

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Modélisation couplée pluie/débit débit/débit :
Développement et application aux bassins non jaugés**

François Moussu

Directeur de recherche : Ludovic Oudin



**UMR Sisyphe
4 place Jussieu
75252 Paris cedex**

**Année universitaire
2006-2007**



Sommaire

Introduction	2
I Présentation de la base de données	5
I.1 Présentation du bassin de la Seine	5
I.2 Sélection des couples de station.....	7
I.3 Données hydro climatiques	9
I.3.1 Débit.....	9
I.3.2 Précipitation	9
I.3.3 Evapotranspiration potentielle	10
I.3.4 Constitution d'une base de données homogène	10
I.4 Données de la base hydro géomorphologique	11
I.4.1 Réseau hydrographique.....	11
I.4.2 Unité spatiale élémentaire (USE) corridors	11
I.4.3 Zones à dominante humide	12
II Modélisation couplée débit-débit et pluie-débit	15
II.1 Les différents modèles hydrologique	15
II.1.1 modèles pluie-débit.....	15
II.1.2 modèles débit-débit.....	15
II.2 Principe de la modélisation couplée	16
II.2 Présentation du mode de fonctionnement des différents modèles de transfert.....	19
II.2.1 Le délai (del):.....	19
II.2.2 Hydrogramme unitaire symétrique à loi puissance (hu):.....	20
II.2.3 Réservoir linéaire (reslin) :	21
II.2.4 Lag and Route (lag):	22
II.2.5 Réservoir et hydrogramme en dérivation (grt):	23
II.2.6 Muskingum (mus):	23
II.2.7 Réservoir débordant (resdeb) :	24
II.2.8 Réservoir continu (rescon) :	25
II.2.9 Synthèse.....	26
II.3 Comparaison des réponses des modèles exemple : sur deux biefs.....	27
II.4 Performances des modèles de transfert sur les biefs étudiés	30
II.4.1 Méthodologie d'évaluation des modèles	30
II.4.2 Performances générales	31
II.3. Vers une relation entre les performances et les caractéristiques hydro géomorphologique.....	34
II.5 Limites de la modélisation couplée	36
II.5.1 Interactions entre les paramètres de gr4j et du module de routage.....	36
II.5.2 Mimétisme des fonctions de routage	37
III Relation entre paramètres de modélisation et caractéristiques hydro géomorphologique ..	39
III.1 Indépendances des caractères hydro géomorphologiques.....	40
III.2 Recherche de relations entre paramètres de modélisation et des caractéristiques des biefs	41
III.2.1 Régression simple	42
III.2.1 Régressions multiples.....	44
III.3 Vers une application aux bassins non jaugés	45
Conclusion.....	48
Références	50

Introduction

Les inondations sont des catastrophes naturelles de premier plan qui tuent en France plusieurs personnes par an, et entraînent de nombreux dégâts matériels. Les dommages provoqués par les crues et les inondations sont liés aux actions anthropiques sur le bassin versant comme, par exemple, des changements d'occupation du sol, la suppression de plaines inondables naturelles, l'endiguement des rivières, etc. Toutes ces actions sont susceptibles de changer la réponse hydrologique des bassins versants et donc l'aléa inondation. Améliorer la lutte contre ces phénomènes passe par trois axes la prévention, la prévision et la protection.

La prévision joue un rôle important au niveau de son inscription dans le temps. En effet elle doit souvent s'affranchir de la connaissance des précipitations, au contraire de la simulation qui vise à reproduire le mieux possible la partie du cycle de l'eau allant de la chute des précipitations à la formation d'un débit sur une longue période. La prévision ne s'intéresse qu'à la formation d'un débit dans le futur, cet outil est majeur au niveau de l'annonce et de la protection des personnes en cas d'événement de crue. Pour ce qui est de la prévention, elle passe par la prédétermination des crues, elle est liée à la simulation des crues et plus largement des débits et à l'étude des chroniques passées. Ainsi elle a pour enjeux de déterminer l'aléa et la vulnérabilité et permet de définir des cartes de risques, base de réflexion pour l'aménagement du territoire. Ces deux approches prévision et prédétermination n'ont pas les mêmes enjeux mais un objectif commun : connaître le débit du cours d'eau en un point donné.

L'objectif de notre travail est de déterminer le potentiel de rétention des crues par les corridors fluviaux. Des modèles hydrauliques permettent une simulation très fine, du transfert du débit dans le corridor par la résolution des équations de Barré de Saint Venant. La résolution de ces équations nécessite un grand nombre d'informations qui ne sont pas toujours disponibles. L'approche de modélisation hydrologique est différente puisque nous modéliserons l'écoulement dans les biefs de rivière par des modèles de transfert relativement simples. L'originalité réside dans le couplage d'un modèle débit-débit et d'un modèle pluie débit pour quantifier les apports latéraux sur le bief (Lerat ,2007).

Objectif de l'étude

Notre étude a pour but une meilleure connaissance de la réponse hydrologique au sein du bassin de la Seine. Pour cela nous avons à notre disposition une large base de données hydrologiques et géomorphologiques du bassin de la Seine. En effet, l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire d'un bassin va dépendre de caractéristiques hydroclimatiques (pluviométrie, évapotranspiration potentielle), géométrique (longueur, pente, largeur) et géomorphologiques (sinuosité, zones humide) (Ramirez, 2000) .Nous allons donc essayer de modéliser ces écoulements de surface, en nous intéressant plus particulièrement à la question du transfert dans les chenaux de rivières. A partir des 361 stations hydrométriques existant sur le bassin de la Seine, nous allons sélectionner des couples de station (amont-aval) sur lesquels nous testerons une modélisation de la propagation du débit le long du bief entre ces deux stations à l'aide de fonctions de routage¹. Le débit à l'aval étant généralement atténué ou décalé par rapport à la station amont, nous allons dans notre étude essayer de voir dans un premier temps s'il nous est possible de modéliser ce transfert à l'aide d'une modélisation couplée, c'est-à-dire un modèle pluie-débit pour prendre en compte les apports latéraux (sur le bassin versant entre les deux stations d'études) avec un modèle débit-débit de transfert. En effet pour que notre sélection de couple soit assez étoffée nous devons choisir le plus de couples même si la différence de superficie entre nos bassins amont et aval est très importante, le débit amont ne peut pas expliquer à lui seul le débit aval ; c'est pourquoi une modélisation du bassin intermédiaire nous permet de compenser les apports non expliqués par la propagation du flux sur le bief.

Nous présenterons dans un premier temps l'ensemble des données nécessaires à nos travaux. Après une présentation du bassin de la Seine et la sélection des couples de station, notre travail consiste à réaliser deux bases de données :

- une première base de données hydro climatique où nous regrouperons les données nécessaires à la modélisation.
- une seconde base de données afin de récolter les caractères hydro géomorphologiques disponibles sur les biefs sélectionnés.

¹ Par la suite nous utiliserons la terminologie routage ou transfert indifféremment

Nous traiterons dans un second temps la partie modélisation, où nous réaliserons de nombreux tests et comparaisons de différents modèles débit-débit simples, combinés avec une modélisation pluie-débit pour traiter les apports latéraux. Cette approche novatrice est développée actuellement par le Cemagref (Lerat, en cours) et sera appliquée sur des biefs du bassin de la Seine. Ainsi nous expliquerons tout d'abord le principe de la modélisation couplée pluie-débit débit-débit. Ensuite nous présenterons le fonctionnement de chacune des fonctions de transfert, ainsi que leur comportement face à une impulsion type de débit amont. Nous présenterons pour finir les performances de ces modélisations sur les biefs d'étudiés.

Dans un dernier temps nous essayerons de mettre en relation les paramètres de modélisation débit-débit aux caractères géomorphologiques des biefs étudiés. Pour cela nous nous appuierons sur la base de données hydro géomorphologiques et essaierons par des équations de régression de relier paramètres de modélisation aux caractéristiques des biefs. C'est dernières vont nous permettre d'obtenir de nouveaux jeux de paramètres et ainsi tester les performances obtenues après la simulation réalisée avec les paramètres obtenus par les équations de régression.

I Présentation de la base de données

I.1 Présentation du bassin de la Seine

La Seine a un bassin versant dont la superficie est de 78600 km² et couvre 12% du territoire français; elle prend sa source sur le plateau de Langres en Côte d'Or à une altitude de 471 mètres et se jette près du Havre. La lithologie est dominée par des roches sédimentaires carbonatées, et l'on y trouve également la présence du socle sur 3% du bassin (cf. figure 1). Le bassin a des conditions climatiques tempérées et reçoit en moyenne 700mm de précipitation par an. On observe un débit moyen de la Seine à Paris de 300 m³/s. Ce bassin est caractérisé par une grande homogénéité hydrologique qui peut être expliquée par l'altitude de l'ensemble des plateaux entre 100 et 300m (seul 1% de la surface dépasse 550m), ce qui implique une faible pente des cours d'eau. Le réseau hydrographique du bassin de la Seine et ces cours d'eau côtiers normands est composé de 55000 km. Notons que le réseau hydrographique est connecté aux nappes, en période d'étiage ce sont elles qui alimentent les rivières et inversement en période de crues. La façade maritime normande abrite une trentaine d'exutoires principaux correspondant au petit chevelu hydrographique qui constitue le reste du réseau hydrographique. La variation interannuelle des écoulements s'explique principalement par les variations de pluviométrie. Suite aux crues de 1910 et de 1955 quatre barrages réservoirs ont été construits en amont de Paris sur les principaux affluents de la Seine (Yonne, Marne, Aube et Seine). Ces derniers ont une capacité de Stockage de 800 millions de mètres cubes, leur rôle sera donc assez faible au niveau de l'écêtement des crues. En cas de crue type 1910 le niveau de la Seine à Paris pourrait être abaissé de 90cm, mais leur rôle est majeur pour le soutien d'étiages pouvant ainsi doubler le débit à Paris (Gomez, 2002). Du point de vue écologique le bassin possède 26500 km² de zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique parmi lesquelles des zones à dominances humides qui ont une grande diversité biologique. A l'heure actuelle une valorisation de ces zones humides est en cours, elles peuvent ainsi réaliser une épuration des eaux, un écêtement des crues ; ces fonctionnalités leur confère une grande valeur économique. Notre étude s'inscrit dans ce contexte puisque nous tenterons d'identifier quels paramètres hydro géomorphologiques sont bénéfiques à l'écêtement des crues. Joyeux (2005) est parti des données de hydro géomorphologiques pour essayer de trouver un indice de rétention des crues au niveau des zones humides.

La géologie du Bassin Parisien est organisée en cercles concentriques. Les terrains sont sédimentaires avec successivement, depuis l'extérieur de l'auréole vers l'intérieur :

- une auréole calcaire perméable
- des argiles et marnes imperméables
- une craie perméable des terrains tertiaires (argiles, calcaires et sable)

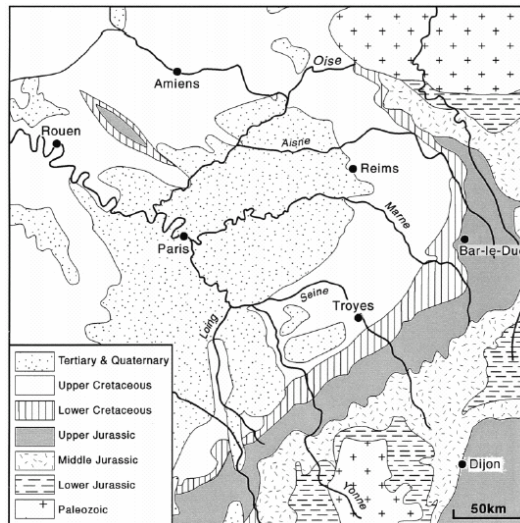


Figure 1 : Géologie du Bassin de la Seine

Ces unités lithographiques ainsi empilées constituent par ailleurs des systèmes aquifères ou des formations semi-perméables en fonction de leur nature lithologique. Rechargés au niveau de leur affleurement, les aquifères sont séparés des roches semi-perméables constituant des connexions entre le système aquifère multicouches.

1.2 Sélection des couples de station

Afin de tester les modèles de simulation de débits, nous avons collecté des données hydrométéorologiques entre des stations « amont » et des stations « aval ». Dans le bassin de la Seine, on répertorie 361 stations hydrométriques. Pour l'ensemble de ces stations de mesures les informations ne sont pas identiques : l'ensemble des mesures n'a pas commencé la même année et certaines ne sont plus en activité. Pour notre étude il faut que les relevés de débits entre les stations amont et aval soient sur des périodes de temps concomitantes. Nous avons ainsi sélectionné 110 stations de mesures afin de former 135 couples. La localisation de ces stations est indiquée sur la Figure 2: Localisation des 110 stations hydrométriques. De plus, pour modéliser les apports latéraux sur ces biefs, nous avons besoin de données climatiques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) sur le bassin intermédiaire entre la station amont et la station aval.

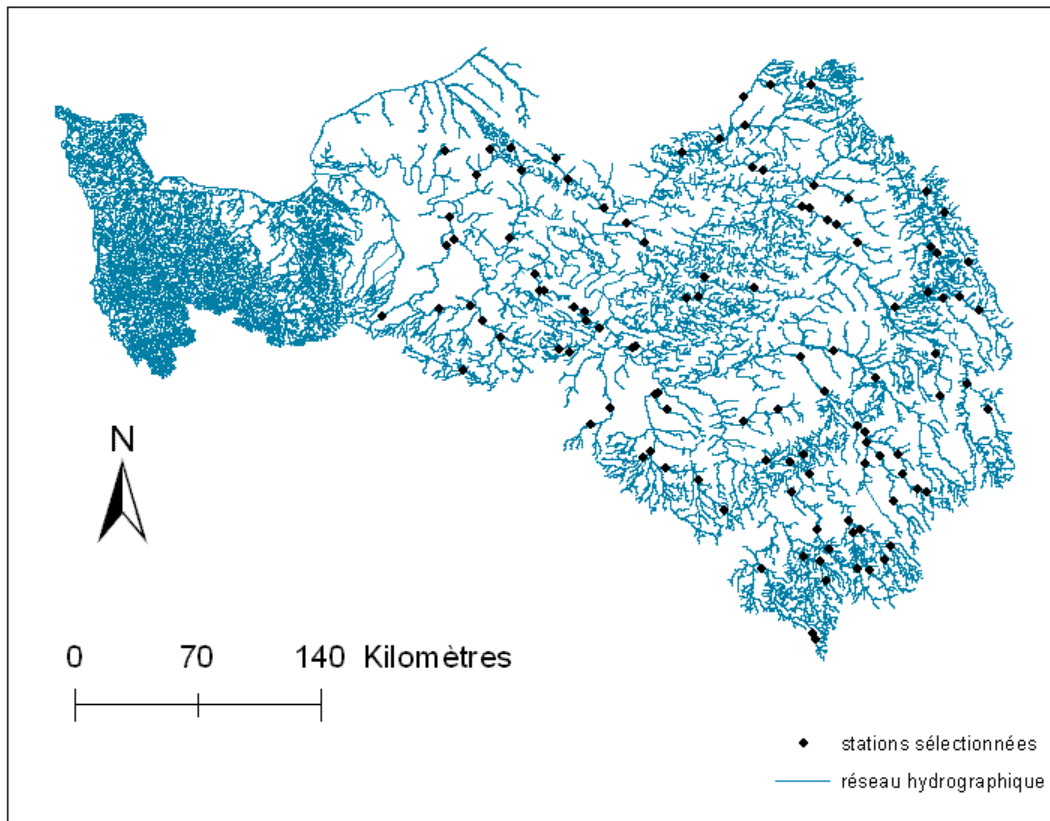


Figure 2: Localisation des 110 stations hydrométriques

Les 135 couples de stations retenus sont repartis sur le bassin de la Seine et ne présentent pas de grande variété hydrométéorologique ; à contrario ces couples présentent une grande variété de configuration :

-En taille si le plus grand bassin versant a une superficie de près de 6000 km², le plus petit ne fait qu'une vingtaine de kilomètres carrés, ainsi la superficie moyenne des bassins versants aval est de 2000 km² contre 550 km² pour les bassins versants amont. La médiane des superficies des bassins versants intermédiaires est de 1300 Km².

