



Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud,

Ecole des Mines de Paris
& Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie

Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives

Modélisation de la production des apports sédimentaires dans le bassin versant de la Durance

Loïc Fournier

Directeur de recherche : Jean-Pierre Bouchard (ingénieur sénior EDF)

Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement
Centre de Recherche & Développement EDF
Groupe Environnement, Eau, Economie.
6 quai Watier
78401 Chatou cedex

Septembre 2004

Table des Matières

Table des Matières	1
1-Présentation du LNHE	3
1-1 Présentation de la division R&D d'EDF.....	3
1-2 Positionnement du LNHE au sein d'EDF – R&D.....	4
1-2-1 Missions du LNHE.....	4
1-2-2 Organisation du LNHE.....	5
1-2-2-1 Le groupe P76.....	5
2-Présentation de la zone d'étude.....	6
2-1 Présentation du bassin de la Durance.....	6
2-2 Carte d'identité de la Durance.....	6
2-2-1 Contexte géographique.....	6
2-2-2 Contexte climatique et végétation.....	7
2-2-3 Contexte géologique et hydrologique.....	8
3-Objectifs du stage.	12
4-Origine des Matières en Suspension	14
5-Résultats	16
5-1 Quantification du flux	16
5-1-1 Génération des chroniques de débit.....	16
5-1-2 Génération des chroniques journalières de MES.....	17
5-2 Présentation et exploitation du modèle MORDOR	23
5-2-1 Principe de modélisation des apports solides	23
5-2-2 Calage du modèle.....	24
5-2-3 Exploitation, extension aux autres Bassins versants.	28
5-3 Analyse du modèle.....	30
5-3-1 Analyse de la statistique des apports	30
5-3-2 Ajustement d'une distribution de Gumbel sur les flux annuels de TSS.....	30
5-3-3 Relation TSS/Pluie et TSS/Débit.....	31
6-Analyse des séries de flux de MES sur la Durance....	32

6-1	Modèle GIS Durance	32
6-2	Analyse statistique des séries modélisées	34
6-2-1	<i>Analyse fréquentielle des flux modélisés de Transport Solide par Suspension (TSS)</i>	<i>34</i>
6-2-2	<i>Répartition mensuelle des flux.....</i>	<i>35</i>
7	Détermination des règles de gestion des retenues ..	36
7-1	Analyse des flux modélisés transités et déposés.....	36
7-2	Détermination du débit de chasse	37
7-3	Détermination de la durée de chasse.....	38
7-4	Courbe-guide flux/débit en aval du point triple.....	39
8	Conclusions – Perspectives	42
9	Annexes.....	45
	Annexe 1	45
	Annexe 2.....	49
	Annexe 3.....	52
10	Références	53

1-Présentation du LNHE

La loi n° 46 628 du 8 avril 1946 est à l'origine de la création d'Électricité de France (EDF), Service National, Etablissement Public de caractère Industriel et Commercial (EPIC), dont la mission est de produire, transporter et distribuer l'électricité en France.

1-1 Présentation de la division R&D d'EDF.

La mise en œuvre et le développement des systèmes de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique posent à EDF un grand nombre de problèmes scientifiques et techniques que l'entreprise doit résoudre en menant en permanence des études et des recherches dans de multiples domaines. Elles sont effectuées par la Division Recherche et Développement.

Forte de 2 300 chercheurs et techniciens et d'un budget de l'ordre de 424 millions d'euros, cette Division dispose de laboratoires en matière de génie électrique, d'étude de matériaux, de mécanique, de thermique ou d'hydraulique, laboratoires appuyés par d'important moyens numériques de simulation. Les compétences multidisciplinaires couvrent l'ensemble des domaines techniques et intègrent la dimension humaine et sociale des projets. Voici le détail de la répartition de son budget :

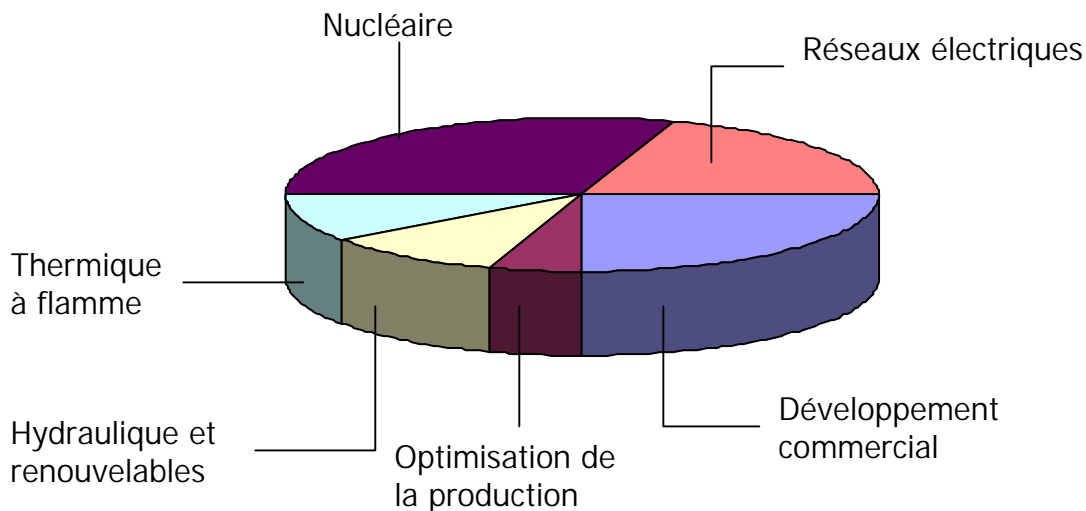


Figure 1 : Budget de Division R&D en 2000

L'environnement, domaine transverse, représente 25% du budget global de la recherche.

Mon stage, d'une durée de sept mois, s'est déroulé au sein du LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement) à Chatou (78).

1-2 Positionnement du LNHE au sein d'EDF – R&D

Issu de la fusion, en 2000, du Département Laboratoire National d'Hydraulique et du Département Environnement, le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) est l'un des départements de la Division Recherche et Développement, elle-même rattachée à la Direction de la Stratégie et du Développement d'EDF (cf. fig. 2).

