

Le rôle des zones humides alluviales dans la propagation des crues : apports de la modélisation

Ludovic Oudin*¹, François Moussu¹, Hocine Bendjoudi¹, Pierre Ribstein¹

¹ Université Pierre et Marie Curie, UMR Sisyphe

* Ludovic.Oudin@ccr.jussieu.fr

1.	Introduction	2
2.	Constitution de la base de données.....	3
2.1.	Objectifs	3
2.2.	Synthèse des données disponibles.....	3
2.2.1	Données climatiques et hydrométriques	3
2.2.2	Données géomorphologiques.....	3
2.3.	Présentation des biefs étudiés	5
2.3.1	Constitution de deux échantillons de biefs	5
2.3.2	Caractéristiques des biefs étudiés	6
2.4.	Conclusion	8
3.	Modélisation hydrologique.....	8
3.1.	Objectifs	8
3.2.	Principe de la modélisation couplée.....	8
3.2.1	Choix d'un type de modélisation.....	8
3.2.2	Le module pluie-débit.....	10
3.2.3	Le module de transfert débit-débit.....	10
3.3.	Résultats de la modélisation sur les biefs étudiés	11
3.3.1	Méthodologie d'évaluation des modèles testés	11
3.3.2	Performance des modèles testés sur les échantillons de biefs	12
3.4.	Diagnostic des modèles testés.....	13
3.5.	Conclusion	15
4.	Caractérisation de l'atténuation sur les biefs sélectionnés et relation avec les caractéristiques des biefs	16
4.1.	Objectifs	16
4.2.	Relations entre paramètres de modélisation et caractéristiques physiques des biefs	16
4.3.	Conclusion	18
5.	Conclusion générale et suite de l'étude	18
6.	Références	19

1. Introduction

Les fonctions des zones humides pour l'atténuation des crues sont bien documentées (Brinson, 1995). On distingue un certain nombre de phénomènes régissant cette atténuation : un stockage d'eau de surface temporaire, un stockage d'eau de surface à long-terme, une dissipation de l'énergie (rugosité), un stockage d'eau de subsurface, une pondération des écoulements souterrains et des débits.

Un grand nombre d'études visant à quantifier l'impact des zones humides sur l'écrêtement des crues existent dans la littérature (voir par exemple les études de Delaney, 1995; Hammersmark et al., 2005; Mitsch et Day, 2006). Ces études utilisent généralement des résultats de modélisation hydraulique (par résolution des équations de Barré-de-Saint-Venant) pour démontrer le rôle de rétention de ces zones humides, en utilisant le modèle pour simuler des scénarios de suppression de zones humides. Il ressort de ces études que les zones humides ont un réel impact sur l'atténuation des crues. En revanche, ces études se focalisant sur des sites spécifiques, la généralisation des résultats à d'autres sites est rendue assez délicate.

En parallèle à ces études de cas, les recherches menées dans le cadre du PIREN-Seine se sont attachées à trouver un moyen de généraliser les résultats à l'échelle du bassin de la Seine. Cette étude des corridors fluviaux et des zones humides se fonde sur la construction de typologies fonctionnelles à partir de critères hydro-géomorphologiques (Gaillard et al., 2002). Cette approche globale identifie dans un premier temps les caractéristiques générales des zones humides responsables de l'atténuation des crues et généralise ensuite cette caractérisation (Joyeux, 2005). Une des difficultés de cette approche est le besoin de validation de cette caractérisation.

L'approche présentée ici s'inscrit dans la continuité de ces travaux : nous tenterons de quantifier l'atténuation des crues par les corridors fluviaux sur des biefs du bassin de la Seine. Cette quantification sera réalisée via une modélisation hydraulique simplifiée de tronçons de rivière du bassin de la Seine. Au lieu de résoudre le système complet des équations de Barré-de-Saint-Venant, ce qui demande un effort important de collecte topographique et pose un certain nombre de problèmes numériques, ces modèles reposent sur des équations semi-empiriques, comme les modèles Muskingum (McCarthy, 1938), « Lag and route » (Linsley et al., 1949). L'originalité du schéma de modélisation proposé est la modélisation simultanée 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.

L'objectif consiste à développer une méthodologie de quantification de la rétention des crues par les corridors fluviaux via une modélisation hydrologique de ces corridors. Cette méthodologie est développée en cinq phases :

- Phase 1. Constitution d'une base de données de biefs de rivières sur le bassin de la Seine.
- Phase 2. Test et comparaison de différents modèles débit-débit simples, combinée avec une modélisation pluie-débit pour traiter les apports latéraux. Cette approche est développée actuellement par le Cemagref (Lerat, en cours) et sera appliquée sur tous les biefs sélectionnés ;
- Phase 3. Identification des paramètres et/ou résultats de modélisation pour rendre compte de la rétention et de l'atténuation des crues sur chaque bief de rivière. On distinguera notamment pour chaque type de modélisation débit-débit envisagé les caractéristiques d'atténuation et de transfert des épisodes de crues ;
- Phase 4. Recherche de relations entre paramètres des modèles hydrologiques et caractéristiques géomorphologiques des biefs étudiés. Pour cela, nous nous appuyerons sur la base de données SIG développée par Gaillard et al. (2002) dans le cadre du PIREN Seine.

- Phase 5. Si les relations entre paramètres de modélisation et caractéristiques géomorphologiques sont satisfaisantes, il sera alors possible d'appliquer la méthode à d'autres biefs non jaugés, c'est-à-dire de déduire le potentiel de rétention des crues de chaque corridor directement à partir de ses caractéristiques géomorphologiques de chaque bief. On pourra alors envisager d'appliquer cette méthode sur l'ensemble du bassin de la Seine.

Le présent rapport expose les travaux réalisés sur la constitution de la base de données (Phase 1), sur la comparaison et le diagnostic des modèles hydrologiques testés (Phase 2) et sur les résultats préliminaires de la recherche de relations entre paramètres des modèles hydrologiques et caractéristiques géomorphologiques des biefs étudiés (Phase 3 et 4). Les phases 3, 4 et 5 seront réalisées dans la deuxième année du projet.

2. Constitution de la base de données

2.1. Objectifs

L'objectif de cette partie est de constituer une base de données utilisées en entrée des modèles et des données nécessaires à l'évaluation des modèles. Les modèles testés sont de deux types : pluie-débit et débit-débit.

Pour le modèle pluie-débit, la collecte a porté essentiellement sur :

- des données pluviométriques ;
- des données d'évapotranspiration potentielle (ETP) ;
- des données de débit aux stations instrumentées ;

Afin d'évaluer le potentiel de rétention des crues sur des biefs courts comme sur des biefs longs, notre étude s'est appuyée sur des données au pas de temps journalier et horaire, les données au pas de temps horaire étant plus rare, le nombre de biefs à cette échelle est plus réduit.

Pour la caractérisation géomorphologique des biefs étudiés, nous nous sommes appuyés sur les bases de données existantes, en se focalisant sur les biefs étudiés.

2.2. Synthèse des données disponibles

2.2.1 Données climatiques et hydrométriques

Les données pluviométriques sont utilisées comme entrées du modèle hydrologique (pluie-débit). Nous nous sommes appuyés sur les données issues de l'analyse SAFRAN, qui permettent d'avoir une bonne estimation de la pluie de bassin (Quintana-Seguí et al., 2007). Au pas de temps horaire, les données journalières de l'analyse SAFRAN ont été désagrégées suivant la répartition temporelle horaire des postes pluviométriques disponibles sur le bassin.

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) sont également utilisées par le modèle pluie-débit pour quantifier la demande évaporatoire de l'air. Le modèle les utilise pour calculer les retours d'eau réels vers l'atmosphère à l'échelle du bassin versant. L'ETP est calculée à partir de onze stations climatiques, en utilisant une formule ne nécessitant que la température de l'air (Oudin et al., 2005). Pour le pas de temps horaire, une désagrégation temporelle simple sera réalisée en répartissant l'ETP journalière par une fonction sinusoïdale.