-En surface contributive du bassin amont représente entre 4% et 92%. De plus, les 135 couples ont essentiellement 10 ans de chroniques de pluie, ETP, et débits amont et aval (figure 3).

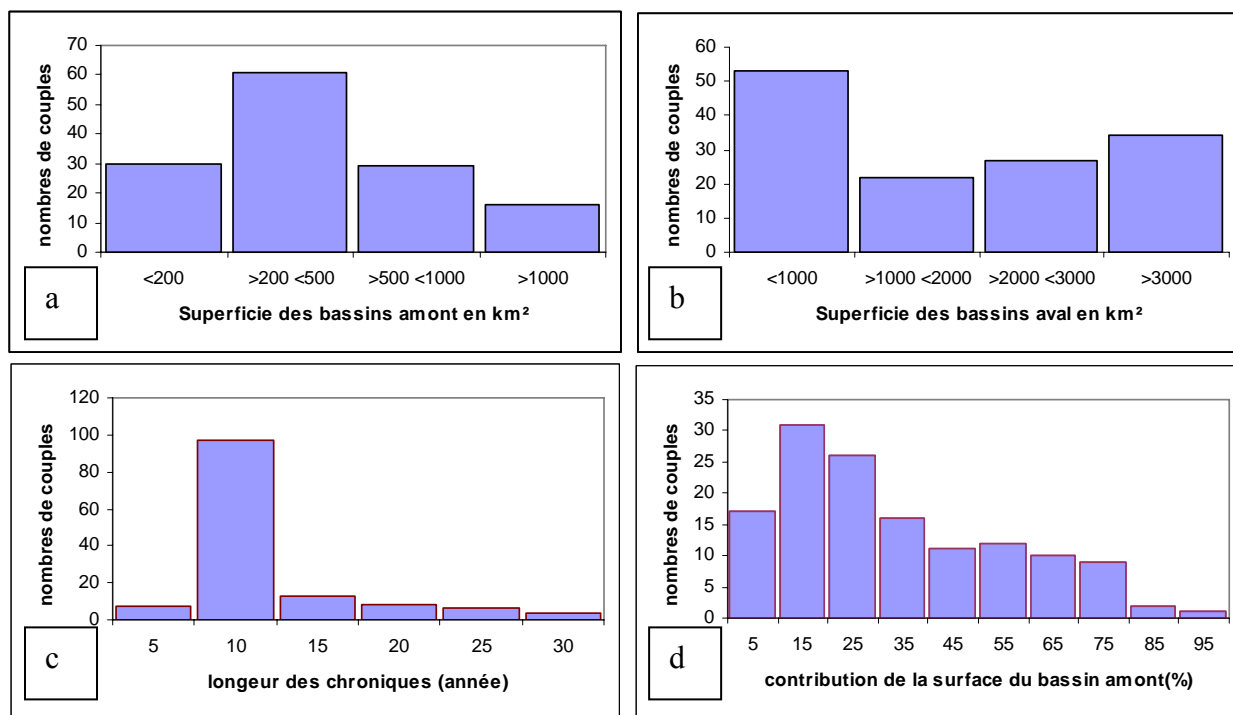


Figure 3 : Caractéristiques des couples sélectionnés: superficie des bassins amont(a), des bassins aval (b) longueur des chroniques (c) et rapport de surface (d)

1.3 Données hydro climatiques

La modélisation couplée pluie/débit débit/débit que nous testerons n'utilise en entrée que trois données au pas de temps journalier : le débit à la station amont pour alimenter la modélisation débit/débit, l'évapotranspiration potentielle et la précipitation du bassin versant intermédiaire pour la modélisation pluie/débit. Ces données ne sont pas toutes disponibles sur l'ensemble du bassin de la Seine, et sur les mêmes périodes.

I.3.1 Débit

L'ensemble de l'étude repose sur les données hydrométriques qui sont à notre disposition sur le site Internet du réseau national des données sur l'eau (RNDE) : celui-ci nous permet d'accéder à la banque nationale de données hydrométriques. L'ensemble des données est donc une synthèse au plan national des informations sur l'eau recueillies à l'échelle locale par la direction régionale de l'environnement (DIREN), les services de prévision des crues (SPC), la direction départementale de l'agriculture et de la forêt (DDAF). Par exemple, 3500 stations de mesures du débit sont disponibles sur l'ensemble du territoire, ces stations de mesures de hauteur d'eau associée aux courbes de tarages permettent le calcul de débit. Des valeurs de débit journalier sur les différentes stations sont donc disponibles. Toutes ces stations sont gérées par la DIREN Ile de France, les données étant stockées sur la banque HYDRO gérée par le ministère de l'écologie et du développement durable.

I.3.2 Précipitation

De même que pour les débits les données pluviométriques sont collectées à partir des bases de données institutionnelles : la base PLUVIO de Météo France et les bases de données des réseaux pluviométriques complémentaires comme par exemple celui de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Elles sont fournies par des mesures au sol. Dans notre modélisation elles sont utilisées comme entrées des modèles pluie-débit. Les lames d'eau moyennes précipitées sont calculées comme une moyenne arithmétique de celles observées sur les postes présents sur chaque bassin. . Compte tenu du contexte climatique du bassin de la Seine, présentant un champ de précipitation relativement homogène, la densité des postes pluviométriques est suffisante.

I.3.3 Evapotranspiration potentielle

C'est l'évapotranspiration potentielle qui dirige la demande évaporatoire de l'air, ainsi les modèles les utilisent pour calculer les retours d'eau réels vers l'atmosphère à l'échelle du bassin versants. Oudin (2005) a montré que les modèles pluie-débit ne sont pas très sensibles à la variabilité temporelle de cette variable et qu'une courbe moyenne de régime d'ETP suffit à rendre compte des évaporations. Des données décennales moyennes interannuelles d'ETP Penman seront utilisées à des stations situées au sein ou à proximité du bassin étudié.

I.3.4 Constitution d'une base de données homogène

Une base de données regroupant les débits, la pluviométrie et l'évapotranspiration en millimètres au pas journalier a pu être constituée, avec en moyenne 10 ans de relevés. Les dispositifs de mesure de la pluie présentent des garanties suffisantes pour pouvoir assurer une bonne couverture des zones, au pas de temps journalier. Ainsi nous allons pouvoir utiliser ces données dans le cadre d'une modélisation hydrologique couplée pluie-débit et débit-débit.

1.4 Données de la base hydro géomorphologique

Notre étude repose dans un premier temps sur la modélisation de la fonction de transfert et la simulation du débit à une station aval en fonction du débit entrant à une station amont. Les paramètres de cette modélisation ont-ils un rapport avec les caractéristiques du bief en question ? Notre ambition est d'aller vers une application aux bassins non jaugés, ce qui passe par une caractérisation des biefs à modéliser, le bassin versant de la Seine a une couverture hydro géomorphologique regroupée au sein de plusieurs bases de données. Ces différentes bases de données sont agrégées dans des couches de données géo-référencées au format vecteur d'Arcview dans le système de projection Lambert 2 étendu. Notre travail a consisté à collecter ces différentes sources de données et à extraire les informations pour chaque bief étudié.

I.4.1 Réseau hydrographique (source : Piren Seine et BD Carthage)

Le référentiel spatial de l'eau en France est né de la fusion de la codification hydrographique, définie par la circulaire interministérielle n°91-50 du 12 février 1991, et de la base de données BD Carto© de l'IGN. Cette fusion a conduit à l'élaboration de la BD Carthage. Ce référentiel géographique identifie sans ambiguïté chaque cours d'eau, chaque plan d'eau ou chaque zone humide sur le territoire métropolitain. Le réseau hydrographique est composé d'une couverture linéaire représentant les tronçons du réseau. Ainsi à chaque tronçon linéaire sont affectées dans la base de données les informations suivantes : nom du cours d'eau, longueur du tronçon, largeur moyenne, ordre de Stralher, pente et profondeur moyenne,...

I 4.2 Unité spatiale élémentaire (USE) corridors (source : Scott)

La base de données USE (Gaillard, 2002) contient trois couches d'informations spécifiques dédiées à la caractérisation physique et hydrologique des corridors fluviaux

(couche use, couche corridor, couche carthage). Cette base de données regroupe des informations comprises dans la BD Carthage (réseau hydrographique), les cartes géologiques du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) au 1/50 000 et les cartes topographiques de l'Institut Géographique National (IGN) au 1/25 000 (Scan 25). Pour la saisie des corridors fluviaux, la seule source de données est issue des cartes IGN interprétées hydro-géomorphologiquement par Geosphair. Ensuite, les couloirs fluviaux ont été découpés en Unités Spatiales Élémentaires (USE) ou tronçons de 250 m. Les données des différentes couches ont ensuite été capturées et agrégées dans les USE. La couche USE comprend 23 champs. Cette base de données a permis de définir l'unité de travail (corridor fluvial). La description géomorphologique des USE qu'elle contient permet de renseigner plusieurs indicateurs : la sinuosité et la densité des chenaux secondaires, ainsi que leur connexion au chenal principal (couche Carthage), la largeur de la plaine alluviale, la morphologie (subhorizontale, à dépressions et levées, à dépressions et montilles) et le revêtement du sol (minérale, mixte, organique). Cette base de données hydro géomorphologiques (BDH) a permis l'élaboration de la typologie fonctionnelle des zones humides riveraines, afin d'identifier les zones humides efficaces et prioritaires relativement à la préservation de la ressource en eau, dans le cadre de l'élaboration du programme de mesures de la Directive Cadre Européenne sur l'eau.

I 4.3 Zones à dominante humide (source : agence de l'eau Seine Normandie)

Le terme Zone Humide recouvre une grande variété de situations et de caractéristiques. La loi sur l'eau de 1992 précise que « ce sont des terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre, de façon permanente ou temporaire ; la végétation quand elle existe, y est dominée par des végétaux hygrophiles pendant au moins une partie de l'année ». Les zones humides sont donc des interfaces, des espaces de transition entre le milieu terrestre et les eaux superficielles ou marines. Elles jouent un rôle essentiel pour la ressource en eau : elles contribuent à la régulation hydraulique, à l'amélioration de la qualité des eaux et maintiennent un écosystème d'une grande diversité. L'agence de l'eau Seine Normandie a donc réalisé une cartographie basée sur la photo-interprétation d'orthophotographies à 5 m de résolution associée à l'utilisation d'images satellites et d'autres données ancillaires afin de délimiter des Zones à Dominante Humide sur le bassin de la Seine et de tous ses affluents. Cette typologie des Zones à Dominante Humide comprend huit

grands types (niveau 1) et 16 sous-types (niveau 2). Cette typologie est synthétisée dans le Tableau 1.

1. Eaux de surface (stagnantes et courantes)	
1.1	Eaux courantes - cours permanents ou temporaires : ruisseaux, rivières, fleuves
1.2	Annexes hydrauliques - Bras-morts, noues
1.3	Plans d'eau - Gravières, étangs naturels et artificiels, bassins
2. Formations forestières humides et/ou marécageuses - (taux de couverture > à 50%)	
2.1	Boisements semi-naturels ou faiblement artificialisés ou à forte naturalité
2.2	Boisements artificiels (peupliers, résineux, autres)
3. Prairies humides (pâturée ou fauchée)	
4. Marais intérieurs, tourbières et landes	
4.1	Tourbières et bas-marais
4.2	Landes humides
4.3	Roselières
4.4	Mégaphorbiaies (zones à hautes herbes hygrophiles)
4.5	sous-type non cartographiable ou non identifiable ou non différencié
5. Marais littoraux et estuaires	
5.1	Pannes dunaires (dépressions humides intradunaires)
5.2	Slikke, vasières (domaine de la boue et de la vase)
5.3	Schorre, prés salés
5.4	sous-type non cartographiable ou non identifiable
6. Terres arables	
7. Zones urbaines et autres territoires artificialisés	
7.1	Zone urbaine : entités artificialisées (surfaces bâties et aménagements associés, zones industrielles)
7.2	Autres : zones artificialisées non connectées à 7.1 (ex : déchetterie, zone de stockage de gravières, parking, etc.)
8. Mosaïques d'entités humides de moins de 1 ha	

Tableau 1 : Typologie des Zones à dominante humides

Un travail de synthèse de ces différentes bases de données a été réalisé pour ne garder que les informations souhaitées sur les biefs sélectionnés ; ainsi, nous avons regroupé les informations sur le réseau hydrographique, le corridor fluvial et sur la présence de zone humide. Les caractéristiques géomorphologiques des couples de stations sélectionnés sont présentées dans la figure 4.

I Présentation de la base de données

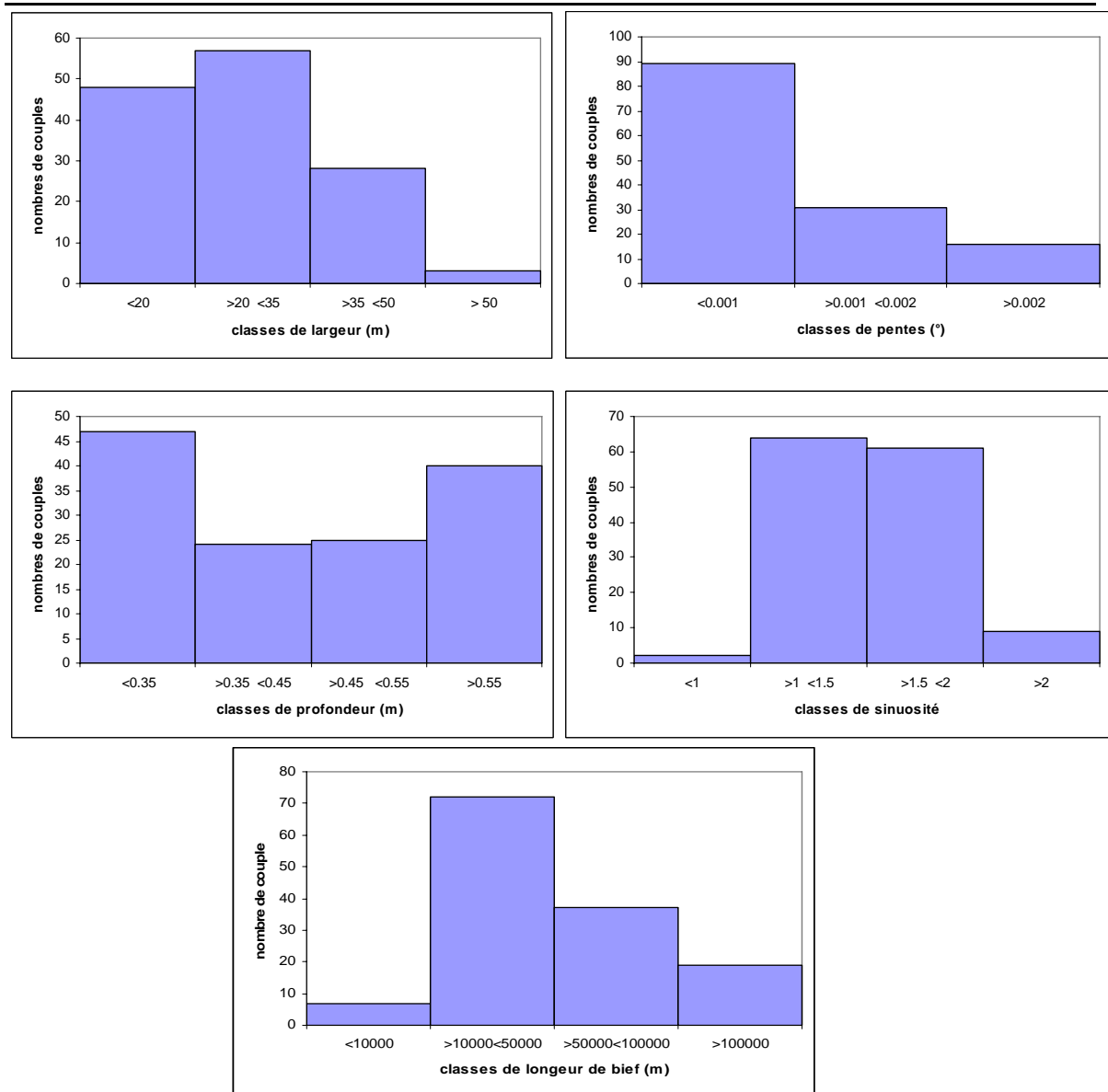


Figure 4: Histogramme des couples par classes de : largeur, pente, profondeur, sinuosité, et longueur

On note que l'ensemble des données montrent que les caractéristiques des couples sont assez homogènes au niveau de la pente, de la profondeur et de la sinuosité c'est caractéristiques étant régionales. Au contraire de la largeur et longueur qui sont liées aux biefs.