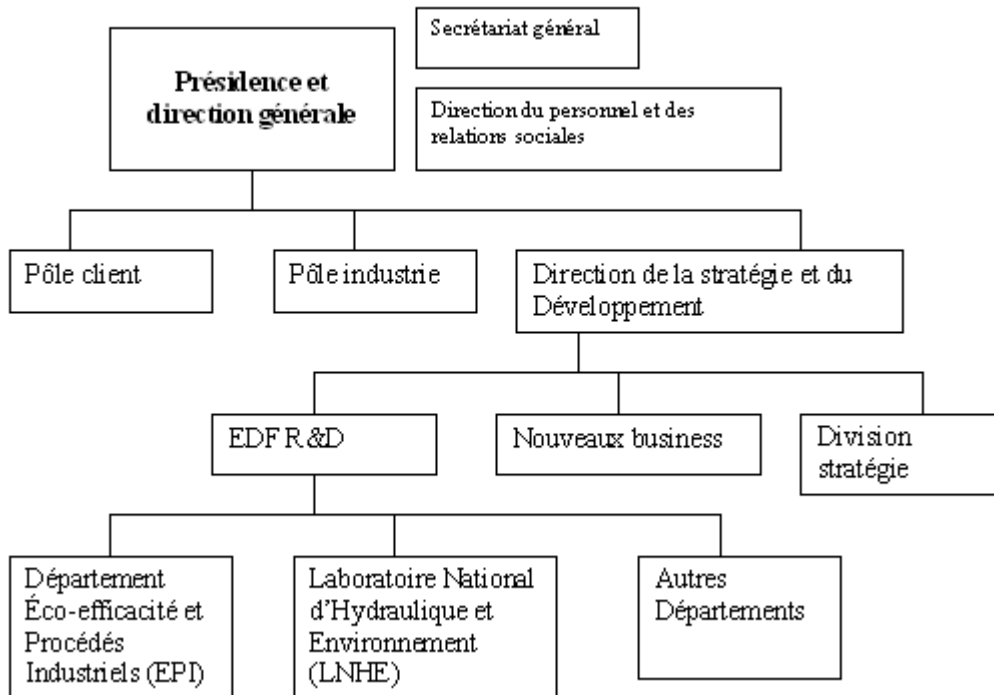


Figure 2 : Positionnement du LNHE au sein d'EDF

1-2-1 Missions du LNHE

Le Département Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement regroupe les compétences de EDF-R&D dans le domaine de l'eau : écoulements à surface libre et souterrain, qualité des eaux, environnement aquatique des ouvrages de production.

La mission principale du Département est d'apporter au groupe EDF les moyens d'exploiter de façon sûre, compétitive et acceptée par le public le parc de production existant (nucléaire, hydraulique, thermique) ou futur (nouveaux moyens de production, énergies renouvelables) en France et à l'étranger :

- en maîtrisant l'impact de leurs installations sur les eaux de surface et souterraines
- en minimisant l'impact de l'environnement aquatique sur les ouvrages EDF
- en recherchant des solutions innovantes permettant de satisfaire les contraintes réglementaires ou de tirer parti de l'ouverture des marchés de l'électricité, autour de la ressource en eau.

La réalisation de cette mission conduit à concevoir et mettre en œuvre des méthodes fondées sur :

- des mesures in situ
- des essais sur installations expérimentales et des analyses en laboratoire
- des développements de codes et de systèmes informatiques.

Le Département veille à maintenir, et dans certains domaines à développer de nouvelles compétences clefs, en lien avec les enjeux du Groupe EDF. Les compétences et les moyens du département peuvent également être mis à la disposition de clients externes.

1-2-2 Organisation du LNHE

Le département regroupe une centaine de personnes et est composé de différents groupes d'études constitués pour des durées plus ou moins longues selon les projets en cours. Ainsi en mars 2004, les groupes constitués sont les suivants :

- P75 : Groupe Ouvrage d'Eau et Environnement
- P76 : Groupe Gestion Hydro Environnementale des ouvrages
- P77 : Groupe Industrie, Eau, Environnement et Santé.

Mon stage au LNHE a eu lieu au sein du groupe P76.

1-2-2-1 Le groupe P76

L'équipe du P76 est constituée de 30 personnes dont 23 chercheurs.

Les domaines d'activité du groupe sont les suivants :

- Modélisation hydraulique
- Sédimentologie
- Hydrologie
- Hydrobiologie
- Économie et usage de l'eau

2-Présentation de la zone d'étude

2-1 Présentation du bassin de la Durance

La zone d'étude concerne le bassin de la moyenne et basse Durance, depuis Serre-Ponçon, jusqu'à Avignon (en rouge sur la carte):