Les données hydrométriques sont utilisées par les modèles soit comme entrée (variables de forçage) dans le cas des modèles de propagation débit-débit, soit comme sortie des modèles aux stations aval des biefs étudiés, elles constituent alors le moyen d'évaluer les qualités des modèles, par comparaison des simulations aux observations. Il existe sur le bassin de la Seine plus de 300 stations hydrométriques. Nous n'avons utilisé que les données de certaines de ces stations, suivant la concomitance entre les données hydrométriques en amont et en aval du bief. Nous nous sommes fixés un seuil de 10 ans de données concomitantes pour les trois types de données hydro-climatiques.

2.2.2 Données géomorphologiques

La caractérisation géomorphologique de chaque bief s'est appuyée sur trois bases de données SIG :

- Réseau hydrographique (source : Piren Seine et BD Carthage). Le réseau hydrographique est composé d'une couverture linéaire représentant les tronçons du réseau. Ainsi à chaque tronçon linéaire sont affectés 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,...
- Unité spatiale élémentaire (USE) corridors. 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). Les couloirs fluviaux ont été découpés en Unités Spatiales Elémentaires (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 qui permettent de renseigner la sinuosité, la densité des chenaux secondaires, 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), etc.
- Zones à dominante humide (source : agence de l'eau Seine Normandie). Cette base de données cartographique a été réalisée à partir de photo-interprétation d'orthophotographies à 5 m de résolution associée à l'utilisation d'images satellites 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 et 16 sous-types.

Ces différentes couches ont été associées (cf. *Figure 1*) aux biefs de rivière définis par deux stations hydrométriques. Une intersection des différentes bases de données sur chaque bief a permis l'élaboration d'une base de données spécifique à chaque bief sélectionné.

Même si tous les champs contenus dans les différentes bases de données ont été extraits, seule une petite partie de ces informations seront utilisées dans cette étude. Nous nous sommes intéressés principalement aux paramètres suivants :

- Longueur du bief (km) ;
- Largeur de la plaine alluviale, i.e. moyenne des largeurs des USE ;
- Pente du bief ;
- Sinuosité du bief, i.e. le rapport entre la longueur du réseau hydrographique entre les deux stations et la distance euclidienne entre ces deux stations ;
- Le pourcentage de zones humides sur le corridor fluvial du bief (cf. Figure 1).

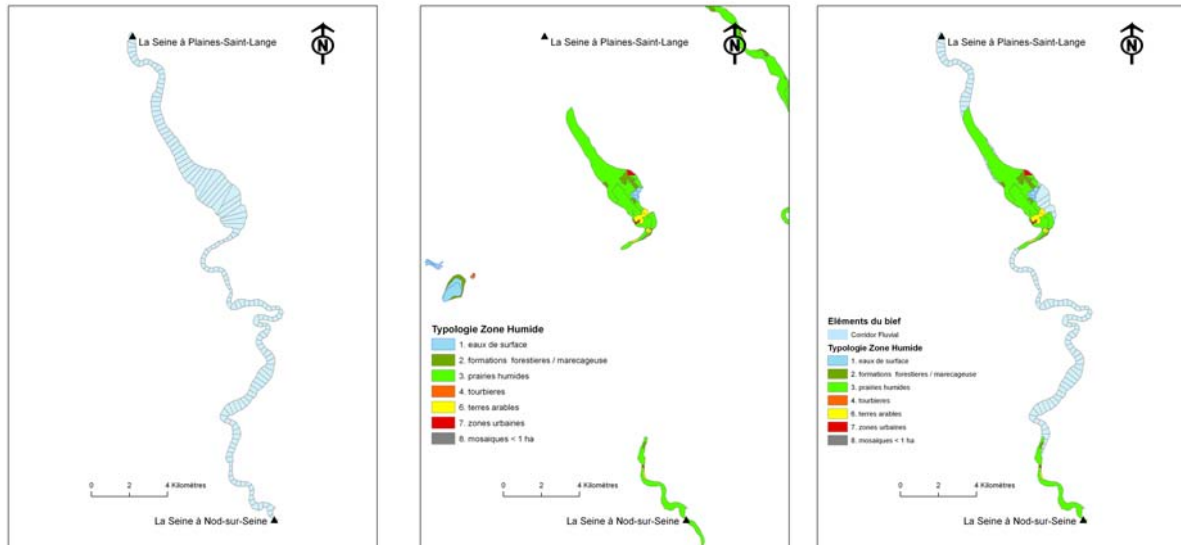


Figure 1 : Indicateur de zones humides par bief par intersection des couches USE sur le bief et la couche de typologie des zones humides. Exemple sur un bief de la Seine entre Nod et Plaines-Saint-Langes.

2.3. Présentation des biefs étudiés

2.3.1 Constitution de deux échantillons de biefs

Nous présentons dans cette section les biefs sélectionnés pour notre étude. Deux jeux de données ont été constitués : un échantillon de biefs avec des données hydro-climatiques au pas de temps journalier et un échantillon de données au pas de temps horaire.

Dans un premier temps, nous nous attacherons à modéliser les débits sur les biefs au pas de temps journalier. Cette échelle permet d’avoir une représentation des champs pluviométriques plus fine compte tenu de la disponibilité des postes pluviométriques à cette échelle. En revanche, cette échelle ne permet pas de rendre compte des variations de débits sur les biefs courts. A cette échelle, 135 biefs de rivières du bassin de la Seine (**Figure 2**) ont été retenus.

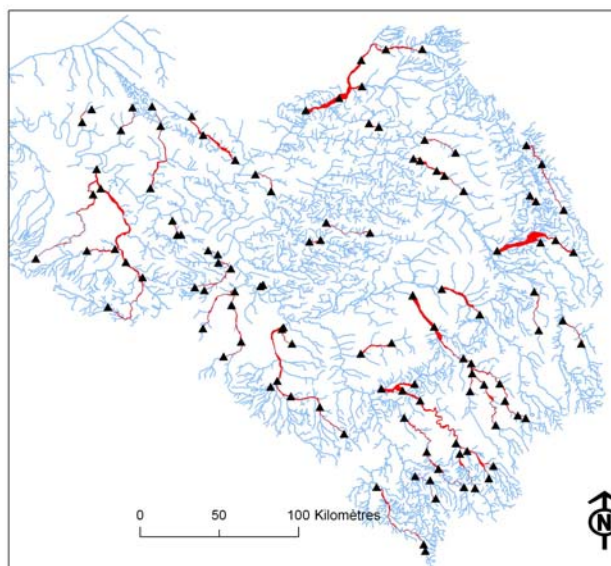


Figure 2 : Situation géographique des 135 biefs étudiés au pas de temps journalier

Echantillon 2 : constitution d'un échantillon au pas de temps horaire

La modélisation au pas de temps horaire permet d'avoir une représentation plus fine des temps de transfert dans les biefs de rivière, notamment les biefs relativement courts. Nous nous sommes également restreints aux biefs pour lesquels la contribution du bassin amont était significative par rapport à la contribution du bassin intermédiaire, avec un seuil fixé arbitrairement à 30% du bassin à la station aval. Du fait de ces contraintes, seulement 35 biefs de rivières ont été retenus (**Figure 3**).

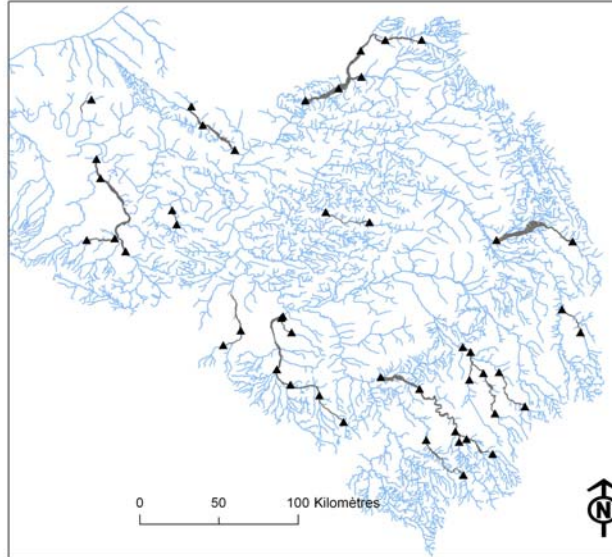


Figure 3 : Situation géographique des 35 biefs étudiés au pas de temps horaire

2.3.2 Caractéristiques des biefs étudiés

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. Quelques-unes de ces caractéristiques pour l'échantillon de biefs au pas de temps journalier sont présentées sur la **Figure 4**.