II Modélisation couplée débit-débit et pluie-débit

II.1 Les différents modèles hydrologique

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versant est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion de la ressource en eau, à l'aménagement du territoire, ou au risque hydrologique. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation de la pluie en débit, ou la formation d'un débit sortant en fonction d'un débit entrant. L'originalité du travail effectué dans le cadre du stage réside dans le fait que l'on cherche à combiner des modèles pluie-débit et des modèles débit-débit.

II.1.1 modèles pluie-débit

Il existe un grand nombre de modèles pluie-débit, qui vont ainsi simuler un débit à l'exutoire d'un bassin versant, en utilisant la précipitation et l'Evapotranspiration potentielle (ETP) comme données d'entrées. Plusieurs auteurs ont proposé une classification : à titre d'exemple Refsgaard et Storm (1996) classent les modèles en trois catégories:

- *les modèles conceptuels* considèrent le bassin versant, comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

- *les modèles empiriques* de type boîte noire, cherchent à reproduire la dynamique des variables de sortie sans tenter de décrire les processus élémentaires.

- *les modèles distribués à base physique* cherchent à décrire l'ensemble des processus élémentaires en tout point du bassin versant.

La notion de modèles physiques est à opposer à celle de modèles conceptuels, ainsi que l'on oppose modèles distribués à modèles global au niveau de la description spatiale du bassin versant.

Il n'y a pas de conflit entre ces différents modèles qui ont été développés à des fins différentes : les modèles physiques et distribués pour une étude plus fine des processus hydrologiques, et les modèles conceptuels pour une détermination des paramètres moyens sur le bassin étudié et des débits à l'exutoire uniquement.

II.1.2 modèles débit-débit

En plus de ces modèles pluie-débit il existe des modèles débit-débit, ces modèles vont simuler un débit sortant à un point aval en fonction d'un débit entrant à un point amont. On peut classer en deux grands domaines ces modèles (Fread, 1993):

- *les modèles globaux* réalisent le transfert de l'écoulement d'un point amont à un point aval. Ils ne permettent l'estimation du débit qu'au point aval.

- *les modèles distribués* prennent explicitement en compte la variabilité spatiale des processus, des variables d'entrée, des conditions aux limites et des caractéristiques du bassin versant. Ils permettent donc l'estimation du débit (et de la hauteur d'eau) en tout point du réseau hydrographique.

Ces modèles débit-débit négligent en général la modélisation des apports latéraux, en les traitant principalement sous deux formes : ponctuels ou uniformément réparties. Nous proposerons ici une approche permettant de traiter la quantification des apports latéraux via une modélisation pluie-débit du bassin intermédiaire alimentant le bief de rivière considéré. Dans notre cas, cette modélisation simplifiée des écoulements présente deux avantages : la possibilité d'être utilisée sur des biefs sans données topographiques et la possibilité d'être appliquée sur des biefs de longueur importante.

II.2 Principe de la modélisation couplée

Cette modélisation porte sur la simulation du débit à la station dite aval au cours du temps, celui-ci sera la résultante de deux fonctions : la première étant la simulation d'un débit entrant entre les deux stations à l'aide d'un modèle pluie-débit, la seconde est une fonction de transfert (ou routage) qui propage le débit sortant de la station amont. La figure 5 schématise l'approche de la modélisation couplée utilisée.

$$Q_{av} = ROUTE(xp, Q_{am}) + INT(xp, P, E)$$

Avec :

-ROUTE et INT les opérateurs des modèles de transfert et pluie-débit

-Xp les paramètres des modèles

-Qam le débit amont

-P et E la pluie et l'ETP du bassin intermédiaire

-Qav le débit à la station aval

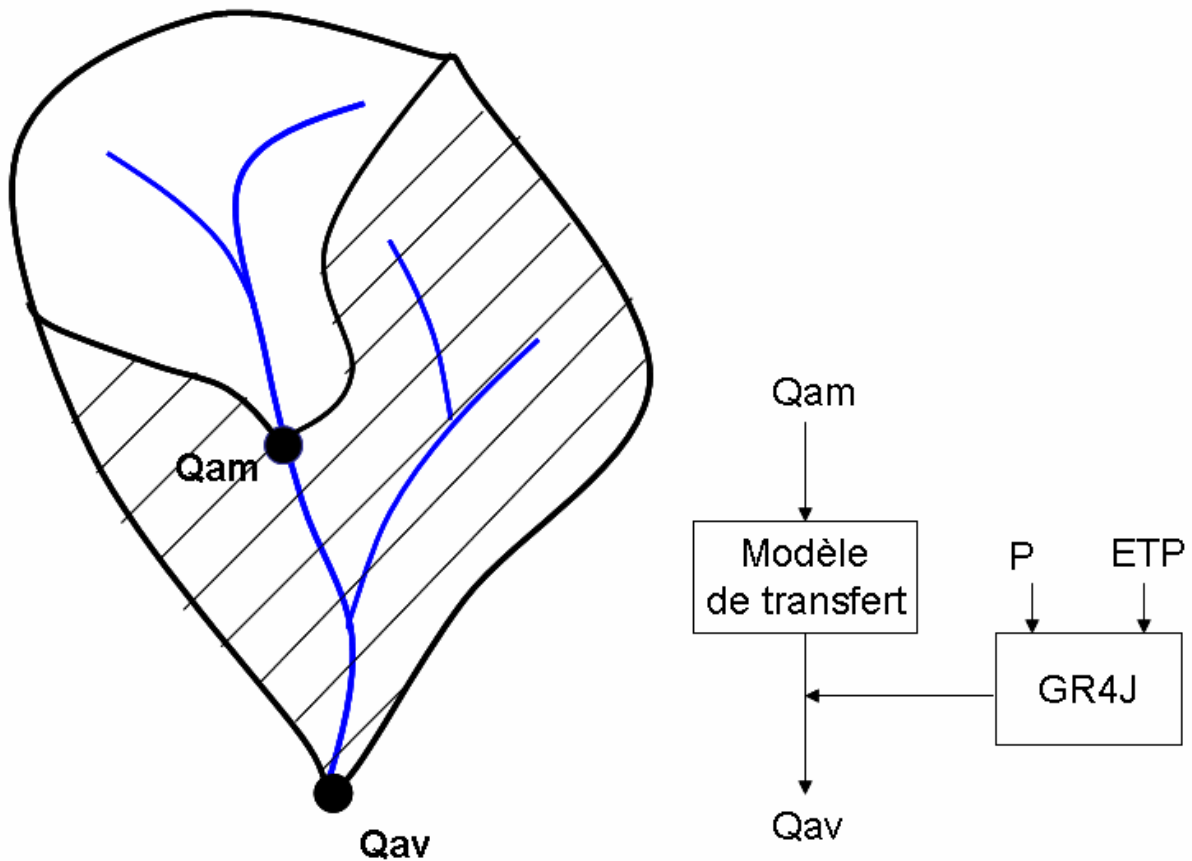


Figure 5: Principe de modélisation couplée pluie-débit et débit-débit

Modèle pluie-débit :

La modélisation pluie débit a pour but de connaître les apports qui existent sur toute la surface du bassin intermédiaire, celle-ci n'étant pas prise en compte au niveau de la fonction de routage. La notion de bassin intermédiaire résulte du fait que le bassin amont est englobé dans le bassin aval, comme nous utilisons un modèle de transfert, il n'est possible de connaître les apports entre nos deux stations qu'à partir d'une modélisation du bassin intermédiaire.

Un couple de stations est défini par :

- une station amont qui est l'exutoire du bassin versant amont (surface du bassin amont S_{am})
- une station aval qui est l'exutoire du bassin versant aval (surface du bassin amont S_{av})

Le bassin intermédiaire est la surface du bassin aval qui n'appartient pas au bassin amont (surface bassin intermédiaire $S_{bvi} = S_{av} - S_{am}$).

La modélisation des apports latéraux est une modélisation des écoulements de surface du bassin intermédiaire (les données d'entrée du modèle sont la pluie et l'ETP de ce bassin

intermédiaire), celle-ci est réalisée à l'aide du modèle pluie-débit (GR4J) (Perrin et al, 2003) qui possède quatre paramètres.

Modèle Débit-Débit :

Toutes les fonctions de routage que nous allons utiliser sont de simples équations mathématiques de propagation de l'onde de flux ; elles reposent sur l'hypothèse de la conservation de la matière, toutefois cette hypothèse n'est certainement pas vérifiée dans la réalité puisqu'il existe de nombreux échanges avec les nappes sous-jacentes. L'équation de continuité qui dirige les modèles de transfert s'écrit :

$$Q_{am}(j) - Q_{av}(j) = \frac{dS(j)}{dt}$$

Chacune des fonctions de routage testées se base sur la propagation du débit amont au cours du temps. Nous avons à notre disposition plusieurs modèles débit-débit, nous allons dans un premier temps étudier leurs fonctionnements, nous verrons ensuite comment ils réagissent à une impulsion type (l'exemple portera sur un couple de station). Enfin nous nous intéresserons à la performance de chacun de ces modèles.

II.2 Présentation du mode de fonctionnement des différents modèles de transfert

II.2.1 Le délai² (del):

C'est un modèle à un paramètre x (jours), celui-ci correspond à un temps en jours. Ainsi nous opérons une transformation de l'hydrogramme de la station en amont par l'intermédiaire du paramètre afin d'obtenir l'hydrogramme aval transféré. On peut donc écrire :

$$Q_{av}(j) = Q_{am}(j - x)$$

Le débit amont est reporté à l'aval grâce au paramètre de délai, cette simple formulation du délai étant efficace si ce paramètre est un nombre entier. Si ce dernier est un réel, nous ne pouvons pas utiliser cette simple formulation du délai. Dans ce cas, nous allons pondérer le débit amont suivant la première décimale du paramètre délai pour séparer le débit amont qui arrivera en aval sur deux jours : l'expression finale de la fonction délai est donc :

$$x = A.y$$

$$Q_{av}(j) = [(1 - 0.y) \times Q_{am}(j - A)] + [0.y \times Q_{am}(j - (1 + A))]$$

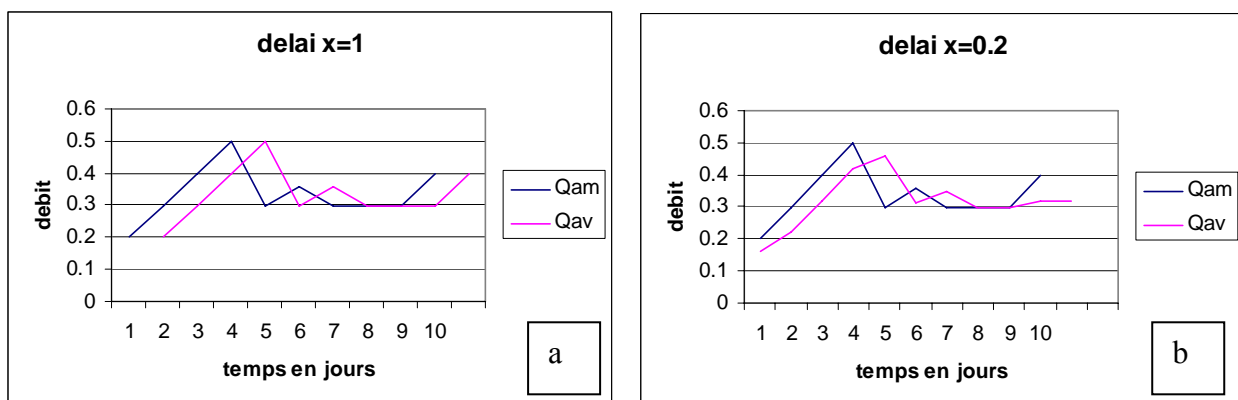


Figure 6 : Exemple de la fonction délai avec un paramètre entier $x=1$ (a) et un réel $x=0.2$ (b)

On observe sur la figure 6 que la fonction délai ne correspond plus à un simple décalage dans le temps de l'hydrogramme amont. il permet alors une atténuation de la crue par pondération sur deux pas de temps.

² Notons que le délai est aussi appelé « délai pur » dans les modèles hydrologiques. Il correspond aussi à l'onde cinématique sans discrétisation dans l'espace et pour une section uniforme.

II.2.2 Hydrogramme unitaire symétrique à loi puissance (hu):

C'est un modèle à un paramètre x (jours) qui correspond au temps de base de l'hydrogramme en jours. Ainsi nous opérons une transformation de l'hydrogramme à la station en amont par l'intermédiaire d'un hydrogramme unitaire (principe de l'onde diffusante) pour calculer l'hydrogramme aval. Le débit amont est reporté à l'aval à l'aide d'un hydrogramme unitaire triangulaire (fonction $h(j)$). Le débit recherché est la réponse de l'intégrale de convolution suivante :

$$Q_{av}(j) = \int_0^j Q_{am}(x).h(j-x)dx$$

La résolution de cette intégrale de convolution va se faire par discrétisation. L'hydrogramme unitaire utilisé ici a une forme symétrique à la loi puissance $5/2$.