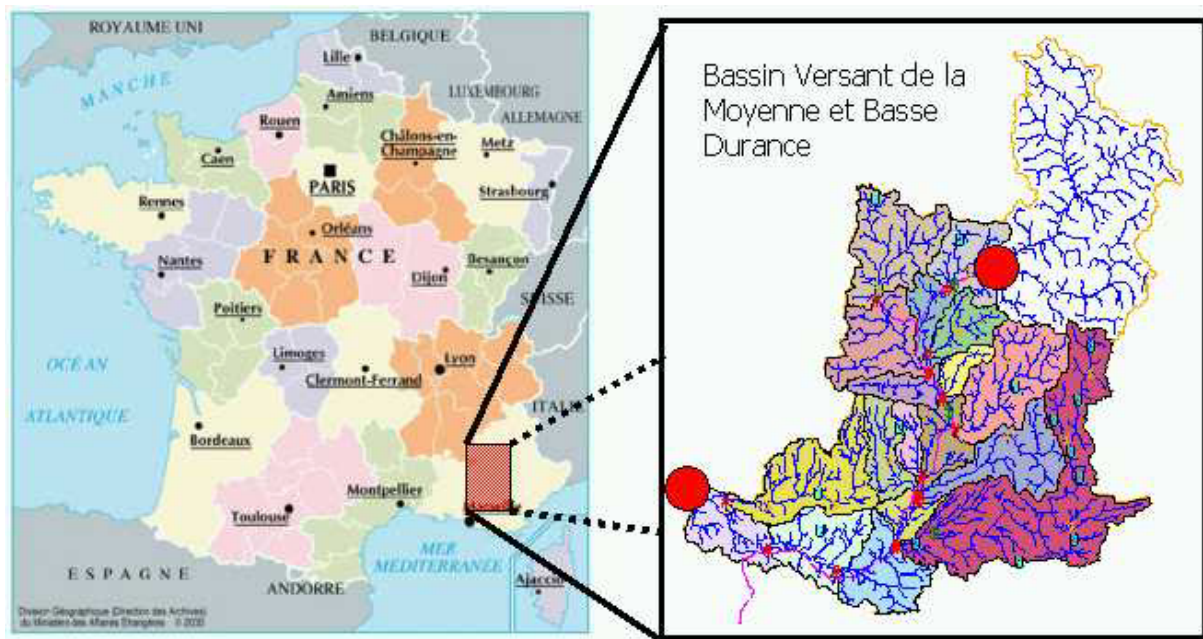


Figure 3 : Bassin de la Durance entre Serre-Ponçon et Avignon

2-2 Carte d'identité de la Durance

Trait d'union régional des montagnes hautes alpines aux plaines du Comtat, voie historique de circulation des hommes et des bêtes, terre agricole fertile, zone d'intervention humaine, industrielle et commerciale, réservoir d'eau et d'énergie, milieu naturel exceptionnel : la vallée de la Durance procure à l'ensemble de la région les atouts de développement les plus variés.

Une légende raconte que lorsque le Pô et la Durance se sont séparés, le premier a dit à la seconde : « *je vais fertiliser les plaines de Lombardie, toi, va dévaster la Provence...* ». Aujourd'hui encore, la Durance reste ce cours d'eau à la fois fleuve, rivière et ruisseau, synonyme de fertilité et de crues.

2-2-1 Contexte géographique

La Durance constitue le deuxième affluent du Rhône (après la Saône), qu'elle rejoint en rive gauche aux environs d'Avignon. C'est la première rivière torrentielle de France avec ses 290 kilomètres de long et une pente moyenne de 3‰ sur plus de

200 kilomètres. Elle prend sa source au col de Montgenèvre près de Briançon à une altitude moyenne de 2300 mètres puis draine un bassin de 14200 km² pour rejoindre le Rhône à la cote +13 mètres. Le bassin est caractérisé par l'affrontement entre les influences alpines et méditerranéennes.

Les bassins de la Moyenne et de la Basse Durance couvrent les trois quarts du bassin total, soit environ 10000 km². Ils constituent deux unités géographiques à part entière :

- ✓ La Moyenne Durance, de Serre-Ponçon à Pont Mirabeau. Avec une altitude moyenne de 1300 mètres et une pente voisine de 3‰, c'est un paysage de moyenne montagne constitué au Nord-Ouest par le Laragnais (relief modéré) et au Nord-Est par les massifs subalpins encore élevés de Digne et du Haut Verdon (Mont Pelat 3051 mètres). Ces différents paysages présentent des morphologies caractéristiques marquées par une érosion intense : les badlands ou « roubines ». Plus au sud, on trouve le plateau de Valensole aux altitudes plus faibles.
- ✓ La Basse Durance, de Pont Mirabeau jusqu'à Avignon, présente des altitudes moins élevées mais conserve des pentes importantes (2.5 à 3‰). Elle possède un caractère de moyenne montagne méditerranéenne et se présente surtout comme une vaste plaine alluviale.

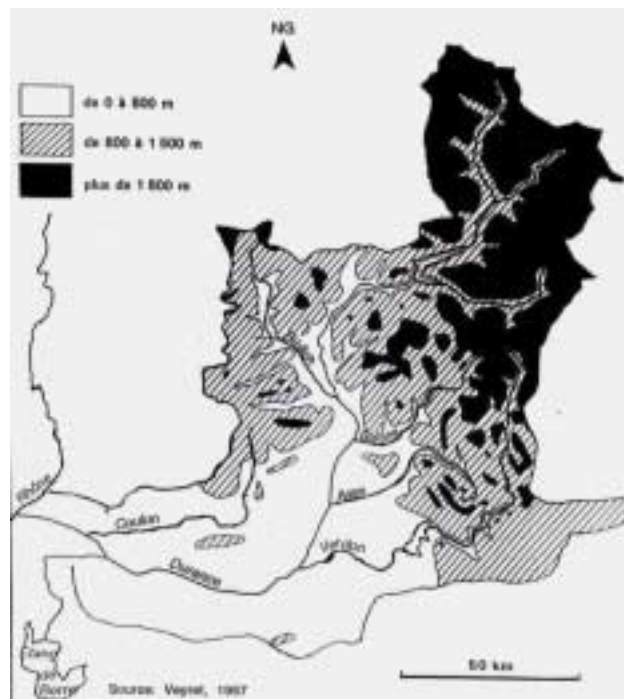


Figure 4 : Carte des altitudes du BV de la Durance

2-2-2 Contexte climatique et végétation

Le bassin de la Durance, globalement sous climat méditerranéen, se caractérise par l'affrontement des influences continentales et méditerranéennes.

En Moyenne Durance, les précipitations connaissent des différences saisonnières marquées avec des maxima en automne et au printemps.

En Basse Durance, le climat est typiquement méditerranéen avec une température moyenne de 13°C et une moyenne des précipitations de 700 mm. Le régime des pluies est orageux : 30 à 50 % des pluies ont une intensité supérieure à 30 mm/jour et tombent en moins de 75 jours.

En ce qui concerne la végétation, le bassin de la Durance oppose une végétation relativement dense au Nord à une végétation méditerranéenne pauvre et discontinue au Sud.