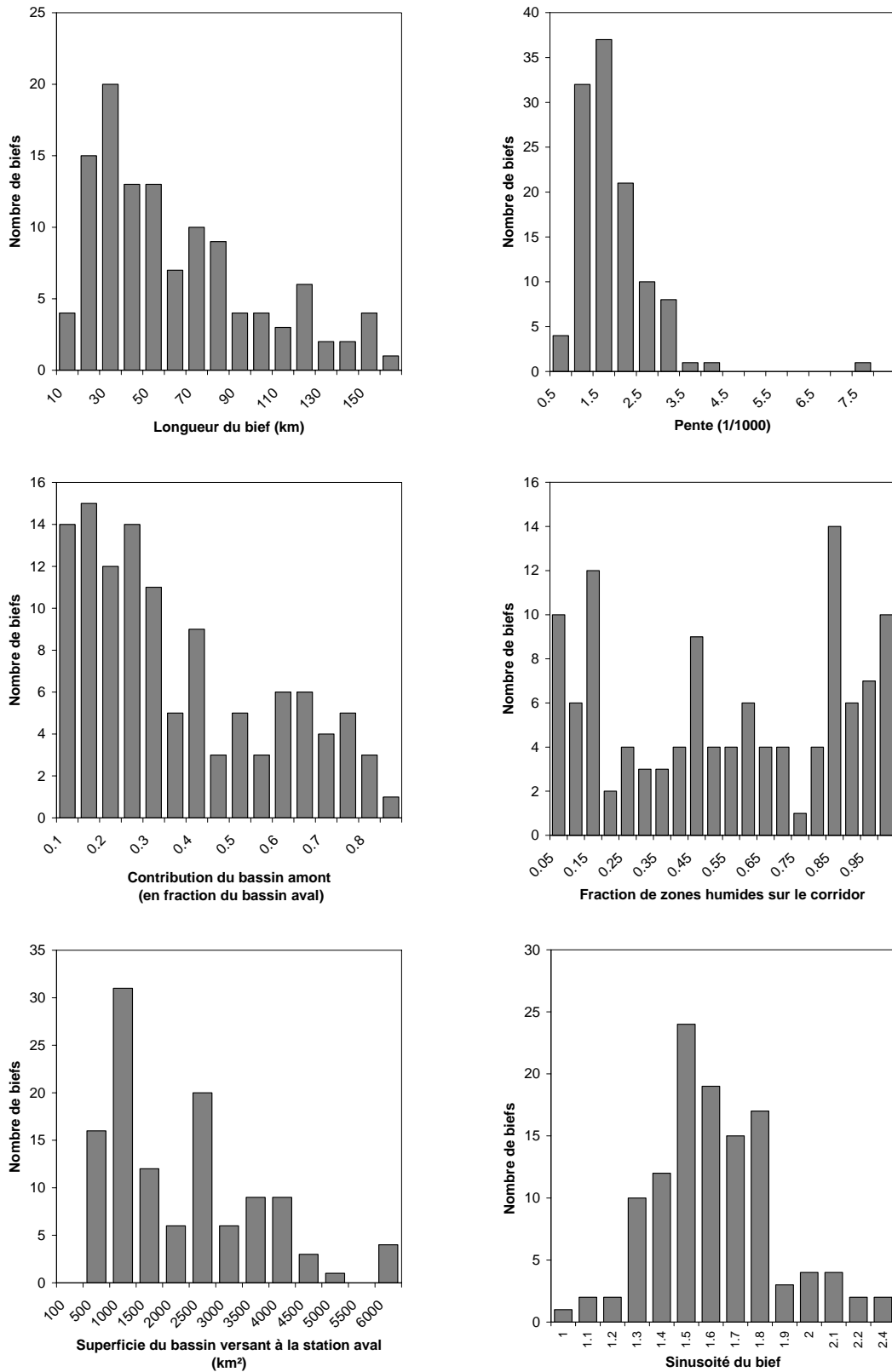


Figure 4 : Distribution des caractéristiques des 135 biefs sélectionnés

Il ressort de cette analyse que les biefs présentent une certaine homogénéité pour la pente et la sinuosité, ces caractéristiques ayant une forte dépendance régionale. En revanche, la longueur des biefs et la superficie du bassin de la station en aval du bief sont très variables, ce qui permettra de confronter plusieurs configurations pour la modélisation de l'écoulement dans le bief.

De même, les zones humides sont représentées de manière très différente sur l'échantillon des biefs, ce qui facilitera l'analyse sur l'impact de la présence de zones humides sur le transfert des crues.

2.4. Conclusion

L'inventaire des données de pluie, de débit et d'ETP sur les bassins versants étudiés a permis de dresser le bilan des données utilisables dans le cadre d'une modélisation hydrologique pluie-débit et débit-débit.

Une base de données aux pas de temps horaire et journalier a pu être constituée, avec au moins 10 ans de chronique pour chaque bief étudié.

L'échantillon de biefs sélectionnés est vaste et assez varié en termes de caractéristiques hydro-géomorphologiques, ce qui permettra de tirer des conclusions relativement générales concernant l'impact de ces caractéristiques sur la propagation des crues dans les corridors fluviaux.

3. Modélisation hydrologique

3.1. Objectifs

L'objectif de cette partie est de mettre en place et d'évaluer un schéma de modélisation hydrologique permettant de caractériser la propagation des crues dans chacun des biefs sélectionnés. Pour cela, un schéma de modélisation couplée pluie-débit et débit-débit est proposé, permettant de séparer à l'aval les écoulements provenant du bassin intermédiaire et les écoulements provenant du bassin en amont transféré dans le bief.

Le type de modélisation choisi est la modélisation globale. Certains paramètres du modèle seront donc calés afin d'obtenir les meilleures simulations de débit à l'aval des biefs. Ces paramètres seront utilisés dans la partie suivante afin de déterminer s'il existe des relations entre les valeurs de ces paramètres et les caractéristiques hydro-géo-morphologiques de ces biefs.

Deux conditions doivent être gardées à l'esprit pour garantir à ces relations une certaine robustesse :

- Les paramètres de modélisation pouvant être reliés aux caractéristiques sont obtenus par calage numérique afin que les simulations de débit obtenues soient les plus proches des observations. Nous chercherons donc à obtenir les meilleures performances de modélisation, ce qui indique une utilisation judicieuse des paramètres par le modèle.
- Afin de pouvoir relier les paramètres aux caractéristiques physiques du bief, il faut s'assurer que le modèle est relativement parcimonieux.

3.2. Principe de la modélisation couplée

3.2.1 Choix d'un type de modélisation

Notre ambition est de caractériser l'écoulement dans un bief de rivière par sa modélisation. Deux types de modélisation sont envisageables (Fread, 1993) :

- Une modélisation dite globale représentant le transfert de l'écoulement d'un point amont à un point aval, sans représentation de l'écoulement au sein du bief ;
- Une modélisation dite distribuée prenant explicitement en compte la variabilité spatiale des processus, des variables d'entrée, des conditions aux limites. Elle permet donc l'estimation du débit (et de la hauteur d'eau) en tout point du réseau hydrographique.

Au lieu de résoudre le système complet des équations de Barré-de-Saint-Venant (modélisation dite distribuée), ce qui demande un effort important de collecte topographique et bathymétrique, la plupart des modèles hydrologiques utilisent des outils de transfert globaux simplifiés (modélisation dite

globale). Ces outils reposent sur des équations empiriques, comme les modèles Muskingum (McCarthy, 1938), « Lag and route » (Linsley et al., 1949) ou bien des simplifications des équations de Barré-de-Saint-Venant, comme le noyau d'Hayami (1951). 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.