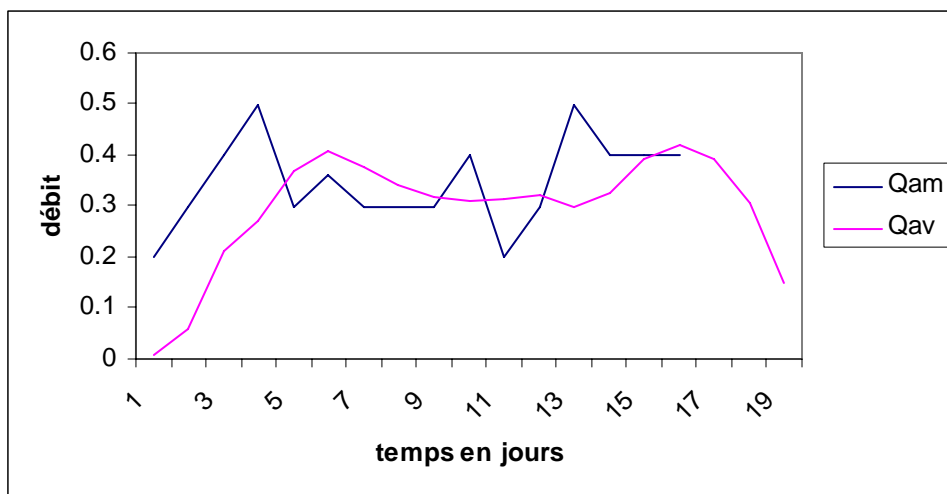


Figure 7 : Exemple de réponse de l'hydrogramme unitaire (HU) $x=2$

II.2.3 Réservoir linéaire (reslin) :

C'est un modèle à un paramètre x (jours⁻¹) qui correspond à un coefficient de vidange (modèle de maillet). En effet, le débit amont entrant est stocké dans un réservoir de capacité infinie, qui se vide selon la loi de vidange déterminée par le paramètre x afin de former le débit aval transféré. A chaque pas de temps le calcul s'effectue comme suit :

$$R(j) = R(j-1)^* + Q_{am}(j)$$

$$Q_{av}(j) = R(j) - R(j) \times \exp^{-x\Delta j}$$

$$R(j)^* = R(j) - Q_{av}(j)$$

Où $R(j)$ est le niveau de remplissage du réservoir au début du pas de temps j

$\Delta j=1$ pas de temps du modèle

$R^*(j)$ est le niveau de remplissage du réservoir à la fin du pas de temps j

Exemple :

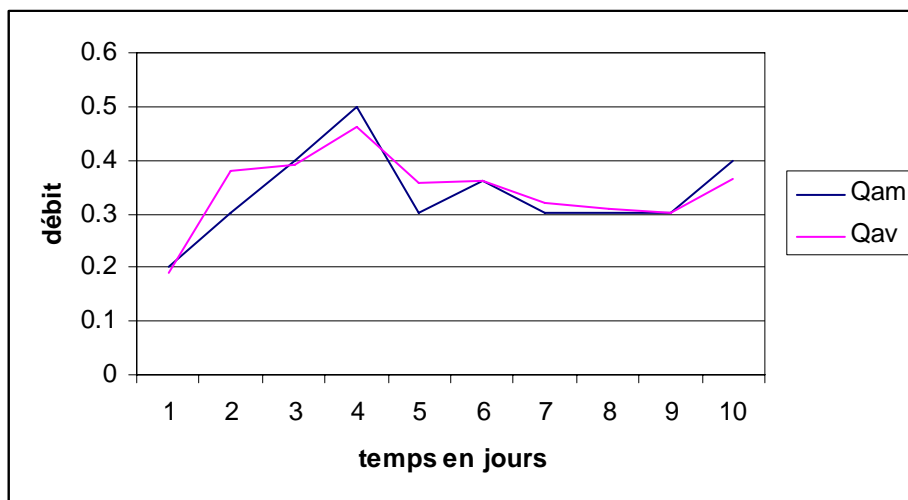


Figure 8: Exemple de réponse du réservoir à vidange linéaire (x=1)

Notons qu'il existe cependant d'autres types de réservoirs, dont le fonctionnement varie en fonction de :

- Leur niveau maximal de remplissage (possible débordement)
- La fonction de vidange pouvant être soit linéaire, soit quadratique

II.2.4 Lag and Route (lag):

Le modèle « Lag and Route » (Linsley,1949) est l'association d'une fonction de routage type « réservoir linéaire » suivi de la fonction « délai ». On retrouve donc deux paramètres : l'un correspondant au coefficient de vidange du réservoir ($x1$), l'autre au délai de report du débit qui sort du réservoir avant son arrivée à la station aval ($x2$).

A chaque pas de temps le calcul s'effectue comme suit :

$$R(j) = R(j-1)^* + Q_{am}(j)$$

$$Q^*t(j) = R(j) - R(j) \times \exp^{-x1\Delta j}$$

$$R(j)^* = R(j) - Q^*t(j)$$

$$Q_{av}(j) = Q_{int}(j - x2)$$

Où $R(j)$ est le niveau de remplissage du réservoir au début du pas de temps j

$R^*(j)$ est le niveau de remplissage du réservoir à la fin du pas de temps j

$Q_{int}(j)$ le débit qui sort du réservoir au temps j

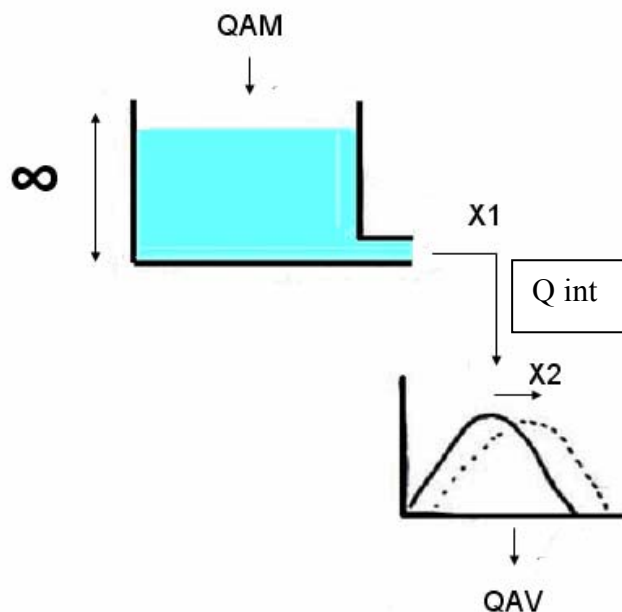


Figure 9: Schéma du fonctionnement du modèle Lag and Route

Notons que d'autres lois de vidanges ont été testées pour le réservoir, Bentura et Michel (1997) conseillent ainsi un réservoir à vidange biquadratique à la place du réservoir linéaire.

II.2.5 Réservoir et hydrogramme en dérivation (grt):

Cette fonction de routage est l'association d'un hydrogramme unitaire et d'un réservoir à vidange quadratique. Les paramètres correspondent au coefficient de vidange du réservoir et au temps de base de l'hydrogramme unitaire. Une séparation du débit amont est faite entre une branche rapide (10% du débit amont) qui transite par un hydrogramme unitaire et une branche lente (90% du débit amont) qui est stockée dans un réservoir à vidange quadratique de paramètre (x_1). Ce schéma de routage est celui utilisé dans le modèle Gr4j. il sera noté par la suite Grt.

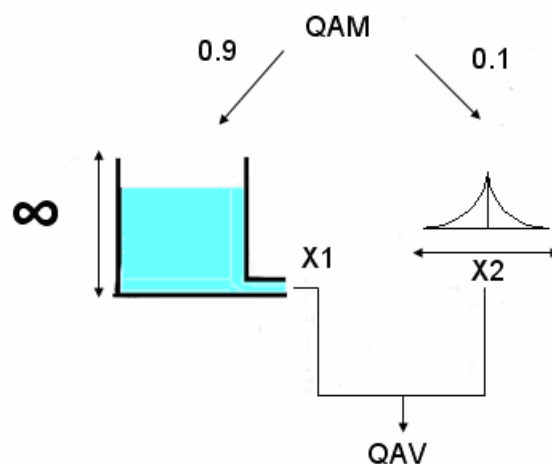


Figure 10: Schéma du modèle Grt

II.2.6 Muskingum (mus):

La méthode de Muskingum a été développée par McCarthy (1938) ; c'est la fonction de routage la plus populaire, cette relation spécifie que le stock est proportionnel à une combinaison linéaire du débit entrant et sortant.

$$S_j = k[xQ_{am}(j)_t + (1-x)Q_{av}(j)]$$

Avec :

- x paramètre de pondération
- k paramètre du modèle (temps de stockage)
- S_j Correspond au stockage absolu du corridor au temps t
- $Q_{am}(j)$ et $Q_{av}(j)$ correspondent au débit entrant et sortant

II Modélisation couplée débit-débit et pluie-débit

On résout donc cette équation en la combinant avec l'équation de continuité

$$Q_{am}(j) - Q_{av}(j) = \frac{dS(j)}{dt}$$

La solution numérique qui résulte de ces deux équations est :

$$Q_{av}(j) = C_0 Q_{am}(j) + C_1 Q_{am}(j-1) + C_2 Q_{av}(j-1)$$

avec

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1$$

II.2.7 Réservoir débordant (resdeb) :

Ce modèle fonctionne avec un réservoir à vidange linéaire (paramètre x_1), ce réservoir possède un niveau de remplissage maximal (paramètre x_2). Ainsi, quand ce réservoir est rempli le reste de l'écoulement va transiter à travers un hydrogramme unitaire (paramètre x_3).

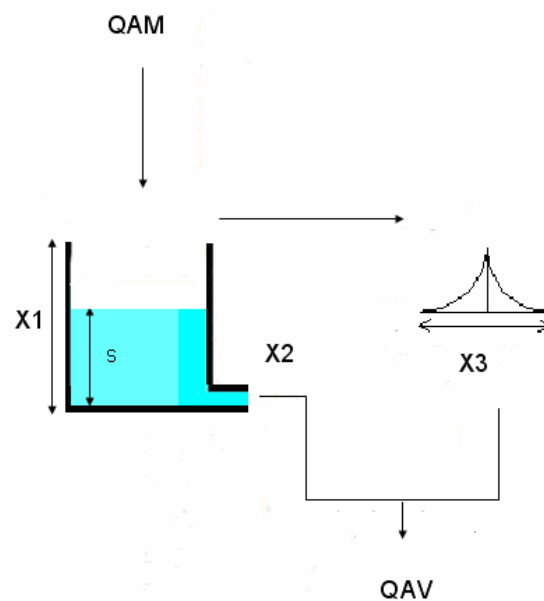


Figure 11: Schéma conceptuel du fonctionnement du réservoir débordant

Ce modèle à trois paramètres a été imaginé dans le cadre du stage pour mieux rendre compte de l'écoulement lors de débordement du lit mineur (par exemple en transitant par les zones humides).

I.2.8 Réservoir continu (rescon) :

Ce modèle met en parallèle deux réservoirs. Le premier réservoir est celui dans lequel l'écoulement principal se réalise. Sa vidange est linéaire (paramètre x_1) et il possède un niveau de remplissage maximal (paramètre x_2). Lorsqu'il est plein, l'écoulement transite par le second réservoir dont la vidange est linéaire (paramètre x_3).

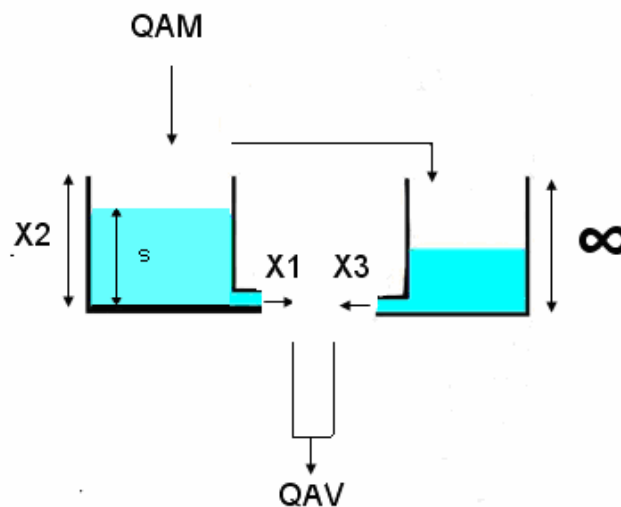


Figure 12: Schéma de la fonction de routage réservoir continu

Ce modèle à trois paramètres tout comme le réservoir débordant a été imaginé dans le cadre du stage pour mieux rendre compte de l'écoulement en période de crue lors de débordement du lit mineur (par exemple en transitant par les zones humides).

II.2.9 Synthèse

Nom du modèle	Notation utilisée	Nombre de paramètre	Principe de modélisation
Délai	del	1	Le débit amont est reporté à la station aval avec un paramètre de délai fixe
Hydrogramme unitaire	Hu	1	Le débit amont est transféré à l'aide d'un hydrogramme unitaire triangulaire de longueur variable (1 paramètre).
Réservoir linéaire	Reslin	1	Le débit amont est transféré à l'aide d'un réservoir de vidange linéaire.
Lag an Route	Lag	2	Le débit amont est délayé (1 paramètre) puis transite par un réservoir biquadratique (1 paramètre).
Routage GR4J	Grt	2	Séparation du débit entre une branche rapide (modulée par un hydrogramme unitaire) et une branche lente (modulée par un hydrogramme et un réservoir).
Muskingum	mus	2	Le débit amont est séparé en un écoulement direct instantané et un écoulement retardé par un réservoir de transfert linéaire. Un paramètre définit le taux de séparation et l'autre la capacité du réservoir.
Réservoir débordant	Resdeb	3	Le débit amont transite par un réservoir de vidange linéaire (1 paramètre) si celui-ci déborde (1 paramètre) le débit excédant transite par un hydrogramme unitaire (1 paramètre)
Réservoir continu	Rescon	3	Même fonctionnement que le réservoir débordant mais le débit qui déborde passe dans un nouveau réservoir à vidange linéaire.

Tableau 2 : Différents modèles débit-débit utilisés

II.3 Comparaison des réponses des modèles exemple : sur deux biefs

Nous avons sélectionné deux couples de station amont-aval entre le Thon à Origny-en-Thierache (258 km²) et l'Oise à Monceau (852 km²) (bief Oise) et sur la Seine entre Courtenot (2380km²) et Troyes (3410km²) (bief Seine). Pour tester les réponses des différents modèles de transfert, nous avons d'abord réalisé le calage sur les données réelles. Cette phase de calage permet l'obtention des paramètres. Ensuite nous modifions la chronique d'entrée(Q_{am}). Nous avons imposé la chronique de débit amont, afin de réaliser une impulsion théorique « triangulaire » avec un maximum de crue égal à six fois le module du débit amont. Pendant les 2 jours qui précèdent l'impulsion nous avons imposé une entrée nulle ($Q_{am} = 0$). En effet la chronique qui précède à une incidence sur le niveau de remplissage des différents réservoirs qui sont présents au sein des modèles de transfert, ainsi que sur les autres fonctions qui ont un effet mémoire. Enfin nous réalisons une simulation des différents modèles calés préalablement à cet hydrogramme amont.

Nous allons observer les hydrogrammes du débit aval simulés. Les résultats seront commentés suivant trois points importants :

- l'atténuation du pic de crue
- temps d'arrivée du pic de crue
- effet mémoire

Les figures 13 et 14 montrent la réponse des différents modèles à l'impulsion de crue en amont.

II Modélisation couplée débit-débit et pluie-débit

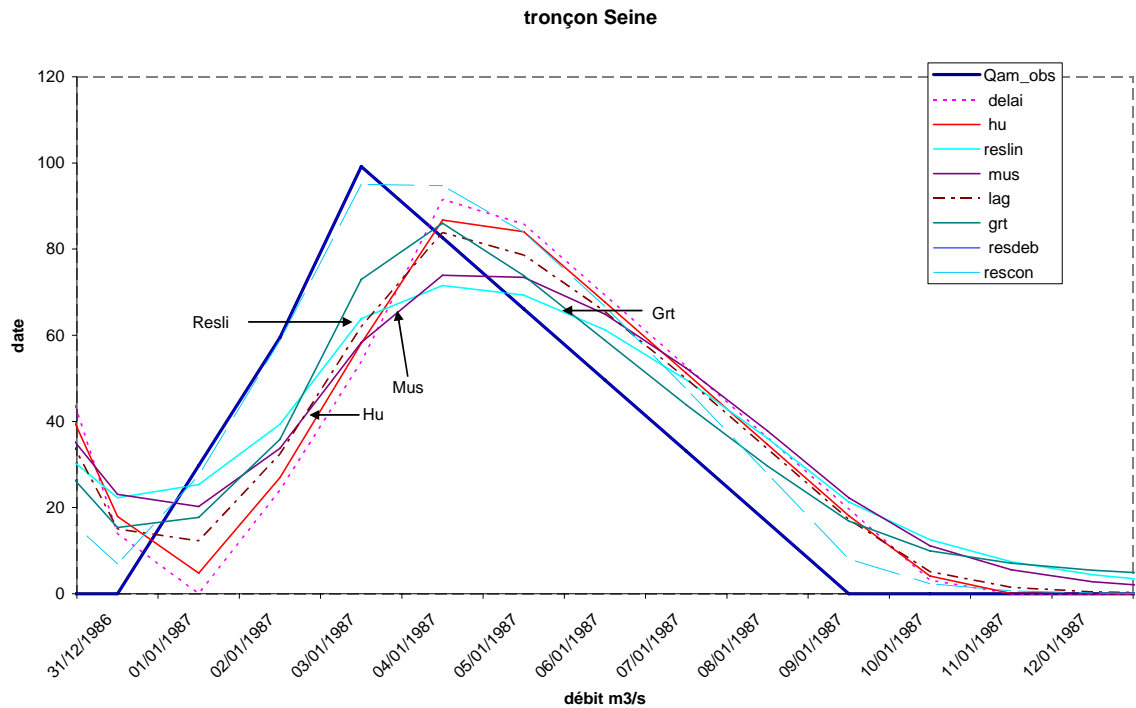


Figure 13: Hydrogramme des débits aval obtenus avec les fonctions de routage sur le bief de la Seine