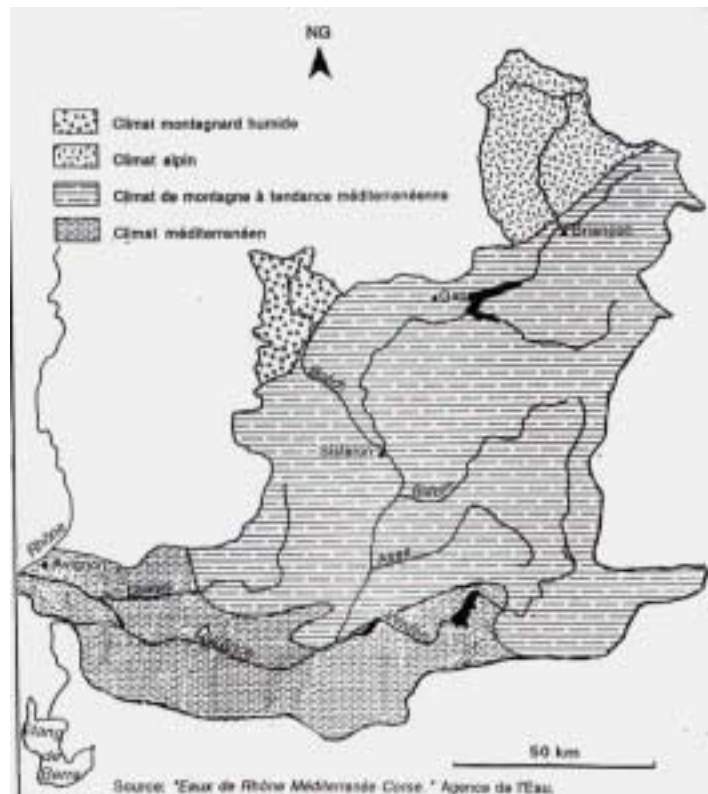


Figure 5 : Carte du climat sur le BV de la Durance

2-2-3 Contexte géologique et hydrologique

Le contexte géologique est complexe car le bassin de la Durance s'inscrit sur des formations variées :

- Sur la marge ouest s'étendent les chaînes subalpines des Alpes du sud (Vercors, Dévoluy, Diois, Baronnies, Ventoux, chaînes de Haute-Provence). Leur matériel est constitué de sédiments presque exclusivement marins déposés pendant le mésozoïque (+conglomérats continentaux entre Digne et Manosque) sur une plate-forme en voie d'affaissement progressif mais plus ou moins immergée suivant les points. Cette plate-forme était, au début du Secondaire, c'est-à-dire à l'arrivée de la mer, une surface peu accidentée (pénéplaine) résultant de l'érosion presque complète de terrains anciens

(chaîne hercynienne). Des morceaux de cette vieille plate-forme affleurent, fortement soulevés et disloqués par le plissement alpin, dans les massifs des Ecrins et du Mercantour (Argentera), dits « massifs centraux ». Ces massifs sont presque entièrement constitués de matériel cristallin ou métamorphique. Les chaînes subalpines et les massifs centraux forment, avec quelques terrains tertiaires particuliers, la « zone externe alpine » ;

- Vers l'est, s'étend un pays beaucoup plus compliqué, où le plissement alpin a atteint, au Tertiaire, son maximum de puissance, peut-être parce que la croûte terrestre y était plus fragile. Les successions de terrains y varient rapidement d'un point à un autre et elles y sont beaucoup plus déformées car la contraction due au plissement alpin a été si intense que, faute de place, les terrains primaires et secondaires s'y sont empilés les uns sur les autres, donnant ainsi ce que les géologues appellent des nappes de charriage. Celles-ci caractérisent les « zones internes alpines » ;
- Au quaternaire, se sont formés des bassins alluvionnaires sur lesquels repose la basse vallée de la Durance. Les glaciers ont déposé des moraines que l'on retrouve jusqu'à Sisteron.

La Moyenne Durance se caractérise par l'importance des dépressions marneuses dans sa partie haute : on y rencontre le faciès des Terres Noires callovo-oxfordiennes en rive droite et des marnes liasiques en rive gauche.

Plus au Sud, la rivière suit l'accident tectonique médio-durancien ; elle entaille le bassin néogène de Valensole formé de dépôts molassiques oligo-miocènes et de poudingues mio-pliocènes.

Au Sud, les paysages calcaires deviennent prépondérants.

Le Bassin de la Moyenne Durance est drainé par quatre affluents majeurs en rive gauche : Le Sasse, le Vançon, la Bléone et l'Asse ; et trois en rive droite : le Buëch, le Jabron et le Largue.

En Basse Durance, l'affluent majeur est le Coulon.

Sous l'angle lithologique, le bassin de la Durance constitue une véritable mosaïque :

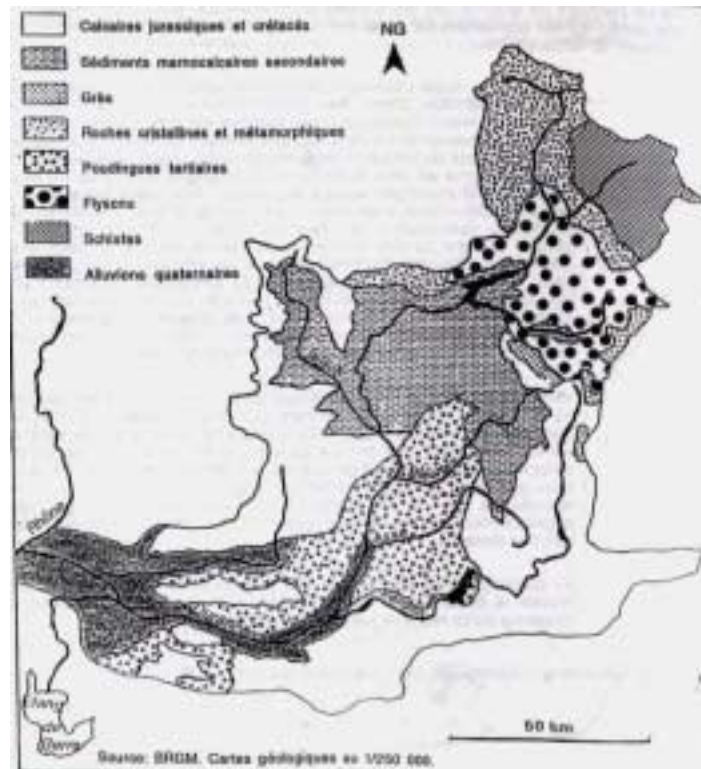


Figure 6 : Carte des lithologies sur le BV de la Durance

La Durance a connu dans les années 60, un programme d'aménagement de son lit. Elle possède aujourd'hui 14 retenues et 21 usines hydro-électriques. Elle est de plus canalisée sur une grande partie de sa longueur (220 des 290 km).

Les aménagements hydroélectriques d'EDF en Durance représentent environ un sixième des capacités de production de pointe nationales. « Nous pouvons fournir avec nos centrales l'équivalent de la production de deux centrales nucléaires, soit 2000 mégawatts. De plus, grâce à la souplesse de l'énergie hydraulique, notre système d'intervention rapide peut être opérationnel en dix minutes seulement contre 24h pour les centrales nucléaires... ».