Ces modèles d'écoulement dans les biefs négligent en général la modélisation des apports latéraux, en les traitant principalement sous deux formes : ponctuels ou uniformément répartis. Nous utiliserons 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 (Lerat, en cours).

La **Figure 5** représente schématiquement la modélisation envisagée : le débit simulé à l'aval du bief est la somme du débit à l'amont transféré par le modèle de transfert et du débit représentant les apports latéraux modélisés par un modèle pluie-débit du bassin versant intermédiaire. A titre d'exemple, la **Figure 6** indique pour un épisode de crue sur le bief de la Seine entre Nod et Plaines-Saint-Langes les différentes contributions des deux modélisations sur ce bief.

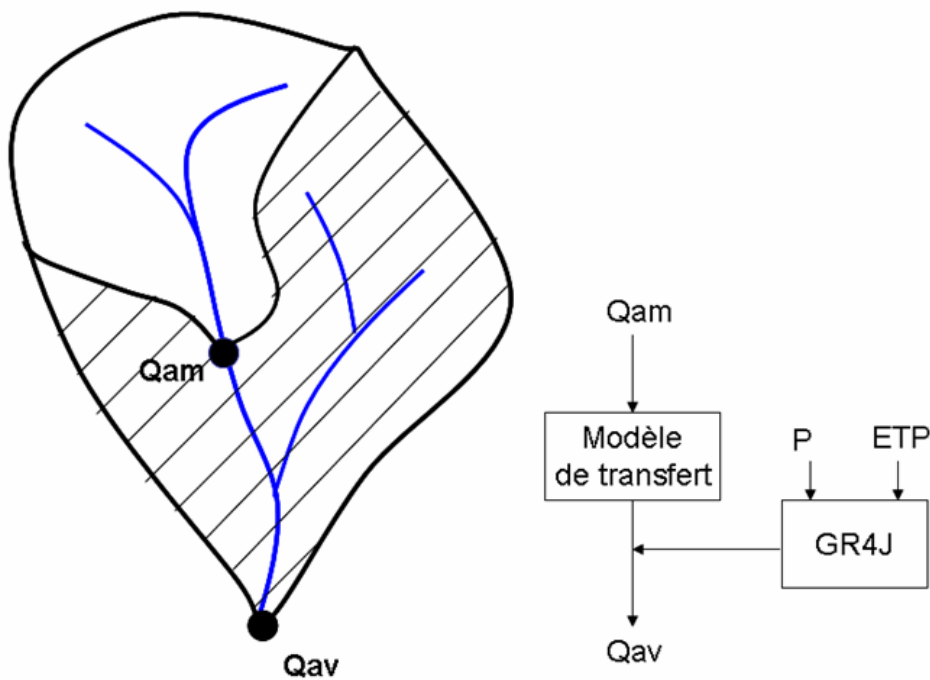


Figure 5 : Représentation schématique de l'approche de modélisation couplée.

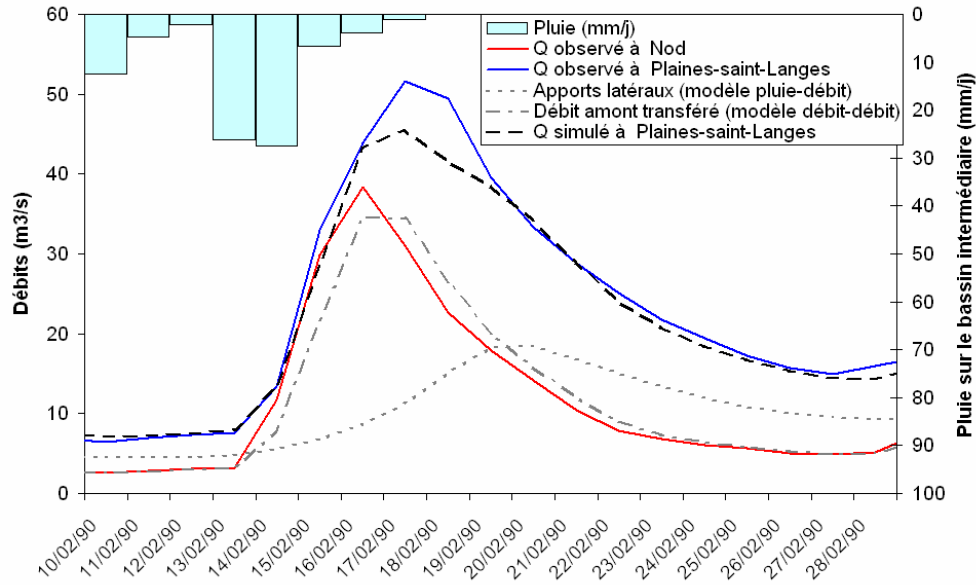


Figure 6 : Contribution des modélisations débit-débit et pluie-débit à l'aval du bief

3.2.2 Le module 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 du module de transfert débit-débit. La notion de bassin intermédiaire résulte du fait que le bassin amont est englobé dans le bassin aval. Comme nous utilisons un module de transfert, il n'est possible de connaître les apports entre nos deux stations qu'à partir d'une modélisation pluie-débit du bassin intermédiaire. Rappelons qu'un bief est défini par :

- une station amont qui est l'exutoire du bassin versant amont (surface du bassin amont Sam)
- une station aval qui est l'exutoire du bassin versant aval (surface du bassin amont Sav)

Le bassin intermédiaire est la surface du bassin aval qui n'appartient pas au bassin amont. La modélisation des apports latéraux provenant de ce bassin est réalisée à l'aide du modèle pluie-débit GR4J (Perrin et al, 2003) au pas de temps journalier et du modèle GR4H (Mathevet, 2005) au pas de temps horaire, qui ne possèdent que quatre paramètres à caler.

3.2.3 Le module de transfert débit-débit

Dans ce rapport, nous nous intéresserons principalement à la modélisation du transfert du débit amont, i.e. le module débit-débit de la modélisation couplée. Plusieurs types de modèles ont été envisagés pour représenter ces écoulements. Tous ces modèles sont des équations mathématiques de propagation de l'onde de flux ; elles reposent sur l'hypothèse de la conservation de la matière, même si cette hypothèse n'est pas forcément vérifiée dans la réalité puisqu'il existe de nombreux échanges avec les nappes sous-jacentes.

Ces modèles varient en complexité, avec un nombre de paramètres allant de un à trois. Le **Tableau 1** indique les différents types de modèles envisagés, qui sont détaillés par Moussu (2007).

Tableau 1 : Liste des différents modules de transfert utilisés au sein de la modélisation couplée.

Nom du modèle	Notation utilisée	Nombre de paramètres	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 reporté à la station aval avec un paramètre de délai fixe (1 paramètre) puis transite par un réservoir biquadratique (1 paramètre).
Module de routage du modèle 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.

3.3. Résultats de la modélisation sur les biefs étudiés

Avant d'identifier le pouvoir de rétention de crues des biefs étudiés, il s'agit de vérifier la performance des modèles proposés. La performance des modèles est jugée ici par leur capacité à simuler les débits à l'aval du bief à partir des débits à l'amont et des données climatiques sur le bassin intermédiaire. Cette évaluation a deux intérêts :

- Elle permet de juger le cadre de modélisation choisie ;
- Elle permet de donner une idée sur la représentativité des paramètres pour décrire l'écoulement dans le bief. En effet, il paraît nécessaire, voire indispensable, que le modèle ait une bonne capacité de simulation pour que l'on puisse interpréter avec une certaine confiance les valeurs de ses paramètres, en particulier les paramètres de transfert qui nous intéressent ici.