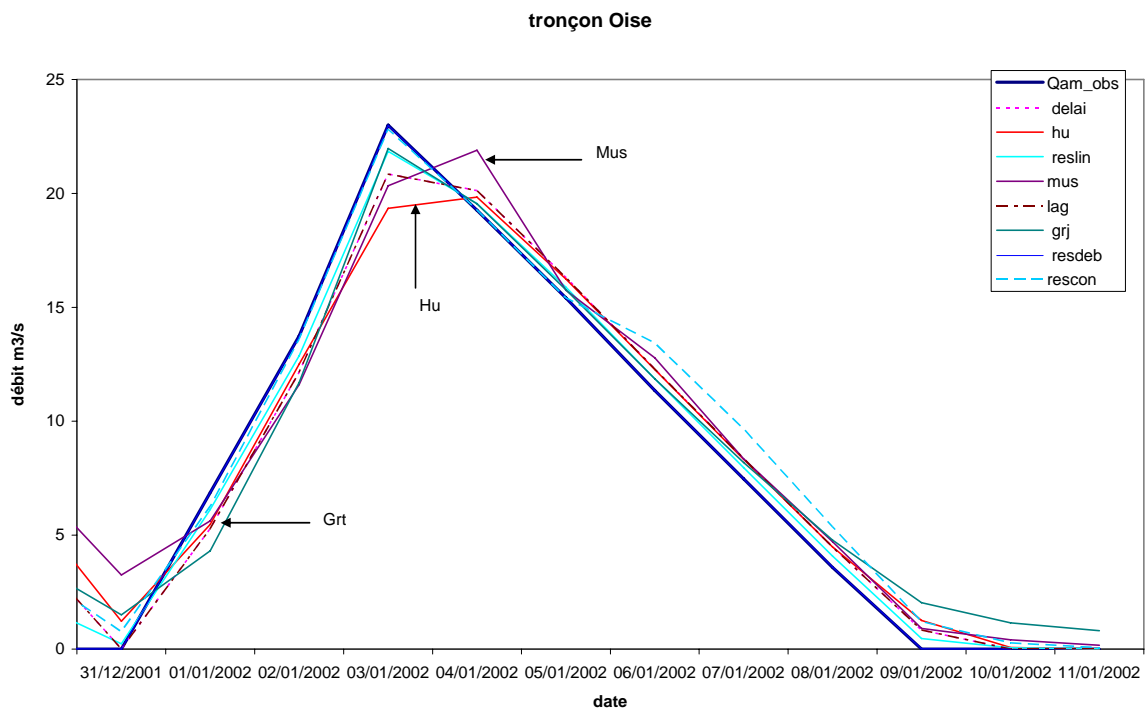


Figure 14 : Hydrogramme des débits aval obtenus avec les fonctions de routage sur le bief Oise

On observe des réponses plus variées pour le bief Seine que pour le bief Oise pour lesquels les hydrogrammes de débit transféré sont très proches de l'hydrogramme amont

imposé. Au contraire toutes les fonctions de routage ont une allure bien distincte sur le bief Seine, on note tout de même un décalage d'une journée de l'arrivée de l'onde d'impulsion à la station aval. Le pic de crue imposé à l'amont est de 23m³/s pour le bief Oise et de 100m³/s pour le bief Seine. Celui-ci est-il atténué par les fonctions de routage ?

Pour le bief Oise l'hydrogramme unitaire est celui qui a la réponse la plus atténuée avec 5m³/s en moins au moment du pic de crue. Suivent le délai et le Lag and Route avec 3m³/s de moins, le réservoir linéaire, Grt et Muskingum avec une atténuation de moins de 2m³/s. Enfin, les modèles à trois paramètres n'ont aucune atténuation.

Pour le bief Seine le réservoir linéaire et Muskingum sont ceux qui sont le plus atténués avec environ 25m³/s de moins que l'impulsion en amont. Ensuite l'hydrogramme unitaire, Grt, Lag and Route avec un abaissement du pic de crue d'une dizaine de m³/s, le délai et les réservoirs débordant et continu sont très proches de l'impulsion.

Pour ce qui est du temps d'arrivée du pic de crue pour le bief Oise il arrive le même jour que l'impulsion pour tous les modèles sauf pour Mus et Hu où il est décalé d'une journée. En ce qui concerne le bief Seine tous les modèles à l'exception des modèles à trois paramètres simulent un pic de crue décalé d'une journée. La longueur des deux biefs Oise et Seine est d'environ 40 kilomètres. Il est étonnant de voir que sur le bief Oise le débit transféré arrive pour la majorité des modèles de transfert le même jour que l'impulsion. Il est possible que durant la phase de calage de la modélisation couplée. Comme le débit aval est très supérieur au débit amont le temps de transfert de la fonction de routage soit erroné.

Enfin, l'effet de la mise à zéro durant deux jours avant l'impulsion va nous permettre de connaître l'effet mémoire des modèles. On note pour le bief Oise les modèles de routage mus, Grt Hu et le réservoir continu simulent encore un débit non nul quand les autres modèles repassent par zéro. Pour le bief Seine seul le délai repasse par le zéro le jour suivant le début de l'impulsion.

Soulignons que ces analyses ne sont valables que pour ces jeux de paramètres sur ces bassins. En effet, c'est la valeur du paramètre qui va dicter la réponse du modèle. Toutes les réponses des modèles sont différentes, mais il serait intéressant de voir s'il n'existe pas un lien entre les paramètres des modèles.

II.4 Performances des modèles de transfert sur les biefs étudiés

II.4.1 Méthodologie d'évaluation des modèles

Conformément à la méthodologie préconisée par Klemes, (1986), les chroniques ont été scindées en deux périodes, la première servant au calage (après une période de mise en route du modèle) et la seconde au contrôle. Ces périodes sont échangées dans une nouvelle exécution du programme. Nous présenterons donc ici les performances calculées sur la période de contrôle.

Calage

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques aux paramètres des modèles pour reproduire au mieux la réponse observée. C'est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètres. Nous réalisons cette opération par une procédure d'optimisation en cherchant la valeur optimale d'un critère donné qui améliore la cohérence entre les réponses observée et simulée du bassin. Ici la procédure de calage est basée sur une recherche d'optimisation par gradient évolutif (Edijatno, 1999).

Contrôle-validation

Une fois le modèle hydrologique calé se pose la question de savoir quelle est la capacité de celui-ci de simuler le débit observé ? C'est l'étape du contrôle qui doit répondre à cette question. Cela consiste à vérifier la reproductibilité des résultats du modèle sur une série de données non utilisées durant la phase de calage. On utilisera comme critère numérique d'évaluation le critère de Nash et Sutcliffe, 1970 définit par :

$$Nash = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{obs,j} - Q_{cal,j})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{obs,j} - \overline{Q_{obs}})^2} \right] \times 100$$

Avec $Q_{obs,j}$ et $Q_{cal,j}$ sont respectivement les débits observés et simulés au pas de temps, j, n le nombre total de pas de temps et $\overline{Q_{obs}}$ la moyenne des débits observés sur la période d'étude.

De plus, chacun des modèles de routage a été testé sur l'ensemble des couples amont-aval, cette modélisation n'est pas uniquement réalisée avec des modèles de transfert mais couplée avec un modèle pluie-débit pour simuler les apports latéraux (modélisation des apports du bassin intermédiaire). En effet, celle-ci paraît inévitable car l'hétérogénéité des

rappports de surface de bassin amont bassin aval induit que le débit amont ne peut expliquer à lui seul le débit aval à travers une fonction de routage. Rappelons qu'en moyenne sur les biefs étudiés la surface des bassins intermédiaires (b_{vi}) est supérieure à celle des bassins versants amont. En termes de volume, le débit simulé par le modèle GR4J est donc généralement supérieur au débit simulé par le modèle de transfert.

II.4.2 Performances générales

Les performances sont estimées par le critère de Nash. Dans un premier temps nous avons réalisé une modélisation globale pluie-débit (GR4J) sur l'ensemble des bassins versant aval afin d'obtenir une référence de modélisation, qui va nous permettre de mesurer l'apport de la modélisation couplée.

La figure 15 indique les distributions des critères de Nash obtenus au contrôle sur l'ensemble des couples. Les performances sont présentées à l'aide de boîtes à moustaches représentant les quantiles 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9 et permettent ainsi d'avoir un aperçu simplifié de la distribution des critères de performances obtenus.

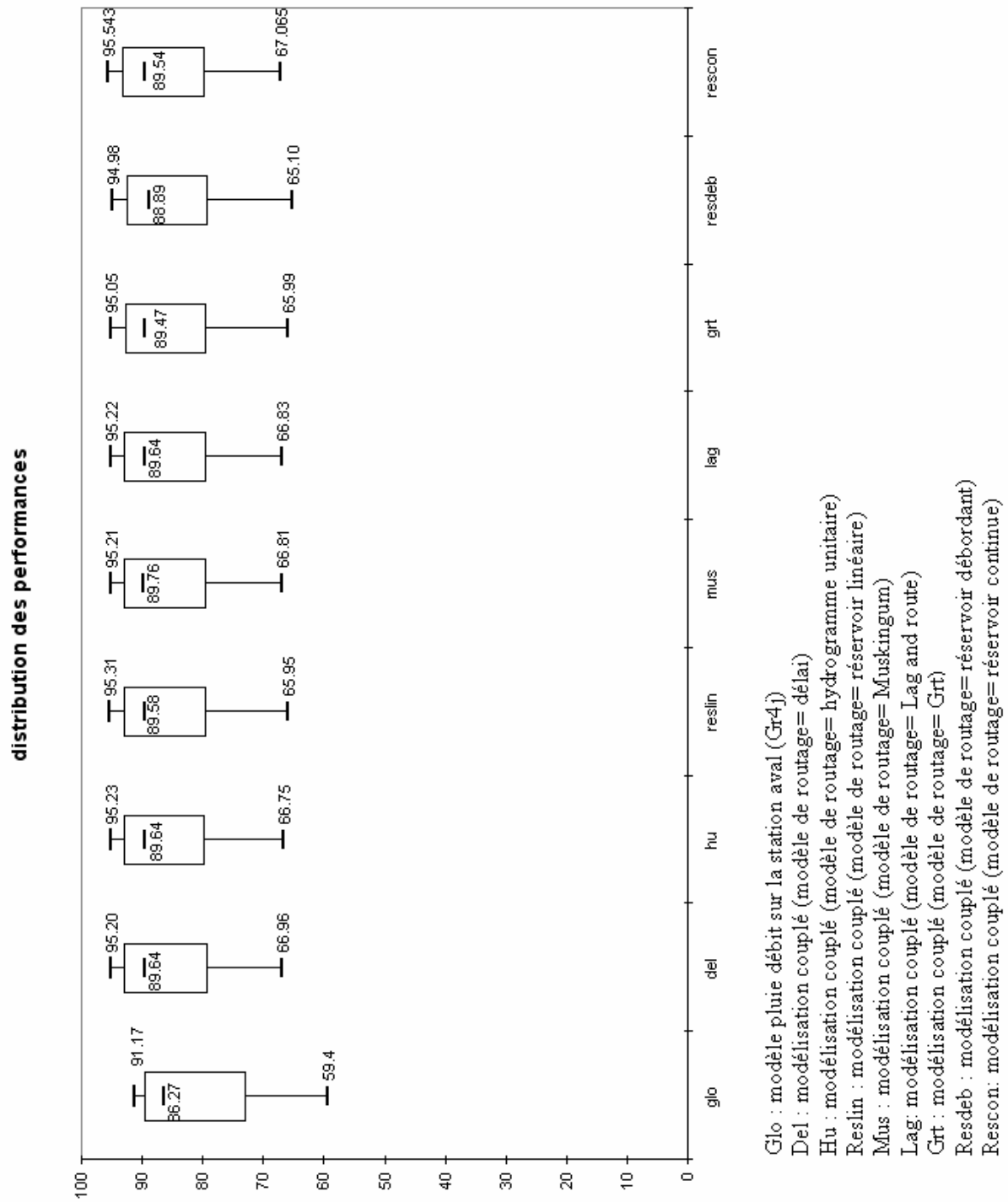


Figure 15: Boîte à moustache représentant les distributions des performances obtenues avec la modélisation couplée

On observe une nette amélioration lorsque l'on utilise la modélisation couplée par rapport à une simple modélisation globale avec GR4J. Les résultats obtenus avec la modélisation couplée permettent de gagner trois points pour la médiane et le quantile 0.9 en comparaison d'une modélisation globale pluie-débit. Par contre il ne semble pas qu'une fonction de routage sorte du lot. Il existe en effet une grande homogénéité dans les performances obtenues. Il paraît important de regarder si des modèles à trois paramètres ne seraient pas surparamétrés ou encore s'il n'existe pas de lien entre les paramètres des différents modèles de routage.

Nous avons également calculé un critère de Nash basé uniquement sur les débits de crue afin de discriminer les différents modèles de transfert. C'est-à-dire que dans le calcul du critère de Nash ne sont pris en compte que les débits qui sont supérieur au débit moyen : ces performances sont reportées sur la figure 16.

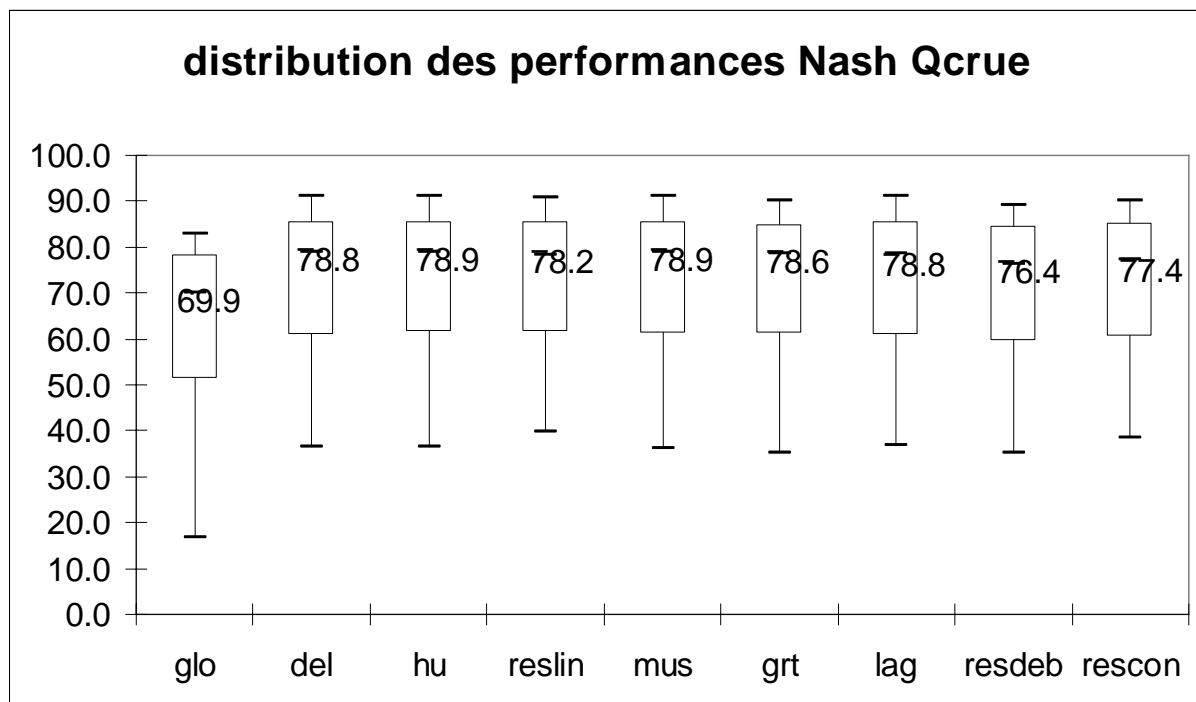


Figure 16: Distribution des performances évaluées avec le critère de Nash sur les débits de crue.