Ce programme d'aménagement a permis de « mettre au pas » la Durance qui est passée en quelques années du statut de rivière colérique (on peut lire aujourd'hui encore, sur le fronton de la mairie d'Aix en Provence ces quelques mots : « les trois fléaux de la Provence sont le Mistral, le Parlement et la Durance »), à celui de petit ruisseau souvent à sec beaucoup plus calme.

Mais ces barrages connaissent un envasement très important qui compromet l'exploitation future.

C'est dans ce cadre que s'inscrit mon stage, afin de quantifier cet envasement.



Figure 7 : Photo aérienne de la retenue de Cadarache : 1963 (gauche) 2001 (droite). L'envasement est nettement visible (cercles rouges)

3-Objectifs du stage.

Si la charge caillouteuse est moins gênante qu'au début du siècle dernier, la charge en suspension pose des problèmes nouveaux à partir des années 60. Elle présente la particularité de circuler plus facilement dans les axes fluviaux et d'être perturbée dans son dépôt par les aménagements hydrauliques et l'altération des régimes hydrologiques.

Ainsi la Durance connaît-elle une forte sédimentation fine dans son lit mineur et majeur, suite à la dérivation du gros du débit dans le canal de Provence, au détriment de la qualité des biocénoses aquatiques mais au profit des espèces arborées du lit majeur, ce qui renforce la nécessité de l'essartage pour laisser passer les débits de crue.

Depuis le siècle dernier, de très nombreuses études ont décrit les mécanismes de transport par charriage (Einstein, Meyer-Peter...) alors que celui-ci ne représente qu'un faible volume transporté. A l'opposé, le transport par suspension, de par sa complexité, n'a suscité que très peu d'intérêt. Et cela, malgré les forts volumes transportés : il représente environ 80% du transport solide total.

Le transport par suspension intéresse les sables et limons de diamètre inférieur à 0,2 mm. La Durance contribue à hauteur de 6 Mt/an (régime naturel) et 3 Mt/an (régime actuel) au transport solide par suspension arrivant dans le Rhône (rapport de l'Institution interdépartementale des bassins du Rhône-Saône : Hydratec, SOGREAH, Minéa. Février 2001. *Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône*).

Le projet GIS (Gestion Intégrée des Sédiments) lancé par le LNHE, possède un volet Durance, dont l'objectif est d'établir des règles de gestion des ouvrages hydro-électriques. Le modèle hydraulique est couplé avec une modélisation conceptuelle des transferts de sédiment qui servira de base à la modélisation d'un nombre de scénarios de gestion. Ce modèle hydro-sédimentaire décrit l'écoulement et le transport de limons sur le tronçon entre le lac de Serre Ponçon et la confluence avec le Rhône.

Le modèle GIS Durance reproduit les circulations d'eau et de limons au long de la Durance et du canal usinier.

Des chroniques de débit liquide sur la moyenne et la basse Durance sont nécessaires pour les points d'entrée du modèle hydraulique pour une période de référence, définie comme étant 1990-2003. Cette période est suffisamment longue pour refléter la variabilité inter-annuelle importante existant dans l'hydrologie de la Durance, tout en étant représentative de la période la plus récente de mesures.

L'analyse des processus de sédimentation nécessite de connaître, en des points critiques du cours d'eau, le fonctionnement hydraulique de celui-ci. Ces points critiques sont des zones d'entrée du modèle de simulation, généralement situés au niveau d'aménagements et de confluences des principaux affluents. Cela implique de disposer – et dans le cas inverse, de générer - des chronologies de débit au niveau de ces points d'entrée du modèle hydro-sédimentaire, qui soient représentatives des écoulements observés. Du fait de la dynamique du bassin versant de la Durance, et des processus de transport de sédiments qui en découle, les simulations seront faites au pas de temps journalier, et dans la mesure du possible lors des épisodes de crue,

au pas de temps horaire. La reconstitution des chroniques de débit doit donc être réalisée au moins au pas de temps journalier.

Parallèlement, on va reconstituer les chroniques de MES sur la même période.

Le projet GIS est destiné d'une part, à simuler différents scénarii d'exploitation des ouvrages hydroélectriques afin de déterminer leur impact à long terme, en intégrant les contraintes fonctionnelles, administratives et économiques et, d'autre part, il vise à établir des règles de gestion de ces ouvrages.

Ce stage de DEA au sein du LNHE est centré essentiellement sur l'étude des apports sédimentaires dans le bassin de la Durance. Pour cela, on déterminera les origines du transport sédimentaire. Dans un second temps, nous chercherons à quantifier les flux de sédiments qui transitent par la Durance et ses aménagements.. On essaiera enfin de déterminer une tendance en étudiant statistiquement les flux de sortie modélisés afin de trouver une règle de gestion la plus appropriée pour limiter l'envasement.

4-Origine des Matières en Suspension

Avant d'entrer dans la partie quantitative du transport sédimentaire, il est nécessaire d'avoir une première idée des mécanismes à la base de cette érosion.

L'origine des Matières En Suspension dans le bassin versant de la Durance a été étudiée par Claire Alary dans sa Thèse. Elle s'est intéressée aux compositions minéralogiques des fractions argileuses et non argileuses des sédiments déposés au fond des retenues. Elle montre ainsi que le cortège minéralogique des sédiments est fortement ressemblant à celui de la formation des Terres Noires. Le faciès des Terres Noires est une formation marneuse du callovo-oxfordien (-150 Ma) qui se caractérise par l'association de trois phases minérales : argile, quartz et calcite. Les Terres Noires constituent une formation à dominante argileuse faisant partie de la série du Jurassique du bassin rhodanien. Puissante de 2000 mètres, elle affleure largement au niveau des grands anticlinaux profondément entaillés par l'érosion. Cette formation s'avère alors être la meilleure candidate comme source de la production en sédiments dans le bassin de la Moyenne Durance.

Parmi l'ensemble des terrains affleurant constituant le bassin de la Durance (14200 Km²), ceux qui contribuent de façon prépondérante à l'érosion et au transport solide en suspension par la rivière et son réseau d'affluents sont donc les terrains marneux. Très érodables en surface, ils se décomposent en éléments fins très facilement repris par les eaux de ruissellement et transportés en suspension par les cours d'eau sur de grandes distances. Ils se déposent ensuite dans les retenues et dans l'étang de Berre, où on les qualifie alors de limons. Ils constituent le problème majeur posé au plan de réhabilitation de la Durance et de l'étang de Berre.