3.3.1 Méthodologie d'évaluation des modèles testés

Nous avons adopté une approche en calage-contrôle (Klemeš, 1986), consistant à faire un calage des paramètres du modèle sur une période de données puis un contrôle sur une période indépendante. Cette phase de tests a été réalisée sur l'ensemble des biefs pour les périodes de données disponibles. La période totale de données a été scindée en deux sous-périodes et chaque sous-période a servi à tour

de rôle de période de calage et de contrôle, pour obtenir donc deux évaluations du modèle sur chaque bief. Cette analyse a été faite ici au pas de temps journalier et au pas de temps horaire.

L'évaluation en contrôle de chaque modèle a été réalisée en utilisant un critère numérique d'évaluation le critère de Nash et Sutcliffe (1970), défini par :

$$NS(\%) = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \right]$$

où $Q_{obs,i}$ et $Q_{calc,i}$ sont respectivement les débits observé et simulé au pas de temps i , n le nombre total de pas de temps et $\overline{Q_{obs}}$ la moyenne des débits observés sur la période d'étude.

Afin d'évaluer l'apport de la modélisation couplée par rapport à une modélisation classique pluie-débit, nous comparerons les performances obtenues par la modélisation couplée à celles obtenues par un modèle pluie-débit appliqué sur l'ensemble du bassin (à la station aval).

3.3.2 Performance des modèles testés sur les échantillons de biefs

Les résultats de la simulation en contrôle pour les différents types de modèles sont indiqués sur la **Figure 7** qui 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 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 0.90 et permettent ainsi d'avoir un aperçu simplifié de la distribution des critères de performances obtenus.

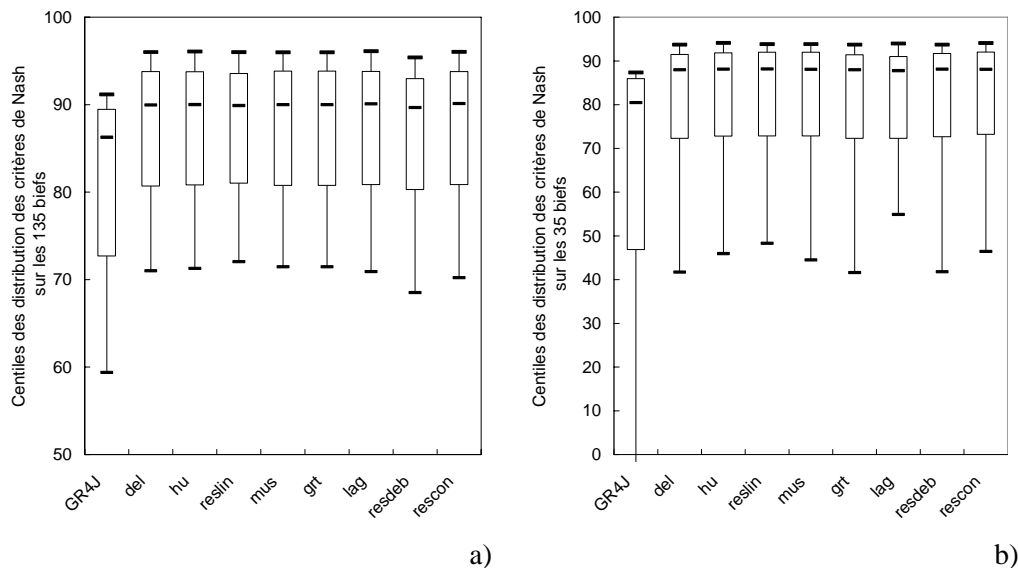


Figure 7 : Distribution des critères de Nash obtenus en validation avec la modélisation couplée au pas de temps journalier (a) et au pas de temps horaire (b). Les notations sont celles indiquées au Tableau 1. Le modèle GR4J est utilisé comme référence d'un modèle pluie-débit global surtout le bassin.

D'un point de vue général, les performances obtenues par les modèles sont assez satisfaisantes, avec des critères de Nash généralement au-dessus de 70%.

On observe une nette amélioration lorsque l'on utilise la modélisation couplée par rapport à une simple modélisation globale. Les résultats obtenus avec la modélisation couplée permettent de gagner plus de 5 points de critère de Nash pour la médiane en comparaison d'une modélisation globale pluie-débit. Cette amélioration est encore plus nette pour les queues de distribution (quantiles 0.10 et 0.25), indiquant que le schéma de modélisation couplée est plus robuste que le modèle pluie-débit global, malgré le nombre de paramètres calés plus important. Par ailleurs, l'amélioration apportée par la modélisation couplée est accentuée au pas de temps horaire, ce qui semble indiquer que le pas de temps horaire est plus adapté dans le cadre de notre étude que le pas de temps journalier.

Ces résultats sont très satisfaisants d'un point de vue du modélisateur et laissent envisager une bonne caractérisation hydrodynamique des biefs via les paramètres de modélisation.

En revanche, il existe une grande homogénéité dans les performances obtenues par les différents modules de transfert. Ce résultat semble suggérer qu'un seul paramètre suffit à représenter l'écoulement dans le bief. Ceci est surprenant car on pourrait s'attendre à avoir au moins deux paramètres pour représenter l'écoulement dans le bief : un paramètre représentant le temps de transfert et un paramètre représentant l'atténuation d'amont en aval des pointes de crues. Cette homogénéité peut provenir du fait que les modèles sont évalués sur toute la période de données, sans distinction entre les périodes de crue et d'étiage.

Nous nous sommes donc intéressés à un critère d'évaluation sur les périodes de hautes eaux uniquement. Nous avons choisi un seuil égal au débit moyen à l'aval du bief. Le critère de Nash n'est alors calculé que pour les débits supérieurs à ce seuil. Les performances des modèles avec ce critère adapté aux hautes eaux sont indiquées sur la **Figure 8**.

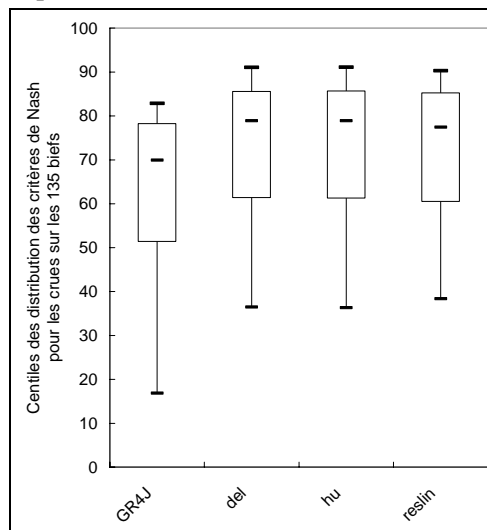


Figure 8 : Distribution des critères de Nash en période de hautes eaux obtenus avec la modélisation couplée au pas de temps journalier

Les résultats obtenus montrent que la modélisation est plus performante en période de hautes eaux, par rapport à une modélisation globale. En revanche, il est toujours difficile de discriminer les différents modules de transfert.

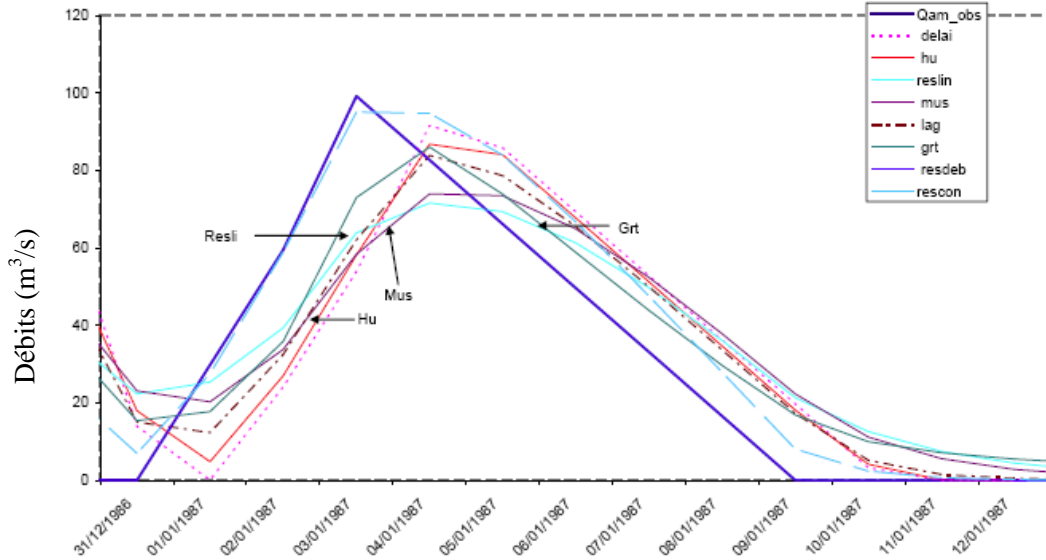
3.4. Diagnostic des modèles testés

Nous avons vu que les différents modules de transfert testés ont en général des performances équivalentes. Plusieurs hypothèses peuvent être mises en avant pour expliquer ce phénomène :