Les performances ainsi obtenues sont bien moins bonnes que celle où nous utilisons toute la période de débits pour calculer le critère de Nash. Il est toutefois très intéressant de voir que la modélisation couplée permet de gagner 10 point pour la médiane en comparaison à la modélisation globale. Il est donc d'autant plus important d'utiliser une modélisation couplée afin de simuler les débits de crue. En revanche les différents modèles de transfert restent très proches en termes de performances.

Stabilité de performances obtenues

Les performances obtenues au contrôle sur les critères de Nash sont très satisfaisantes. Cependant il est troublant de voir que les résultats sont très similaires avec les différentes fonctions de routage testées. Ce constat s'applique également si l'on choisit d'optimiser les paramètres sur un autre critère durant la phase de calage (Nash sur les débits, les racines des débits, les débits de crue ou les débits au carré) afin d'obtenir des simulations plus fines sur les périodes de crues ou d'étiages.

Ainsi nous allons continuer notre étude avec 3 fonctions de routage :

- La première à un paramètre (l'hydrogramme unitaire)
- la seconde à deux paramètres (Muskingum)
- la dernière à trois paramètres (le réservoir continu)

Ce choix a été guidé par les performances de chacun de ces modèles, la diversité de leurs structures et du nombre de paramètres.

II.3.Vers une relation entre les performances et les caractéristiques hydro géomorphologique

Nous avons choisit une sélection de 135 couples pour réaliser une étude globale au niveau du bassin de la Seine. Nous avons donc une grande hétérogénéité de biefs. Avec des longueur variant entre 2.5km et 100km, ceci a une influence sur les performances de notre modélisation on remarque très nettement sur la figure 17 que plus la longueur du bief est importante moins nous obtenons de bonnes performances. Sur la figure 18 on a représenté les performances en fonction de la contribution de la superficie du bassin amont par rapport a celle du bassin aval, on note que les performances de la modélisation est plus efficace quand la contribution est élevée et ou les apports latéraux sont négligeables. On note toutefois comme attendu que la modélisation globale pluie-débit suit les mêmes tendances que la modélisation couplée avec des performances moins importantes. En effet la modélisation pluie-débit n'est pas influencée par la longueur du chenal, et voit ces performances se stabiliser. Au contraire de la figure 18 où on peut poser comme hypothèse que c'est la modélisation pluie débit qui va dicter ces variations de performances a la modélisation couplée. Même si les écarts absolus entre la modélisation coupée et la modélisation globale restent significativement en faveur de la modélisation couplée.

II Modélisation couplée débit-débit et pluie-débit

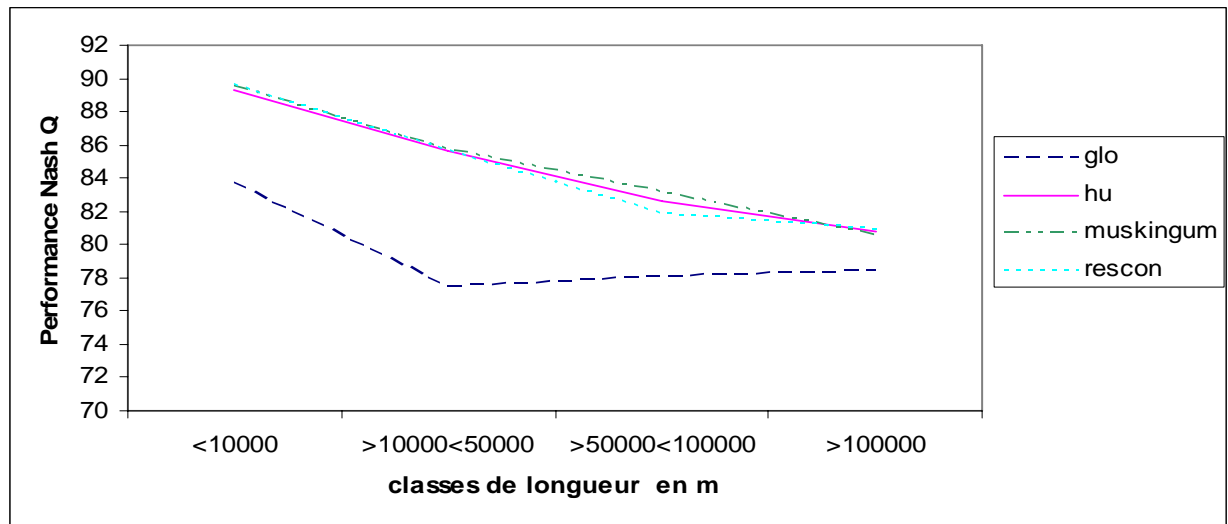


Figure 17 : Performances de la modélisation en fonction de la longueur du bief

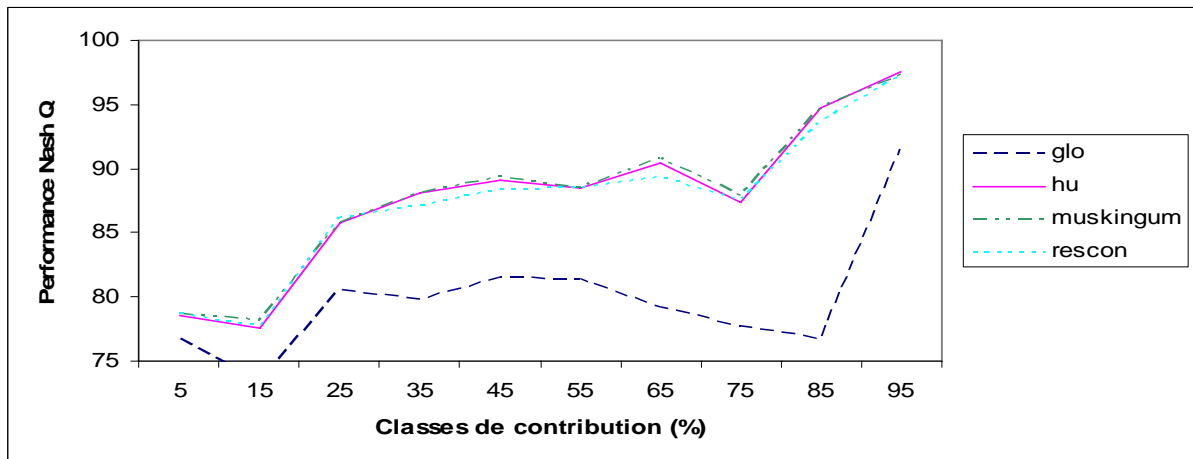


Figure 18 : Performances de la modélisation en fonction de la contribution du bassin amont

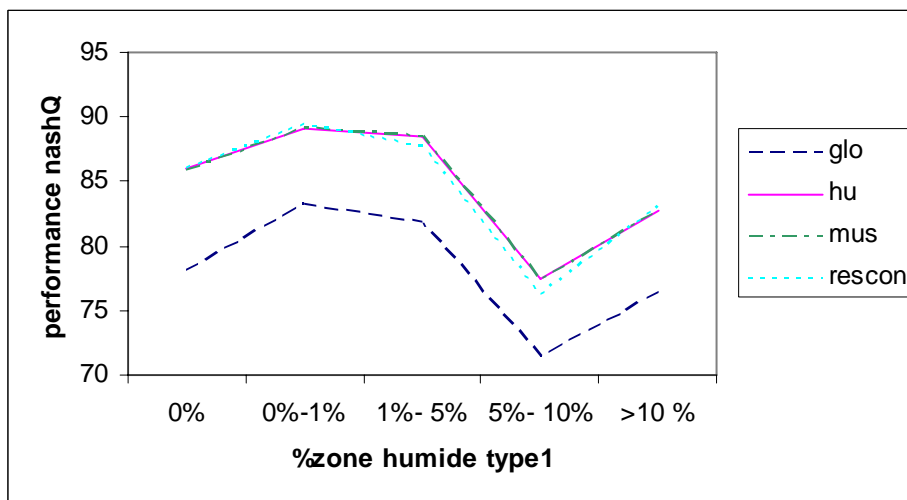


Figure 19 : Performances de la modélisation

Les biefs sélectionnés ne comportent pas tous des zones humides bien identifiées. L'une des caractéristiques des zones humides est leur rôle dans l'écrêtement des crues. Ainsi dans nos 135 biefs certains d'entre eux possèdent plus ou moins de zones dites humides, ainsi il semble intéressant de voir l'influence de ces zones sur les performances de notre modélisation. On peut espérer que plus la surface de zones humides augmente, plus les modèles complexes (Rescon) vont être performants par rapports aux modèles simples. La figure 19 montre que les écarts entre modèles global et modélisation couplée sont stables en fonction du pourcentage de zones humides du bief. De même les trois modèles de transfert ont des performances équivalentes.

II.5 Limites de la modélisation couplée

La modélisation couplée sur une sélection de 135 couples du bassin de la seine, avec des caractéristiques de biefs très variées nous permet d'obtenir des paramètres de modélisation sur chacun de ces biefs, mais cet éventail de couples implique également que les longueurs des biefs sont importantes et que la modélisation pluie débit joue un rôle majeur dans les performances de la simulation.

II.5.1 Interactions entre les paramètres de gr4j et du module de routage

Est-il possible que les réponses simulées avec les différentes fonctions de routage, soient influencées par le modèle pluie-débit ? On peut penser que durant la phase de calage de la modélisation couplée qui cale simultanément les paramètres de GR4J et ceux de la fonction de routage il existe des interactions entre les paramètres. Si la simulation du débit amont transféré est défectueuse, les paramètres de GR4J vont s'ajuster pour compenser celle-ci. En effet dans notre principe de modélisation couplée le modèle pluie-débit sert à simuler les apports latéraux. Ainsi les quatre paramètres de GR4J doivent être sensiblement les mêmes pour un bassin donné lorsque l'on modifie le modèle de transfert. Pour voir s'il n'existe pas d'interactions entre les paramètres de GR4J et ceux des modèles de routage, nous allons faire un test de corrélation entre les valeurs de chacun des paramètres du modèle pluie-débit calés en association avec les différents modèles de transfert, les coefficients de déterminations ainsi obtenus sont regroupés dans le tableau 3.

II Modélisation couplée débit-débit et pluie-débit

x1	del	mus	grt	hu	resdeb	rescon	reslin	lag
del	1							
mus	0.99	1						
grt	0.64	0.65	1					
hu	0.99	1.00	0.65	1				
resdeb	0.98	0.98	0.58	0.98	1			
rescon	0.93	0.94	0.64	0.94	0.93	1		
reslin	0.99	1.00	0.65	1.00	0.98	0.94	1	
lag	0.98	0.97	0.67	0.97	0.96	0.94	0.97	1

x2	del	mus	grt	hu	resdeb	rescon	reslin	lag
del	1							
mus	0.91	1						
grt	0.71	0.65	1					
hu	0.91	0.99	0.64	1				
resdeb	0.89	0.97	0.62	0.97	1			
rescon	0.87	0.91	0.61	0.91	0.90	1		
reslin	0.93	0.97	0.65	0.97	0.95	0.92	1	
lag	0.99	0.90	0.73	0.91	0.89	0.88	0.91	1

x3	del	mus	grt	hu	resdeb	rescon	reslin	lag
del	1							
mus	0.83	1						
grt	0.74	0.74	1					
hu	0.88	0.80	0.77	1				
resdeb	0.76	0.78	0.71	0.78	1			
rescon	0.80	0.85	0.68	0.72	0.86	1		
reslin	0.83	0.86	0.81	0.88	0.85	0.83	1	
lag	0.90	0.86	0.77	0.89	0.80	0.78	0.89	1

x4	del	mus	grt	hu	resdeb	rescon	reslin	lag
del	1							
mus	0.87	1						
grt	0.76	0.88	1					
hu	0.86	0.99	0.89	1				
resdeb	0.81	0.95	0.85	0.96	1			
rescon	0.73	0.81	0.73	0.82	0.85	1		
reslin	0.86	0.99	0.89	0.99	0.94	0.82	1	
lag	0.97	0.88	0.78	0.87	0.80	0.72	0.87	1

Tableau 3 : Valeur des coefficients de corrélation entre paramètre de gr4j obtenu avec chaque module de routage

Ici les coefficients de corrélation ont pour moyenne 0.86. Au vue de ces très bonnes corrélations de chacun des paramètres de GR4J obtenus avec les différentes fonctions de routage. A priori la modélisation pluie-débit joue bien sont rôle de simuler les apports latéraux sans interactions avec la modélisation débit-débit et ne compense les défaillances de cette operateurs. Ce résultat est rassurant, notamment en vue de mettre en relation les valeurs des paramètres des modèles débit-débit avec les caractéristiques du bief étudié.

II.5.2 Mimétisme des fonctions de routage

Nous venons de voir que les apports latéraux varient peu pour un bassin intermédiaire donné pourtant même si les performances de la modélisation couplée avec les différents modèles de routage obtiennent toutes de meilleurs résultats qu'une modélisation globale,

II Modélisation couplée débit-débit et pluie-débit

leurs performances respectives sont très homogènes. De plus la structure de chacune de ces fonctions de routage est différente même si elles se basent toutes sur l'équation de la conservation de la masse. Nous proposons ici une méthode pour tester la capacité de ces modèles à simuler une réponse identique. Pour cela nous allons utiliser la réponse d'un modèle (Muskingum) comme référence afin de voir si les autres modèles sont capables de reproduire ce débit, cherche donc pour chaque modèles un jeu de paramètre capable d'imiter la réponse de Muskingum. Tout d'abord on va effectuer une première série de simulation afin de connaître le débit amont transféré par la méthode de Muskingum. On obtient donc pour chacun des biefs d'études une chronique de débit amont transféré. C'est cette série qui va nous servir de référence pour caler les autres fonctions de transfert. Ainsi nous ne réalisons ce test uniquement en calage sur toute la période afin d'étudier la capacité des fonctions de routage à simuler la même réponse que celle de Muskingum. Nous utilisons deux critères de Nash pour discuter des performances le premier sur les débits et le second sur les débits de crue (débit supérieur au débit moyen). La figure 20 représente la distribution des performances obtenues avec un tel test.

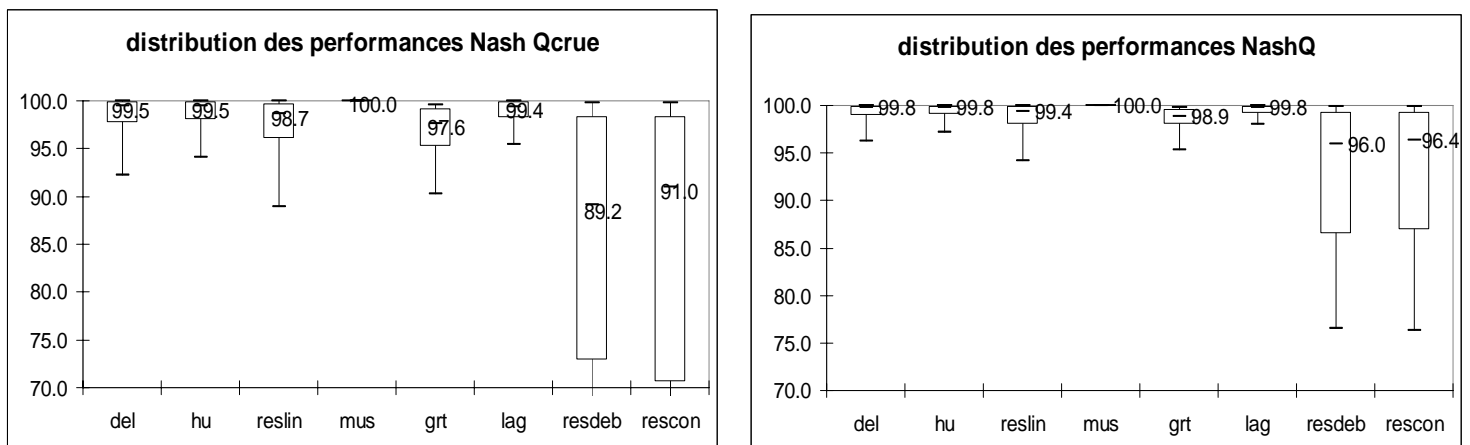


Figure 20 : Distribution des performances (Nash Q crue, Nash Q) des modèles de routage

La figure 20 nous montre que hormis les deux modèles à trois paramètres (réservoir débordant et réservoir continu) les modèles de transfert obtiennent des performances médianes très proches de 100%. Ceci nous montre que chacun des modèles a la capacité à trouver un jeu de paramètre capable de produire une réponse très semblable à Muskingum.