Le service RTM 04 (Restauration des Terrains en Montagne) a estimé que les terrains dont provient la quasi totalité de ces limons correspondent à des terrains marneux très dénudés qui représenteraient une surface d'environ 20000 ha, soit 1,5% du bassin versant, répartis sur le département des Alpes de Hautes Provence, en vallée du Buëch de façon dominante et sur le département des Hautes Alpes, dans le Dignois et le Sisteronnais essentiellement. Pour ce dernier département, on estime qu'une commune sur 3 (soit 70 au total) est confrontée à des problèmes d'érosion liés à la présence de Terres Noires.

Une première cartographie des zones les plus exposées à l'érosion a été réalisée par le CEMAGREF en 1993, à la demande de l'Agence de l'eau RMC. Il existe aussi quelques exemples de cartographie, comme celle dressée au 1/10000^{ème} des terrains érodés du bassin de la Bléone.

Les cours d'eau de la région transportent une quantité très importante de sédiments dont la source essentielle est la dégradation des Terres Noires dans les zones en cours de ravinement intense appelées « badlands » par les anglo-saxons.

D'une façon générale, le risque d'érosion des sols en un lieu est lié aux caractéristiques pluviométriques locales. En fait, l'érosion est conditionnée par l'interaction du climat et du type de végétation qui lui est adaptée. Ce dernier joue un rôle protecteur vis à vis de l'érosivité des sols. Les badlands apparaissent dans des régions à climat chaud et sec où la végétation est pauvre. La présence de ces badlands est liée aux lithologies peu perméables (marnes) qui favorisent le ruissellement superficiel. L'influence des fortes pentes va jouer un rôle négatif sur la recolonisation des badlands par la végétation.

D'une façon schématique, les phénomènes d'érosion résultent de la combinaison de processus complexes, liés d'une part au contexte lithologique constituant l'érodabilité, et d'autre part, au climat qui est à l'origine des agents d'altération et des agents érosifs. L'agent érosif majeur est la pluie. La végétation ou l'action de l'homme contribuent à limiter ou accélérer les processus de l'érosion pluviale.

Les Terres Noires présentent une très grande sensibilité à l'altération physico-chimique. Leur niveau d'altération plus ou moins important selon les endroits, résulte on l'a vu, de la combinaison de divers processus saisonniers : dissolution/halloclastie, alternance gel/dégel, humectation/dessiccation. L'ensemble de ces processus conduit à une fragilisation et à une augmentation de la porosité de la roche saine vers la surface. Ceci va faciliter les transferts par voie dissoute et le transport solide lors du ruissellement superficiel.

Le gel et les alternances d'humidification/assèchement de la roche mère sont les agents responsables de la désagrégation des roches marneuses qui s'achève par la formation d'une couche d'altération à l'origine des sédiments capables d'être entraînés par la pluie et le ruissellement vers l'exutoire des bassins versants. Cette désagrégation est favorisée par la présence de diaclases, de joints et de plans de schistosité et elle varie en fonction du taux de calcaire, du taux d'argile et de la porosité des sols.

Ceci est confirmé par l'étude lancée sur le bassin expérimental de Draix (près de Digne). Ce programme, financé par le CEMAGREF, s'est donné pour mission de comprendre les mécanismes d'érosion torrentielle sur les bassins versants montagneux. Quantifier l'érosion, étudier les processus de formation des crues torrentielles, les effets des aménagements de correction et l'effet de la végétation sont les principaux objectifs des scientifiques. Il apparaît ainsi que la forêt joue un rôle important sur les crues, les débits de pointe, le coefficient de ruissellement et la durée de la crue.

Cette étude a permis l'élaboration d'un modèle hydro-sédimentologique.

Le transport solide par suspension dans la Durance a donc pour origine principale les formations des Terres Noires. L'ensemble des spécialistes s'accorde à dire qu'elles contribuent pour 80 % au transport solide en suspension sur la Durance.

5-Résultats

Comme on l'a vu précédemment, la première étape préalable à la modélisation consiste à fournir des chroniques de débit et de MES sur la période 1990-2003 pour chacun des bassins versants.

Dix-huit points d'entrée ont été sélectionnés, correspondant à neuf affluents principaux et neuf bassins versants intermédiaires. Ces derniers représentent les apports de débit liquide entre deux nœuds du modèle, par exemple entre le barrage de Saulce et de Saint Lazare, et pourraient se déduire des mesures aux points amont et aval. Les apports d'affluents principaux représentent l'apport en un nœud du modèle d'un bassin versant dont l'exutoire est à la confluence et peuvent se mesurer directement. On ne s'intéresse ici qu'aux affluents principaux.

5-1 Quantification du flux

Le modèle nécessite deux entrées différentes : une chronique de débits et une chronique de concentration de Matières En Suspension. Avant toute chose, il nous faut donc obtenir ces deux chroniques.

5-1-1 Génération des chroniques de débit

La première étape consiste à disposer d'une chronique de débit pour chacun des dix-huit bassins versants. Cette chronique s'étendra du 1^{er} janvier 1990 au 31 décembre 2003.

La DIREN dispose de nombreuses stations de mesure sur les cours d'eau affluents de la Durance mais ces mesures ne se situent pas nécessairement au niveau des exutoires de ces BV. La première opération consiste donc à étendre les chroniques de débits depuis les points de mesure jusqu'aux exutoires à l'aide la formule de « Myers » déterminée par la DTG (Division Technique Générale) d'EDF à Grenoble :

$$Q_{exutoire} = \left(\frac{S_{exutoire}}{S_{station_mesure}} \right)^{0.72} \times Q_{station_mesure}$$

avec Q le débit et S la surface du bassin versant correspondant.

La puissance 0.72 provient d'une détermination empirique faite par la DTG et ne s'applique qu'au bassin de la Durance et à celui du Rhône.

Une fois cette opération réalisée, on dispose alors de chroniques de débits « brutes » qu'il va nous falloir corriger. En effet, les exploitants des barrages mesurent en temps réel les débits au niveau des ouvrages. Ces mesures nous donnent donc un point de contrôle. Ainsi, il nous suffit de faire la somme des débits « bruts » amonts que l'on va comparer à la valeur mesurée au niveau du barrage. La différence correspond à la correction que l'on va réinjecter sur chaque bassin versant au pro rata des surfaces de bassins versants.