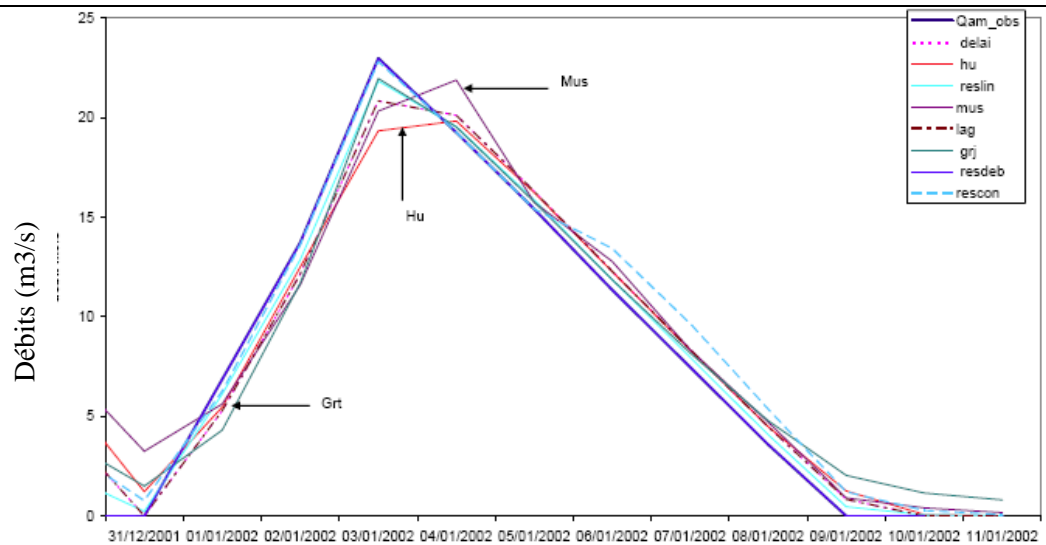
1. Les modèles de transfert testés ne sont pas suffisamment différents par construction.
2. La contribution du bassin intermédiaire est trop importante, rendant le débit simulé par les modèles de transfert négligeable par rapport au débit simulé par le modèle pluie-débit.
3. Il existe des interactions entre paramètres du modèle pluie-débit et paramètres du modèle débit-débit. Ainsi, les différences entre les modèles de transfert seraient gommées par un ajustement des paramètres du modèle pluie-débit.
4. Contre-intuitivement, un seul paramètre suffit à représenter l'écoulement dans les biefs considérés. L'ajout de paramètres supplémentaires et la complexification du modèle ne sont pas justifiés par les performances obtenues.
5. Les modèles utilisés pour le transfert sont de type « global », c'est-à-dire qu'il n'y a pas de discrétisation des paramètres au sein du bief. Il est donc possible que des modèles plus complexes permettent des simulations de débit plus précises du débit, par une modélisation hydrodynamique plus fine de l'écoulement dans le bief. Ce type de modèle requiert des informations topographiques et bathymétriques, dont nous ne disposons pas à ce stade de l'étude. De plus, la mise en œuvre de ce type de modélisation est relativement longue et il

n'ont pas été possible de traiter les 135 biefs sélectionnés. C'est pourquoi nous n'avons pas traité cet aspect, qui sera proposé comme perspective du travail accompli.

Pour répondre au premier point, nous avons vérifié que les modèles étaient bien susceptibles de fournir des réponses différentes à une impulsion de débit amont donnée. La **Figure 9** illustre les réponses des différents modules de transfert obtenues à partir des débits observés en amont, pour deux épisodes de crue et deux biefs différents.



a)



b)

Figure 9 : Réponse des différents modules de transfert utilisés à un hydrogramme synthétique pour le débit amont. Cas de la Seine entre Nod et Plaines-Saint-Langes (a) et de l'Oise

Pour répondre au deuxième point, nous avons représenté sur la **Figure 10** les différences de performances obtenues par les différents modèles en fonction de la longueur des biefs considérés et de la contribution du bassin amont par rapport au bassin aval.

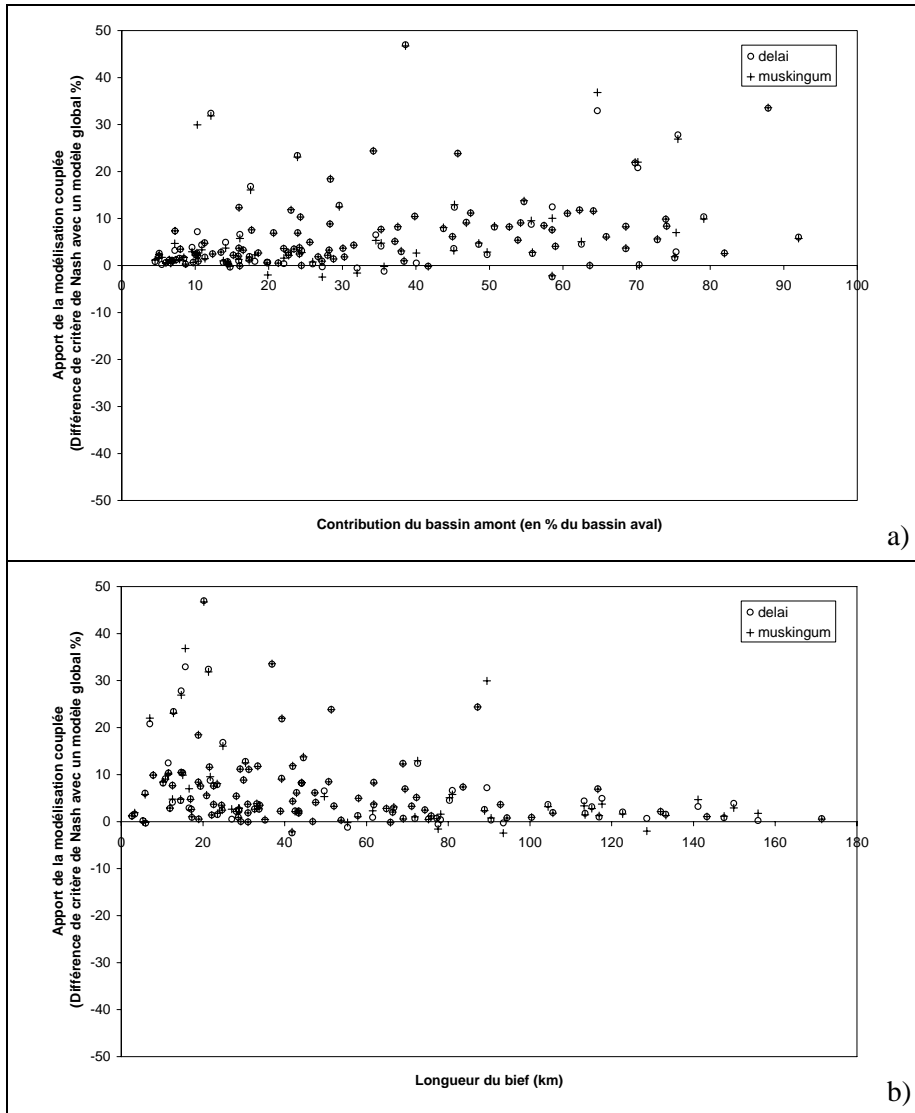


Figure 10 : Apport de la modélisation couplée par rapport à la modélisation globale en fonction de la contribution du bassin amont (a) et de la longueur du bief (b)

Les résultats montrent que la modélisation explicite de l'écoulement dans le bief est plus intéressante lorsque la contribution du bassin amont est significative par rapport au bassin aval.