Ainsi chacun des modèles arrive, avec l'étendue des paramètres qu'ils peuvent avoir à obtenir le débit simulé par la méthode de Muskingum.

III Relation entre paramètres de modélisation et caractéristiques hydro géomorphologique

L'objectif de cette partie est d'analyser les paramètres des modèles et de tenter de les mettre en relation avec les données hydro géomorphologiques des biefs étudiés. Cette méthode est dite descendante c'est-à-dire que l'on obtient des paramètres des modèles en les optimisant sur les mesures observées. On aurait pu comme Tewolde (2005) pour la méthode de Muskingum avoir une technique plus ascendante qui consiste à partir des caractéristiques du bief afin d'estimer la valeur des paramètres. Ici, nous nous intéressons principalement au transfert de débit entre deux stations et nous allons analyser uniquement les paramètres des modèles de transfert, nous allons tenter d'analyser ces relation pour trois fonctions de routage : l'hydrogramme unitaire (1 paramètre), Muskingum (2 paramètres) et le réservoir continu (3 paramètres). Le choix de ces modèles s'explique par la diversité de leur nombre de paramètre et de leur structure. Ainsi nous tenterons d'expliquer les paramètres de la modélisation couplée pluie-débit débit-débit par les attributs du bief : longueur, largeur, pente, sinuosité ... Après de simples tests de corrélations entre les caractéristiques hydro géomorphologique qui nous renseignent sur l'indépendance de ces variables, nous rechercherons des équations de régression entre paramètres des modèles et caractéristique hydro géomorphologiques. Les équations de régression obtenues seront ensuite utilisées en situation de bassins non jaugés. C'est-à-dire que le(s) paramètre(s) des modèles de routage seront obtenus non pas par calage mais par les équations de régression. La figure 21 est un schéma récapitulatif du principe de la méthode employé pour obtenir les paramètres des modèles.

III Relation entre paramètres de modélisation et caractéristiques hydro géomorphologique

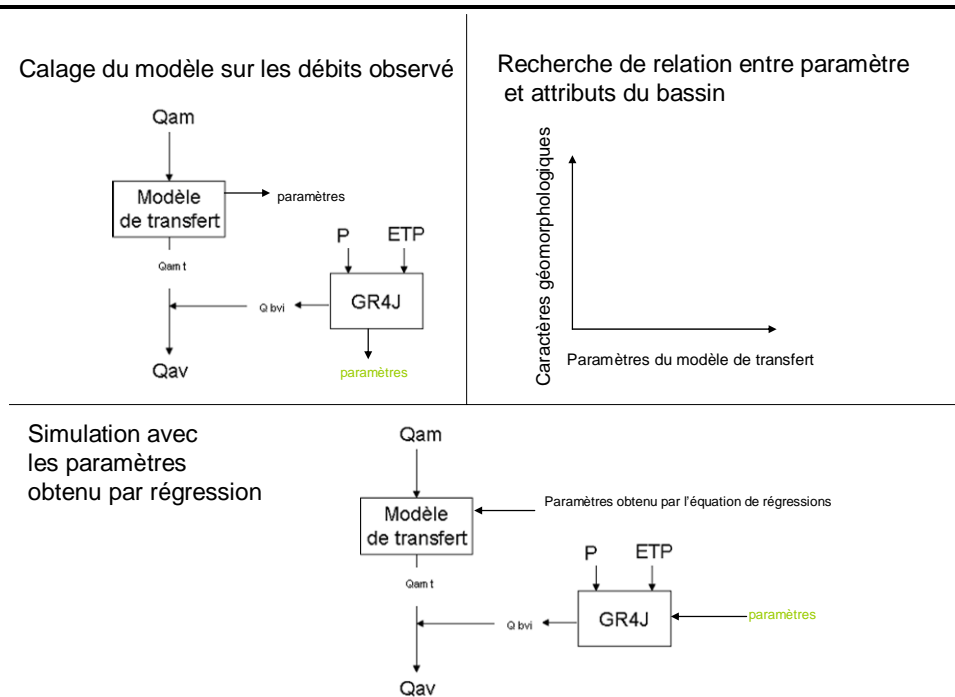


Figure 21: Principe de la méthode descendante utilisée dans cette partie

III.1 Indépendances des caractères hydro géomorphologiques

Le but de cette étape est l'acquisition des paramètres de la fonction de routage en vue d'une application de la méthode de modélisation sur des bassins non jaugés ; c'est pourquoi nous nous intéressons aux caractéristiques des biefs. Nous avons à notre disposition dans la base de données hydro-géomorphologique présentées dans la première partie un ensemble de descripteurs simples : la longueur des biefs, la largeur moyenne, la pente moyenne, la profondeur moyenne (prof), la sinuosité³(sin), le pourcentage de zones humides de type 1 (%zh typ1) qui comprend les cours d'eaux temporaires , les gravières et autres bras morts présents sur le corridor. Toutes ces variables sont des variables quantitatives ce qui facilitera notre analyse; nous allons dans un premier temps étudier si ces variables sont dépendantes les unes des autres à travers un test de corrélations.

Le coefficient de corrélation (r) est : le rapport de la covariance (cov) aux produits des écarts types (Sx et Sy) des variables.

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{Sx.Sy}$$

³ La sinuosité est le rapport entre la longueur du bief et la distance euclidienne entre les deux stations

III Relation entre paramètres de modélisation et caractéristiques hydro géomorphologique

Cette définition montre que le coefficient de corrélation a le même signe que la covariance et qu'il est toujours compris entre -1 et 1. Ce coefficient de corrélation dans le cas d'une analyse à deux variables X et Y est égal à la racine carrée du coefficient de détermination de la régression linéaire entre ces deux variables, il permet d'estimer la netteté de la liaison existant entre deux séries d'observations. Ainsi si la valeur absolue du coefficient de corrélation est égale à 1 les variables sont dépendantes l'une de l'autre et si ce coefficient est proche de 0 les variables sont indépendantes.

<i>r</i>	<i>longueur</i>	<i>pente</i>	<i>largeur</i>	<i>prof</i>	<i>%zh typ1</i>	<i>sin</i>
longueur	1					
pente	-0.04	1				
largeur	0.41	-0.19	1			
prof	0.40	-0.21	0.74	1		
%zh typ1	0.07	-0.02	0.13	0.21	1	
sin	0.42	0.00	0.11	0.25	-0.15	1

Tableau 4 : Coefficients de corrélation entre les caractéristiques des biefs

On peut voir dans le tableau 4 que les deux variables qui sont les plus corrélées sont la largeur et la profondeur ($r=0.74$) ; puis la longueur avec la largeur, la profondeur et la sinuosité ou le $r=0.40$. Ces coefficients montrent que les variables ne sont pas totalement indépendantes les unes des autres, mais comme notre étude repose sur le bassin de la Seine on peut penser qu'il existe effectivement une similitude de ces caractéristiques, due à la formation du lit des rivières ; ainsi la variabilité de la sinuosité dépend de l'encaissement et de la force érosive. Au sein du bassin de la Seine il existe dans le temps et l'espace une certaine homogénéité climatique et géologique; c'est pourquoi si nous travaillions sur un ensemble de stations réparties sur des bassins dans des régions et des climats variés il aurait été surprenant de voir de telles relations entre les caractères hydrogéomorphologiques des biefs.

III.2 Recherche de relations entre paramètres de modélisation et des caractéristiques des biefs

Dans un premier temps nous allons nous pencher sur des régressions simples entre les paramètres des fonctions de routage et chacun des caractères hydro géomorphologiques, puis

nous réaliserons des régressions multiples. Le but est d'essayer d'analyser les variations des paramètres de la modélisation par la variation des caractères géomorphologiques. À la différence de la partie précédente sur les performances de la modélisation ou nous avons deux jeux de paramètres obtenus pour les deux périodes de calage (pour la procédure de calage contrôle). Nous calons ici les modèles sur l'ensemble de la chronique afin d'obtenir des paramètres de modélisation les plus robustes possibles. Nous avons donc entre cinq et sept paramètres ; quatre pour le modèle pluie-débit qui gère la modélisation des apports latéraux et de un à trois pour le modèle de transfert amont/aval. Nous n'utiliserons pour les régressions seulement les paramètres des fonctions de routage.

III.2.1 Régression simple

Nous examinons ici les corrélations simples entre les paramètres des modèles de transfert et les attributs des biefs afin d'identifier les probables relations existante. La figure 22 illustre les relations existant entre les paramètres de l'hydrogramme unitaire et les attributs du bief.

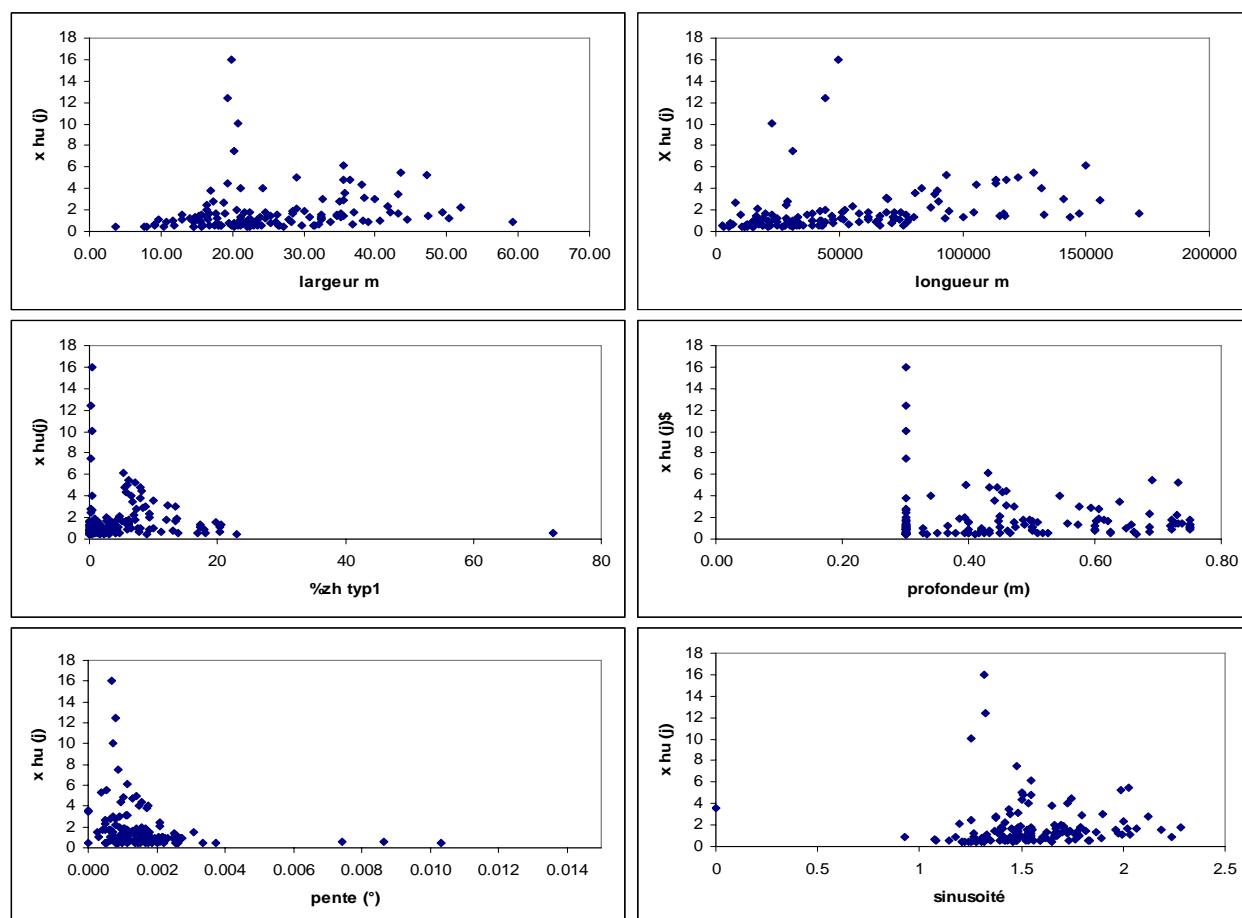


Figure 22 : Valeur du paramètre de l'hydrogramme unitaire (x hu) en fonction des différents caractères morphologiques

On peut observer sur la figure 22 qu'il existe une relation entre la valeur du paramètre qui augmente avec : la longueur et la largeur, ce qui est intuitif : une longueur de bief plus grande entraîne un temps de base de l'hydrogramme unitaire plus long. Pour les autres caractères géomorphologiques il ne semble pas exister de relation évidente. Pour confirmer cette impression nous avons réalisé des régressions linéaires simples entre les attributs des biefs et les paramètres des trois modèles sélectionnés. Le tableau 5 synthétise les résultats obtenus en indiquant le coefficient de détermination (r^2) des équations de régression.

r^2	hu	mus 1	mus 2	rescon 1	rescon 2	rescon 3
longueur	0.09	0.09	0.01	0.13	0.01	0.08
pente	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00
largeur	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.04
prof	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00	0.01
%zh typ1	0.00	0.05	0.00	0.01	0.02	0.00
sin	0.00	0.02	0.00	0.03	0.03	0.02

Tableau 5 : Valeurs des coefficients de détermination r^2 , des régressions linéaire entre paramètre des modèles et caractéristiques des biefs.

Les régressions simples (de Y en X) cherchent à définir une relation existant entre une variable dépendante (valeur du paramètre de la modélisation) et une variable indépendante X (paramètre géomorphologique). Le tableau 5 regroupe l'ensemble des coefficients de détermination obtenus par régression. Ces coefficients sont tous proches de zéro indiquant qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les paramètres de la modélisation et les caractères géomorphologiques. Même s'il semblait qu'il existe une relation entre le paramètre de l'hydrogramme unitaire et la longueur du bief (cf. figure 22), le coefficient de détermination est très faible ($r^2=0.09$). Notons que ces coefficients de détermination peuvent apparaître très faibles (surtout pour les statisticiens) mais malheureusement ces coefficients sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par d'autres hydrologues (voir par exemple Merz et Bloschl, 2004) cherchant à relier paramètres calés des modèles hydrologiques et caractéristiques physiques des bassins versants.

N'ayant pas obtenu de relation linéaire satisfaisante entre paramètres et caractéristiques géomorphologique, nous nous sommes intéressés à la relation puissance en prenant les logarithmes des variables. Ainsi, au lieu d'avoir une relation du type : $Y = aX + cst$, nous cherchons une équation du type : $Y = bX^a$ reliant le paramètre à l'attribut du bief. Le tableau 6 regroupe les coefficients de détermination ainsi obtenus.

log	hu	mus 1	mus 2	rescon 1	rescon 2	rescon 3
longueur	0.28	0.19	0.23	0.23	0.02	0.03
pente	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01
largeur	0.12	0.07	0.07	0.02	0.01	0.01
prof	0.01	0.06	0.04	0.05	0.00	0.00
%zh typ1	0.00	0.08	0.01	0.04	0.02	0.00
sin	0.04	0.06	0.14	0.05	0.05	0.00

Tableau 6 : Valeurs des coefficients de détermination r^2 , des régressions linéaire entre paramètre des modèles et caractéristiques des biefs après transformation en logarithme.