On dispose alors de chroniques de débits « corrigées » qui vont constituer l'un des points d'entrée de notre modèle.

5-1-2 Génération des chroniques journalières de MES

L'objectif de cette partie est de disposer de chroniques de MES, débits et flux sur la période 1990-2003 afin de pouvoir renseigner les entrées du modèle.

Les chroniques de MES modélisées par MORDOR n'étant pas disponibles dès le début du stage, il a été décidé d'anticiper et de commencer avec des chroniques « simplifiées » établies à partir d'une relation liant flux et débit. Ceci afin de disposer rapidement de chroniques pour permettre de faire tourner le modèle et le « déboguer » pour faire apparaître les éventuelles aberrations.

Nous savons pertinemment que le flux ne dépend pas uniquement du débit mais aussi de la pente, du couvert végétal, de la durée écoulée depuis la dernière pluie ... Mais dans un souci de simplification, nous établirons une loi liant flux et débit uniquement.

5-1-2-a) Connaissance du flux moyen annuel

On dispose de chroniques de débits journaliers sur la période concernée pour chacun des bassins versants répertoriés.

Il nous faut maintenant établir une chronique de flux à partir des données disponibles.

Données bibliographiques :

Dans un premier temps, on va déterminer la contribution des Terres Noires au transport solide. Pour cela, on se plonge dans la bibliographie et les travaux antérieurs afin de s'accorder sur des valeurs de coefficients d'érosion exprimées en t/km²/an.

- ✓ F. Combes (1981), tout d'abord, a évalué, alors qu'il était responsable du RTM (Restauration des Terrains en Montagne), l'ablation subie par des marnes noires du Jurassique dans la haute vallée de la Sasse (Alpes de Haute-Provence) : le barrage du Seignon, construit pour l'irrigation de cette vallée, a été colmaté en 18 ans ; F. Combes rapporte les 175500 m³ de matériaux aux 144 ha de badlands du bassin versant : il obtient ainsi une ablation de 6.8 mm/ an en moyenne (soit environ 120t/ ha/ an).
- ✓ L. Descroix, dans le cadre de ses travaux, a obtenu des valeurs supérieures à 100t/ ha/ an pour un bassin versant de 100m² avec un piège à sédiments.
- ✓ J. Hoorelbeck et J. C. Olivry (ORSTOM 1988) ont pu évaluer, en mesurant des dépôts dans les pièges à sédiments, pour des bassins versants de 7 à 85 ha, l'ablation dans les marnes noires du Callovo-Oxfordien (à Savournon, Hautes Alpes) de l'ordre de 113t/ ha/ an.
- ✓ Le Cemagref (1988), dans ces mêmes Terres Noires mais plus au sud, à Draix près de Digne, a pu évaluer la contribution au transport sédimentaire à 157 t/ ha/ an pour un bassin de 0.13 ha et à **146 t/ ha/ an** pour un bassin de 86 ha.
- ✓ M. Bufalo (BRGM-Marseille 1989) a étudié l'érosion des marnes noires à Saint-Genis (vallée du Buech) ; sur les trois années 1986 – 1988 et pour des bassins versants de 260 à 1620 m² (mais il en conclut que la taille n'influe pas sur les

résultats), il obtient des exportations annuelles de l'ordre de 190 t/ ha/ an, soit une ablation verticale de 1 à 2 cm.

- ✓ J.Peyronnet (ORSTOM-USTL 1988), toujours sur le site de Savournon, a obtenu des valeurs de 224 t/ ha/ an (de mars 1987 à avril 1988).

Ces résultats, s'ils varient dans un ordre de grandeur de 1 à 2, n'en sont pas moins proches les uns des autres. On retiendra la valeur de 150 t/ ha/ an, pas seulement parce qu'elle constitue une valeur moyenne des contributions, mais surtout parce qu'elle est issue de l'étude sur l'érosion des Terres Noires dans le bassin de la Durance menée par le Cemagref pour le compte de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et qu'elle constitue la référence en la matière.

Mesures :

On a mesuré pendant deux ans et demi environ, les concentrations de MES journalières sur trois bassins qui sont :

- ✓ Le Buech amont
- ✓ La Bléone
- ✓ L'Asse

Les mesures de concentration ont été réalisées à l'aide de stations de prélèvement installées dans la rivière.

Nous allons donc mettre en relation les données issues de la bibliographie et les mesures dont nous disposons sur les trois bassins versants de l'Asse, de la Bléone et du Buech amont. Ces mesures nous permettent de déterminer le flux annuel mesuré sur ces trois bassins.

Flux annuel mesuré (en tonnes)	2001*	2002	2003
Buech amont	43 899	383 443	292 274
Bléone	13 899	557 997	438 011
Asse	35 209	485 718	322 837

Tableau 1 : Flux sédimentaires annuels mesurés

*: 6 mois de mesure

Une fois ce travail réalisé, il nous faut maintenant déterminer les surfaces occupées par les Terres Noires pour chacun des BV. On étudie les cartes géologiques de la région ainsi que la bibliographie.

Ces valeurs de flux mesurés permettent de calculer pour ces trois bassins versants des coefficients d'érosion que l'on va comparer aux valeurs données dans la bibliographie.

Extension géographique :

Enfin, il suffit d'étendre les coefficients d'érosions trouvés précédemment aux autres bassins versants pour lesquels on ne dispose pas de mesure, au pro rata des surfaces de Terres Noires présentes sur chacun.

On obtient alors les résultats suivants :

Bassin Versant	Surface Totale (km ²)	Surface Terres Noires (km ²)	Contribution Terres Noires (t/km ² /an)
Buech amont	723	35	6500*
Chambon-confluence	652	23	8000
Serre-Saulce	482	20	13000
Saulce-St Lazare	265	25	13000
Sasse	323	25	13000
Vançon	165	8	12000
St Lazare-Escale	252	4	12000
Escale-Largue	364	3	12000
Lauzon	175	5	12000
Largue	367	5	12000
Largue-Cadarache	198	2	12000
Bléone	901	26	10000*
Asse	685	19	12000*

Tableau 2 : Surfaces et contribution des Terres Noires

* : valeurs issues des mesures

On peut s'interroger sur la différence des contributions des Terres Noires obtenue entre le bassin versant du Buech amont et les autres bassins versants ; cette contribution variant d'un facteur deux. Ceci peut trouver son explication dans la nature même des marnes. En effet, on observe une variation de nature avec des marnes pulvérulentes facilement mises en suspension plus au sud (Chambon) et à l'est (Serre Saulce) alors que sur le bassin du Buech amont, ces marnes sont plus « dures » et contribuent moins au transport solide (TSS) car elles se présentent sous forme de plaquettes qui ont plus de mal à passer en suspension.