Il n'est pas possible de répondre directement au troisième point. Le débit en aval qui sert à caler et valider le schéma de modélisation représente la somme du débit amont transféré dans les biefs et du débit produit par le bassin intermédiaire. Il est donc fort possible que, lors de la phase de calage, des interactions entre les paramètres des deux modules rendent les paramètres du modèle de transfert difficilement exploitables. Les tests réalisés par Moussu (2007) ont permis de répondre partiellement sur ce point : il a montré que les valeurs prises par les paramètres du modèle pluie-débit étaient très proches, quel que soit le module de transfert utilisé pour représenter l'écoulement dans le bief. Ceci semble témoigner d'une certaine indépendance entre le calage des deux modules. Toutefois, les doutes subsistent et il s'agira de les garder à l'esprit lors de l'interprétation des paramètres des modèles.

3.5. Conclusion

Cette partie avait pour but d'asseoir le schéma de modélisation hydrologique. Ce schéma repose sur un couplage d'une modélisation pluie-débit (pour le bassin intermédiaire alimentant le bief via des apports latéraux) et d'une modélisation débit-débit (pour le transfert d'amont à l'aval dans le bief).

Du point de vue de la modélisation, les résultats sont très encourageants et confirment les résultats de Lerat (2008) : la prise en compte de l'information supplémentaire de débit au sein d'un bassin améliore les simulations de débit pour la station en aval.

En revanche, les résultats de comparaison des différents modules de transfert testés sont assez surprenants : il semble que des modèles de transfert extrêmement simples suffisent pour représenter la propagation des débits dans le bief. Ainsi, des modèles à un seul paramètre (représentant le temps de transfert entre l'amont et l'aval) sont aussi performants que des modèles plus complexes introduisant un temps de transfert et un paramètre d'atténuation.

Ceci peut être lié au fait que les biefs considérés ont en général des apports latéraux prédominants et il peut y avoir, dans la modélisation, des interactions entre le modèle de transfert et le modèle pluie-débit représentant les apports intermédiaires. Ceci est possible même s'il semble y avoir une certaine indépendance entre les paramètres du modèle de transfert d'une part et les paramètres du modèle pluie-débit d'autre part.

4. Caractérisation de l'atténuation sur les biefs sélectionnés et relation avec les caractéristiques des biefs

4.1. Objectifs

L'objectif de cette partie est double. Il s'agit dans un premier temps de caractériser l'atténuation des crues sur chaque bief en utilisant les résultats de la modélisation débit-débit sur chaque bief. Cette caractérisation peut être envisagée par deux méthodes :

- Exploitation des paramètres des modèles de transfert et interprétation de ces paramètres
- Exploitation directe des simulations d'écoulement des modules de transfert. On peut envisager, par exemple, le rapport des débits de crues transférés dans le bief (sortie du modèle de transfert) et les débits observés en amont.

Une fois la caractérisation de l'atténuation réalisée, l'objectif est de rechercher des relations entre les caractéristiques physiques du bief et sa capacité à atténuer les crues.

Cette phase de l'étude n'a pas encore abouti. A ce stade, la caractérisation de l'atténuation est entamée mais a surtout été faite en exploitant les paramètres des modèles. De même, seules quelques caractéristiques physiques ont été utilisées pour interpréter les paramètres de propagation dans les biefs.

4.2. Relations entre paramètres de modélisation et caractéristiques physiques des biefs

Dans un premier temps nous nous sommes penchés sur la recherche d'équations de régressions (linéaire et puissance) entre les paramètres des modules de transfert et les caractères hydro-géomorphologiques. Le but est d'expliquer les variations des paramètres de la modélisation par la variation des caractères géomorphologiques. Nous calons ici les modèles sur l'ensemble de la chronique afin d'obtenir des paramètres de modélisation les plus robustes possibles. Nous nous sommes intéressés principalement aux paramètres du modèle de transfert (de 1 à 3 paramètres selon le modèle utilisé).

Nous avons d'abord regardé la relation entre le paramètre d'un modèle de transfert (délai pur, noté 'del') et la longueur du bief. Ce paramètre ne permet pas d'évaluer l'atténuation de la crue mais est utilisé ici comme un test préliminaire permettant d'identifier d'éventuels problèmes liés à la modélisation. En effet, le paramètre de délai doit être nécessairement lié à la longueur du bief, même si des variations sont attendues suivant les caractéristiques physiques du bief. La **Figure 11** montre que la relation entre paramètre de délai et longueur du bief est loin d'être satisfaisante. Deux problèmes ont été identifiés :

- Les bassins à faible contribution amont ne permettent pas de caler correctement les paramètres du modèle de transfert. En effet, dans ces configurations la part du débit du bassin intermédiaire est prépondérante pour expliquer les variations du débit à l'aval.

- Le pas de temps journalier semble être trop grossier pour rendre compte du transfert amont-aval du débit pour beaucoup de bief.

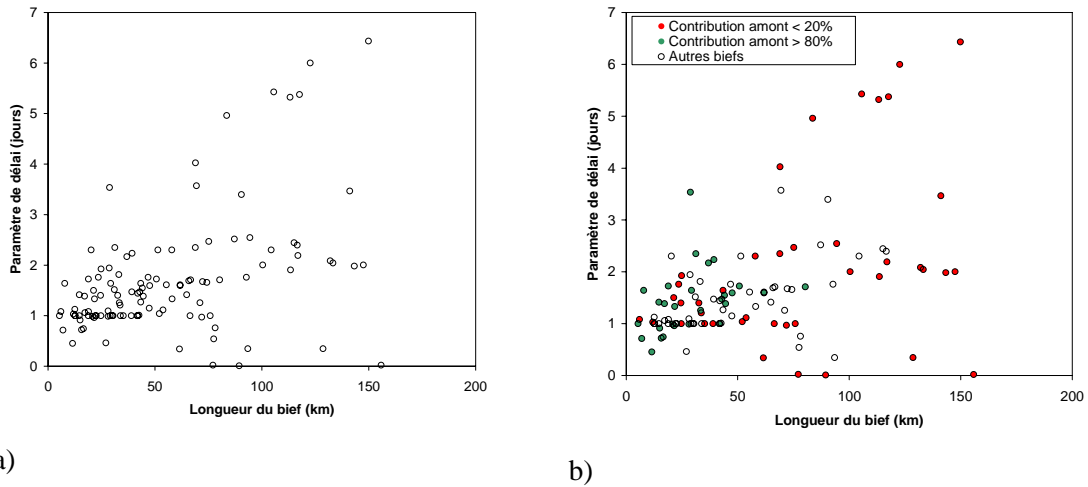


Figure 11 : Relation entre paramètres de modélisation et longueur du bief (a) et impact du degré de contribution du bassin amont sur cette relation (b).

A la lumière de ces résultats obtenus au pas de temps journalier, nous avons décidé de nous concentrer sur le pas de temps horaire pour la modélisation. De plus, nous nous intéresserons uniquement aux bassins pour lesquels la contribution amont n'est pas négligeable (seuil arbitraire fixé à 30%). Les résultats au pas de temps horaire (Figure 12) semblent être plus encourageants, avec une relation plus marquée entre longueur du bief et temps de transfert de l'écoulement dans le bief.

