecoulements souterrains, Arnold 1977.
- ▶ Coque J , Eléments d'hydraulique, Arnold 1994.
- ▶ Campy M, Sediment yield, Earth press surfaces 2003.
- ▶ Degoutte G, Le transport solide, Hermes 2002.
- ▶ Duchaufour R, Géologie appliquée, Masson 2001.
- ▶ Erhart S, Earth surface processes, Blackwell science 1956.
- ▶ Glorennec P.Y, Réglages flous, Hermes 1999.
- ▶ Godjevac J, Une idée nette sur la logique floue, presses polytechniques romandes 1999.
- ▶ Kaufman A, Initiation élémentaire aux sous ensembles flous à l'usage des débutants, CPIT, EPFL 1973.
- ▶ Mamdani E.H, application of fuzzy algorithms, IEE 1974.
- ▶ Mamdani E.H, An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic, IEE 1975.
- ▶ Mamdani E.H, Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controller, IEE 1976.
- ▶ Probst J.L, Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale, Université de Strasbourg 1990.
- ▶ Procyk W, Fuzzy control, Research studies press 1979.

- ▶ Ritchot G, Essais de géomorphologie structurale, Université de Laval 1985.
- ▶ Schumm S.A, Geomorphology, New York 1977.
- ▶ Sugeno M, Fuzzy modelling and control, Fuzzy sets and systems 1986.
- ▶ Sundborg A, Problèmes d'érosion, Etude et rapport d'hydrologie, UNESCO 1986.
- ▶ Takagi T, Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control 1983.
- ▶ Takagi T, Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions, IFAC 1985.
- ▶ Tardy Y, Le cycle de l'eau, Masson 1989.
- ▶ Zadeh L, Fuzzy sets Information and control, Information and control 1965.
- ▶ Zadeh L, Similarity relations and fuzzy ordering, Information and control 1971.
- ▶ Dictionnaire de l'eau 1981.
- ▶ Dictionnaire français d'hydrologie de surface 1989.
- ▶ Glossaire international d'hydrologie 1992.