Les valeurs du coefficient de détermination ainsi obtenues sont beaucoup plus favorables que les coefficients de détermination de la régression linéaires sans transformation préalable des variables. Quel que soit le paramètre, la relation la plus favorable est celle avec la longueur, avec des coefficients de détermination de :

- $r^2=0.28$ pour le paramètre de l'Hydrogramme unitaire
- $r^2=0.19$ pour le paramètre x (mus1) de Muskingum
- $r^2=0.23$ pour le paramètre k (mus2) de Muskingum
- $r^2=0.23$ pour le paramètre x_1 (rescon1) du réservoir continu

Notons également que la largeur permet d'obtenir un $r^2=0.12$ avec le paramètre de l'Hydrogramme unitaire et la sinuosité permet également d'obtenir un bon r^2 (0.14) pour le paramètre k de Muskingum. Ces coefficients de détermination sont probablement liés à la corrélation existant entre longueur et sinuosité. En revanche les paramètres x_2 et x_3 du réservoir continu sont très peu corrélées aux caractères géomorphologiques sélectionnés, ce qui renforce l'idée que ce modèle est sur paramétré (cf partie II .4).

III.2.1 Régressions multiples

Il n'est pas aisé d'expliquer les paramètres de modélisation à l'aide d'un seul caractère géomorphologique. On peut penser que l'association de plusieurs de ces caractéristiques permettra d'expliquer les paramètres des différents modèles de routage. C'est pourquoi nous avons réalisé une série de régressions linéaires multiples entre la valeur des différents paramètres obtenus par la modélisation et des combinaisons entre toutes les variables descriptives.

III Relation entre paramètres de modélisation et caractéristiques hydro géomorphologique

ddl	var1	var2	var3	var4	var5	var6	r ²
3	longueur	largeur	prof				0.18
4	longueur	pente	largeur	prof			0.19
4	longueur	largeur	prof	%zh typ1			0.18
4	longueur	largeur	prof	sin			0.19
5	longueur	pente	largeur	prof	%zh typ1		0.19
5	longueur	pente	largeur	prof	sin		0.20
5	longueur	largeur	prof	%zh typ1	sin		0.20
6	longueur	pente	largeur	prof	%zh typ1	sin=	0.20

Tableau 7 : Coefficients de détermination des régression multiples (ddl : degré de liberté ;var :variable)

Les régressions linéaires multiples présentées dans cette partie sont celle réalisées sur le paramètre de l'hydrogramme unitaire. Les régressions multiples permettent d'obtenir des coefficients de détermination plus favorables que les régressions linéaires simples (cf. tableau 7). Un test de significativité de l'impact de chaque variable descriptive est possible, via le calcul de la statistique t pour chacune des variables impliquées dans la régression : si la valeur calculée est supérieure à la valeur critique associé, alors on peut dire que la variable est significative. Le tableau 8 résume les statistiques t obtenues pour chacune des variables de la régression.

var1	var2	var3	var4	var5	var6	stat t var1	stat t var 2	stat t var 3	stat t var 4	stat t var 5	stat t var 6	t critique
longueur	largeur	prof				3.92	2.79	-3.76				2.35
longueur	pente	largeur	prof			3.97	-1.07	2.71	-3.86			2.13
longueur	largeur	prof	%zh typ1			3.90	2.76	-3.62	-0.55			2.13
longueur	largeur	prof	sin			4.12	2.45	-3.39	-1.30			2.13
longueur	pente	largeur	prof	%zh typ1		3.96	-1.05	2.69	-3.71	-0.53		2.01
longueur	pente	largeur	prof	sin		4.16	-1.03	2.39	-3.49	-1.27		2.01
longueur	largeur	prof	%zh typ1	sin		4.18	2.37	-3.12	-0.89	-1.48		2.01
longueur	pente	largeur	prof	%zh typ1	sin	4.22	-1.01	2.31	-3.22	-0.86	-1.44	1.94

Tableau 8 : Statistiques t associées a chacune des variables descriptives

La longueur reste la caractéristique expliquant le mieux la valeur des paramètres. Les deux autres caractéristiques expliquant de manière significative la régression sont la largeur et la profondeur.

III.3 Vers une application aux bassins non jaugés

Nous allons maintenant examiner le potentiel d'utilisation des caractères géomorphologiques pour la prévision des paramètres des modèles. Ceci visant à connaître quelle va être la capacité de simulation des modèles si leurs paramètres sont obtenus par régression des caractères hydro géomorphologiques. Pour cette étape nous allons utiliser les même couples que précédemment en leur imposant les valeurs de paramètres obtenus par les équations de régression développées partie III.2. Ceci est très important dans le cas de la simulation de débits à des stations non jaugées. Les performances ainsi obtenues seront forcément moins bonnes que celles obtenues par calage sur le débit observé.

III Relation entre paramètres de modélisation et caractéristiques hydro géomorphologique

Nous focaliserons notre analyse sur l'hydrogramme unitaire et allons utiliser l'équation de régression puissance du paramètre de l'hydrogramme unitaire avec la longueur uniquement. Rappelons que cette régression a un coefficient de détermination $r^2=0.28$. On obtient à l'aide des coefficients l'équation suivante : $Y = -2.08 X^{0.48}$

Celle-ci va nous donner pour chaque bief suivant sa longueur une valeur du paramètre de l'hydrogramme unitaire. Une phase de calage sur toute la période va nous donner quant à elle la valeur des paramètres du modèle GR4J. Nous imposons ensuite à notre modèle les valeurs de ces paramètres afin d'obtenir le débit simulé du bassin intermédiaire. Enfin nous allons calculer à partir de ce débit la valeur du critère de Nash. La figure 23 indique la distribution des critères de Nash obtenues en calant le paramètre du modèle et en utilisant le paramètre obtenu par l'équation de régression. Afin de comparer ces performances à des performances de référence, nous avons également indiqué les performances obtenues en appliquant la même valeurs de paramètre a tous les biefs

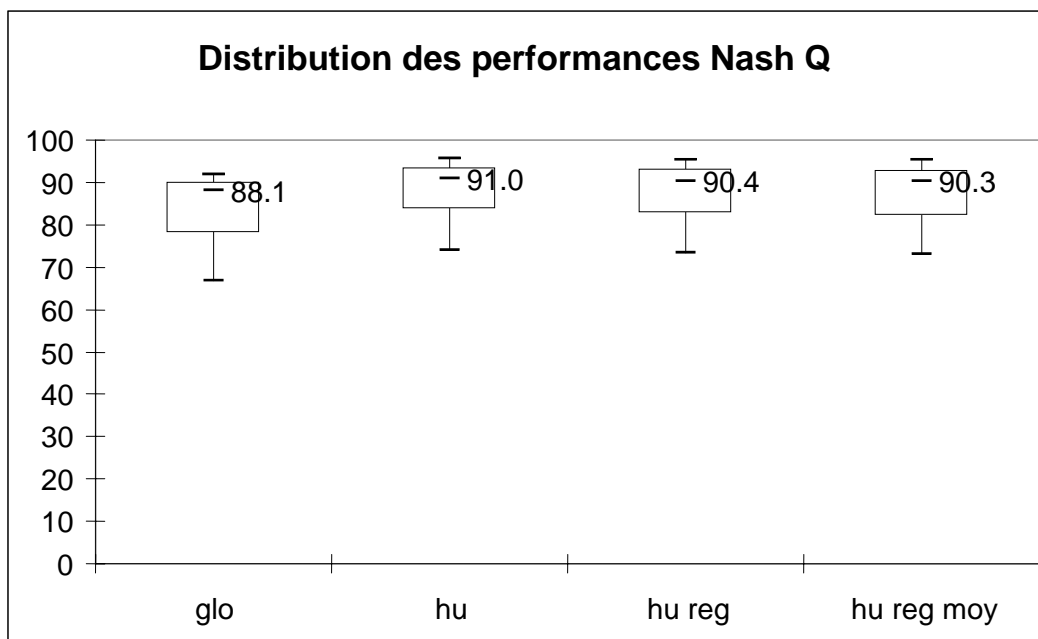


Figure 23 : Performance de l'hydrogramme unitaire avec des paramètres : calés (hu), obtenus par régression (hu reg), unique égale a la moyenne des paramètres obtenus par régression (hu reg moy)

La modélisation couplée est toujours meilleure que la modélisation globale pluie-débit. Les résultats obtenus à l'aide des paramètres calculés par régression sont très satisfaisants il est logique de voir que ceux-ci sont moins bons que les résultats de calage sur les débits observé. Si l'ajout d'une fonction de routage à un modèle pluie-débit permet de

III Relation entre paramètres de modélisation et caractéristiques hydro géomorphologique

meilleurs résultats il semble cependant que le choix d'un paramètres unique pour l'ensemble de couples du bassin de la Seine fournisse des performances tout aussi acceptables

Conclusion

L'objectif de notre recherche était double :

- Développer et tester une modélisation couplée pluie-débit et débit-débit adaptée au bassin versant de la seine
- Rechercher des relations entre caractères hydro géomorphologiques et paramètres des modèles, afin de caractériser le réponse des biefs aux crues.

Nous avons comparé les performances obtenues par le modèle GR4J avec la modélisation couplée au pas de temps journalier sur 135 biefs du bassin de la Seine. Les différentes fonctions de transfert présentées permettent d'obtenir de meilleures performances qu'une modélisation pluie-débit. Toutefois, il est assez difficile de faire un diagnostic sur la modélisation débit-débit. En effet, ce diagnostic est possible uniquement pour la modélisation couplée en terme volumique, la modélisation pluie-débit est en général plus importante que la modélisation débit-débit : le temps de transfert moyen entre deux stations est de 2 jours sur les 135 biefs d'étudiés. Il serait intéressant d'essayer de faire les simulations au pas de temps horaires, en effet au pas de temps journalier une fonction de routage à un paramètre permet une simulation aussi efficace que les fonctions de routage à plusieurs paramètres. L'étude au pas de temps journalier a été privilégié à celle à un pas de temps plus fin car nous souhaitions obtenir des résultats sur un nombre de couples assez important afin d'obtenir un panel hétérogène de bassins.

La deuxième étape a montré qu'il existe un lien entre les paramètres de la fonction de routage et les attributs moyen des biefs. Chaque bief ayant des caractéristiques particulières comme nous avons choisi une sélection hétérogène de plus de 135 couples, il serait possible d'affiner ces résultats en ce focalisant sur quelque bief ayant les mêmes caractéristiques (présence d'une superficie donnée de zone à dominante humide). La sélection des couples montre également que pour la majorité des biefs ce sont les apports latéraux qui dominant, le rôle de la fonction de transfert et des informations supplémentaire qu'elle apporte à la simulation permet d'améliorer les performances sans pour autant avoir un rôle prédominant.

Perspectives :

L'utilisation du pas de temps horaire permettrait elle de discriminer les performances obtenues par les différentes fonctions de routage ? Ceci sera vérifié sur un sous échantillon de celui utilisé dans ce rapport. De plus notre étude à porté sur un large nombre de bassins afin d'obtenir les conclusions les plus générales possibles.

Pour affiner notre recherche, il serait intéressant de se focaliser sur les biefs où la contribution du bassin amont est prioritaire, la fonction de routage aurait alors un poids plus important dans la simulation du débit à la station aval. Enfin, les équations de régression doivent être affiner en considérant des variables supplémentaires. Par exemples nous avons choisi dans un premier temps de nous focaliser sur les zones humides de types 1, il serait intéressant d'élargir le spectre des zones humides à d'autres types.

Références

Bibliographie:

Bentura, P.L.F., et Michel, 1997. Flood routing in a wide channel with a quadratic lag-and-route method, *Hydrological Sciences journal*, 42(2), 169-189

Fread, D.L., 1993. Flow routing. Chapter 10. In: D.R. Maidment (Editor), *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, pp. 1412 p.

Gaillard, S., et al 2002. Typologie et fonctions des zones humides riveraines. Rapport de synthèse, Programme PIREN-Seine 1998-2001 - UMR CNRS 7619 Sisyphe

Gomez, E., 2002. Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 287 pp.

Joyeux, E., 2005. Typologie des zones humides riveraines du bassin de la Seine et fonctions relatives à la qualité et au régime des eaux - University of Paris 6, Lyon, 90 pp.

Klemes, V., 1986. Operational testing of hydrologic simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1):13 - 24.

Linsley, R.K., 1949. Applied hydrology. Mc Graw Hill Book Co., New York, pp. 502-530.

Lerat, J., en cours. Nouvelles approches en modélisation hydrologique semi-distribuée, développements théoriques et applications. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Cemagref Antony, Paris.

Merz, R. et Blöschl, G., 2004. Regionalisation of catchment model parameters, *Journal of Hydrology*, 287, 95-123.

McCarthy, G.T., 1938. The unit hydrograph and flood routing, Conference of the North Atlantic Division of the US Army Corps of Engineers, New London, Connecticut.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River Flow Forecasting through conceptual models : part I - A : discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.

Oudin, L., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? part 1 can rainfall runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs, *Journal of Hydrology*, 303, 275 -289.

Perrin, C et al. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *journal of hydrology*, 279, 275-289

Ramírez, J. A., 2000. Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics. Chapter 11 of *Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities* Eds. Ellen Wohl; Cambridge University Press.

Tewolde, M.H., 2005. Flood Routing in Ungauged Catchments using Muskingum Methods. School of Bioresources Engineering and Environmental Hydrology, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, RSA.

Liste des figures :

Figure 1 : Géologie du Bassin de la Seine	6
Figure 2: Localisation des 110 stations hydrométriques	7
Figure 3 : Caractéristiques des couples sélectionnés: superficie des bassins amont(a), des bassins aval (b) longueur des chroniques (c) et rapport de surface (d)	8
Figure 4: Histogramme des couples par classes de : largeur, pente, profondeur, sinuosité, et longueur.....	14
Figure 5: Principe de modélisation couplée pluie-débit et débit-débit.....	17
Figure 6 : Exemple de la fonction délai avec un paramètre entier $x=1$ et un réel $x=0.2$	19
Figure 7 : Exemple de réponse de l'hydrogramme unitaire (HU).....	20
Figure 8: Exemple de réponse du réservoir à vidange linéaire ($x=1$)	21
Figure 9: Schéma du fonctionnement du modèle Lag and Route	22
Figure 10: Schéma du modèle Grt.....	23
Figure 11: Schéma conceptuel du fonctionnement du réservoir débordant	24
Figure 12: Schéma de la fonction de routage réservoir continu.....	25
Figure 13: Hydrogramme des débits aval obtenus avec les fonctions de routage sur le bief de la Seine	28
Figure 14 : Hydrogramme des débits aval obtenus avec les fonctions de routage sur le bief Oise.....	28
Figure 15: Boîte à moustache représentant les distributions des performances obtenues avec la modélisation couplée.....	32
Figure 16: Distribution des performances évaluées avec le critère de Nash sur les débits de crue.....	33
Figure 17 : Performances de la modélisation en fonction de la longueur du bief.....	35
Figure 18 : Performances de la modélisation en fonction de la contribution du bassin amont	35
Figure 19 : Performances de la modélisation	35
Figure 20 : Distribution des performances (Nash Q crue, Nash Q) des modèles de routage...	38
Figure 21: Principe de la méthode descendante utilisée dans cette partie.....	40
Figure 22 : Valeur du paramètre de l'hydrogramme unitaire (x_{hu}) en fonction des différents caractères morphologiques	42
Figure 23 : Performance de l'hydrogramme unitaire avec des paramètres : calés (hu), obtenus par régression (hu_{reg}), unique égale à la moyenne des paramètres obtenus par régression ($hu_{reg\ moy}$)	46

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Typologie des Zones à dominante humides	13
Tableau 2 : Différents modèles débit-débit utilisés.....	26
Tableau 3 : Valeur des coefficients de corrélation entre paramètre de gr4j obtenu avec chaque module de routage	37
Tableau 4 : Coefficients de corrélation entre les caractéristiques des biefs.....	41
Tableau 5 : Valeurs des coefficients de détermination r^2 , des régressions linéaire entre paramètre des modèles et caractéristiques des biefs.	43
Tableau 6 : Valeurs des coefficients de détermination r^2 , des régressions linéaire entre paramètre des modèles et caractéristiques des biefs après transformation en logarithme.	44
Tableau 7 : Coefficients de détermination des régression multiples (ddl : de degré de liberté ;var :variable)	45
Tableau 8 : Statistiques t associées a chacune des variables descriptives.....	45