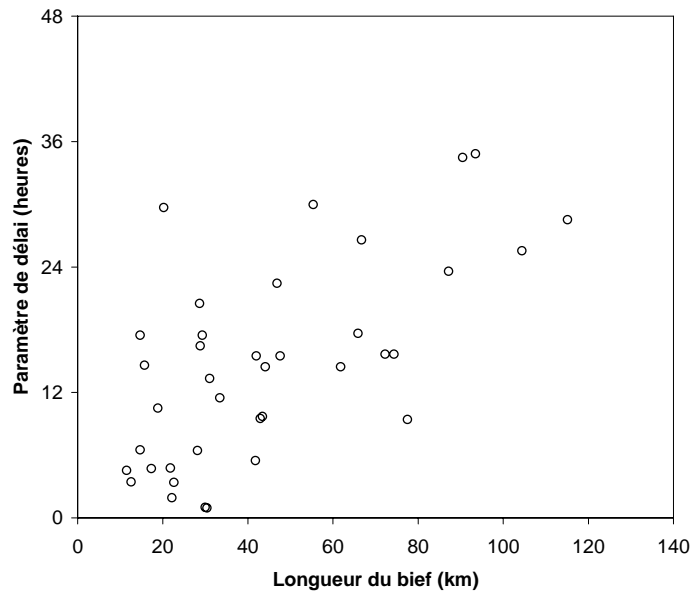


Figure 12 : Relation entre paramètre de modélisation et longueur du bief au pas de temps horaire.

La seconde étape est de déterminer s'il est possible de calculer le temps de transfert directement à l'aide des caractéristiques physiques des biefs. Nous chercherons donc des relations de régressions entre le paramètre de transfert et des caractéristiques telles que la longueur du bief, le pourcentage de zones humides, la pente du bief ainsi que sa sinuosité. A ce stade, les recherches ont été entreprises uniquement sur le paramètre de transfert du modèle « del ». Des recherches sont en cours pour élargir les relations à d'autres paramètres, notamment ceux caractérisant l'atténuation des crues. Ces relations, si elles sont bonnes, permettront de :

- Connaître a priori le temps de transfert et l'atténuation de l'écoulement sans avoir recours à des données de débit ;
- D'interpréter les variations de ces temps de transfert et de l'atténuation en fonction des caractéristiques des biefs. En ce qui concerne la présence de zones humides, cela permettrait d'évaluer quantitativement leur impact sur la rétention des crues.

4.3. Conclusion

Cette phase de l'étude n'est pas encore aboutie. A ce jour, la caractérisation de l'atténuation est entamée mais a surtout été faite en exploitant les paramètres des modèles. De même, seules quelques caractéristiques physiques ont été utilisées pour interpréter le degré d'atténuation des biefs. Les premiers résultats semblent indiquer que le pas de temps journalier n'est pas adapté à l'échantillon de biefs sélectionnés. Pour la suite de notre étude, nous nous concentrerons donc sur le deuxième échantillon de biefs, composés de 35 tronçons de rivière, pour lesquels nous disposons de données horaires.

5. Conclusion générale et suite de l'étude

Le présent rapport a permis d'exposer les travaux réalisés sur la constitution de la base de données (Phase 1), sur l'inventaire et l'évaluation d'un certain nombre de modèles de transfert existants (Phase 2). Les travaux sur la caractérisation de l'atténuation des crues sur les biefs de rivière sélectionnés et sur les relations entre cette atténuation et les caractéristiques physiques des biefs sont en cours (Phases 3 et 4).

L'inventaire des données de pluie, de débit et d'ETP sur les bassins versants étudiés a permis de dresser le bilan des données utilisables dans le cadre d'une modélisation hydrologique pluie-débit et débit-débit. Une base de données aux pas de temps horaire (35 biefs) et journalier (135 biefs) a pu être constituée, avec un minimum de 10 ans de chronique pour chaque bief étudié. L'échantillon de biefs sélectionnés est vaste et assez varié en termes de caractéristiques hydro-géomorphologiques, ce qui permettra de tirer des conclusions relativement générales concernant l'impact des zones humides sur la propagation des crues dans les corridors fluviaux.

Du point de vue de la modélisation, les résultats sont très encourageants et confirment les résultats de Lerat (en cours) : le couplage entre une modélisation explicite des écoulements au sein d'un bief et une modélisation des apports latéraux sur ce bief améliore de façon significative les simulations de débits pour la station en aval. En revanche, les résultats de comparaison des différents modules de transfert testés sont assez surprenants : il semble que des modèles de transfert extrêmement simples suffisent pour représenter la propagation des débits dans le bief. Ainsi, des modèles à un seul paramètre (représentant généralement le temps de transfert entre l'amont et l'aval) sont aussi performants que des modèles plus complexes introduisant un temps de transfert et un paramètre d'atténuation.

Concernant la caractérisation de l'atténuation des crues par les biefs, nous poursuivrons l'étude en utilisant l'échantillon de biefs au pas de temps horaire, qui semble suffisamment fin pour rendre compte de façon fiable des temps de transfert et de l'atténuation au sein d'un bief. Une réflexion sur les variables utilisées pour caractériser ces deux fonctions est en cours. La deuxième année du projet sera consacrée à cette étude.

Pour certains biefs étudiés, une modélisation hydraulique fine est envisagée. Elle permettra de répondre à une des questions soulevées dans ce rapport : les modèles hydrauliques utilisés sont-ils trop simples pour rendre compte de l'atténuation effective au sein des biefs. Elle ouvrira également de nouvelles perspectives sur la compréhension du fonctionnement des zones humides : peut-on quantifier le stockage d'eau de subsurface ? Quel est l'impact des zones humides sur la pondération des écoulements souterrains et des débits ? Ce type de modélisation n'est pas envisageable sur l'ensemble des biefs étudiés lors de notre étude mais les résultats apporteront une information complémentaire à l'étude en cours.

6. Références

1. Brinson, M.M., 1995. A Guidebook for Application of Hydrogeomorphic Assessments to Riverine Wetlands. WRP-DE-11. U.S. Army Corps of Engineers, 114 p. + annexes pp.
2. Delaney, T., 1995. Benefits to downstream flood attenuation and water-quality as a result of constructed wetlands in agricultural landscapes. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50(6): 620-626,
3. Gaillard, S., Fustec, E., Bravard, J.P., Brunstein, D. et Pasquier, D., 2002. Typologie et fonctions des zones humides riveraines. Rapport de synthèse, Programme PIREN-Seine 1998-2001 - UMR CNRS 7619 Sisyphe.
4. Hammersmark, C.T., Fleenor, W.E. et Schladow, S.G., 2005. Simulation of flood impact and habitat extent for a tidal freshwater marsh restoration. *Ecological Engineering*, 25(2): 137-152,
5. Hayami, S., 1951. On the propagation of flood waves. *Bulletin, Disaster Prevention Research Institute*. Kyoto University, Japan, 1,
6. Joyeux, E., 2005. Typologie des zones humides riveraines du bassin de la Seine et fonctions relatives à la qualité et au régime des eaux - Typology of riparian wetlands of the seine River basins and functioning of these wetlands regarding floods and water quality. Ms, University of Lyon 2 / University of Paris 6, Lyon, 90 pp.
7. Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrologic simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1): 13-24,
8. Lerat, J., en cours. Nouvelles approches en modélisation hydrologiquesemi-distribuée, développements théoriques et applications. Thèse de doctorat, Université Pierre et marie Curie - Cemagref Antony, Paris.
9. Linsley, R.K., Kohler, M.A. et Paulhus, J.L.H., 1949. Applied hydrology. Mc Graw Hill Book Co., New York, pp. 502-530.
10. Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et intercomparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. PhD thesis, Cemagref, Antony.
11. McCarthy, G.T., 1938. The unit hydrograph and food routing, Conference of the North Atlantic Division of the US Army Corps of Engineers, New London, Connecticut.
12. Mitsch, W.J. et Day, J.W., 2006. Restoration of wetlands in the Mississippi-Ohio-Missouri (MOM) River Basin: Experience and needed research. *Ecological Engineering*, 26(1): 55-69,
13. Moussu, F., 2007. Modélisation couplée pluie/débit débit/débit: Développement et application aux bassins non jaugés, Master Hydrologie-Hydrogéologie - UMR Sisyphe, Université Paris 6.
14. Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290,
15. Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. et Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? - Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 290-306, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.
16. Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L. et Morel, S., 2007. Analysis of Near Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, in Press,