Ce sont grâce à ces bassins que l'on va pouvoir trouver une relation liant le flux au débit.

5-1-2-b) Elaboration de séries journalières

Dans un premier temps, on fait l'hypothèse suivante : les flux de MES sont liés aux débits. On suppose donc que les événements hydrologiques les plus forts en débit sont aussi les plus forts en flux sédimentaire. Autrement dit, le débit de rang *i* correspond au flux de rang *i*. Cette hypothèse forte, est valable car on travaille sur les débits et les flux classés.

Il existe donc une relation entre les courbes de débits classés et les courbes de flux classés que l'on va essayer d'établir sur les bassins versants pour lesquels on dispose de mesures.

Extension temporelle :

Dans un premier temps, l'étude minutieuse de la répartition des débits, des concentrations en MES et des flux montre une répartition saisonnière « tripolaire » :

- ✓ L' « automne » (octobre, novembre, décembre), représentant 80% des apports

- ✓ Le « printemps » (mars, avril, mai), constituant 10 % des apports annuels
- ✓ Le « reste », représentant les 10 % restants.

L'hypothèse envisagée est donc de caler une fonction de répartition pour chacune des saisons.

Pour cela, on trace les courbes de débits et de flux classés sur lesquelles on cale une fonction puissance (courbe de tendance Excel) qui nous paraît la plus appropriée pour décrire les variations de flux et de débit. Elle est du type : $\phi = A.Q^B$ (où ϕ représente le flux).

Il est important de remarquer que l'on cale cette fonction sur le « haut » de la courbe, c'est-à-dire correspondant aux débits et flux les plus forts (90% des flux ont lieu sur moins de 5% du temps). On procède ainsi pour deux raisons :

- ✓ D'une part, nous avons vu que les flux et débits les plus importants avaient lieu sur une petite période de temps (notre fonction rend donc bien compte des flux et débits forts en surestimant les débits plus faibles).
- ✓ D'autre part, un impératif de temps nous impose de choisir une solution qui soit la « moins mauvaise » (la plus rapide possible avec des résultats corrects).

Pour que la relation soit valable sur les différents bassins versants, il est nécessaire de normer par rapport au flux moyen et au débit moyen annuel.

Les courbes de débit et de MES peuvent s'écrire sous la forme d'une fonction puissance :

$$F_{\phi} = A \left(\frac{\phi}{\phi_m} \right)^n$$

$$F_Q = B \left(\frac{Q}{Q_m} \right)^{n'}$$

Avec F la fréquence.

Une fois que l'on dispose de nos trois fonctions de répartition, on va établir la loi de répartition générale de nos flux en fonction des débits. On obtient alors une fonction du type :

$$\frac{\phi}{\phi_{moyen}} = \alpha_{BV} \times \left(\frac{Q}{Q_{moyen}} \right)^{n_{BV}} \quad (1)$$

avec ϕ : flux, ϕ_{moyen} : flux moyen, α_{BV} : un paramètre propre du BV, Q : le débit, Q_{moyen} : le débit moyen.

Les paramètres α et n sont déterminés empiriquement pour chaque BV

Détermination de α et n

La fonction de répartition est obtenue en calant une fonction sur la courbe des flux classés pour le Buech amont, la Bléone et l'Asse. Cette fonction (1) est obtenue à partir de :

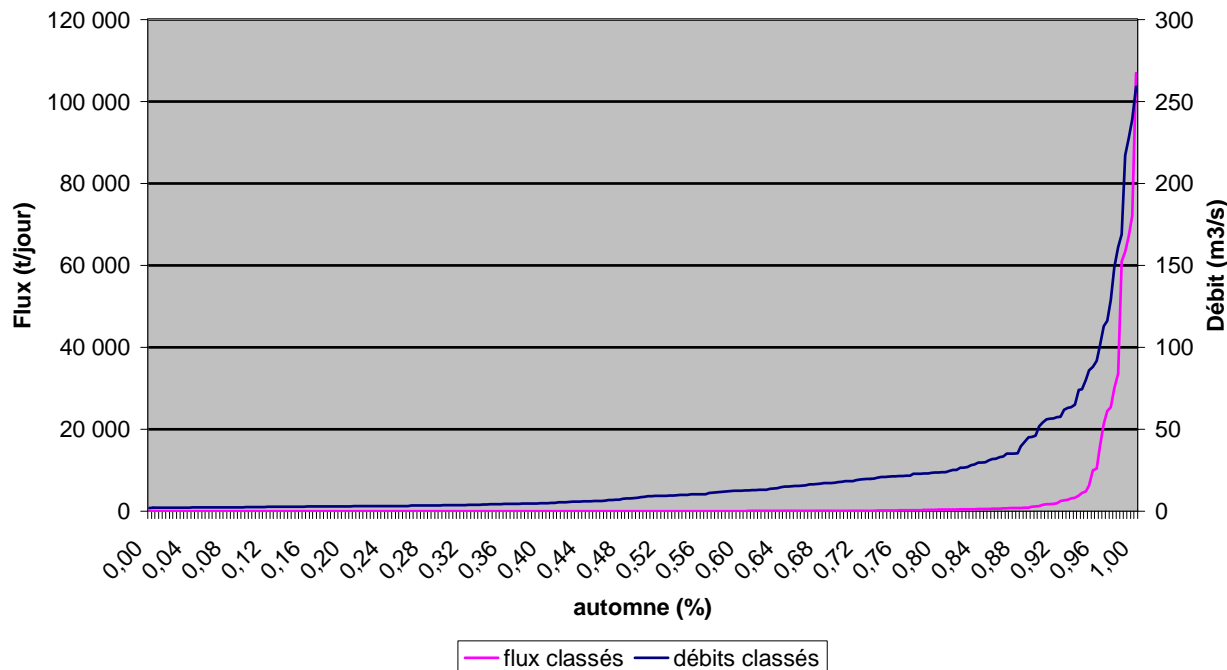


Figure 8 : Courbes des débits classés et des flux classés du Buech (automne)

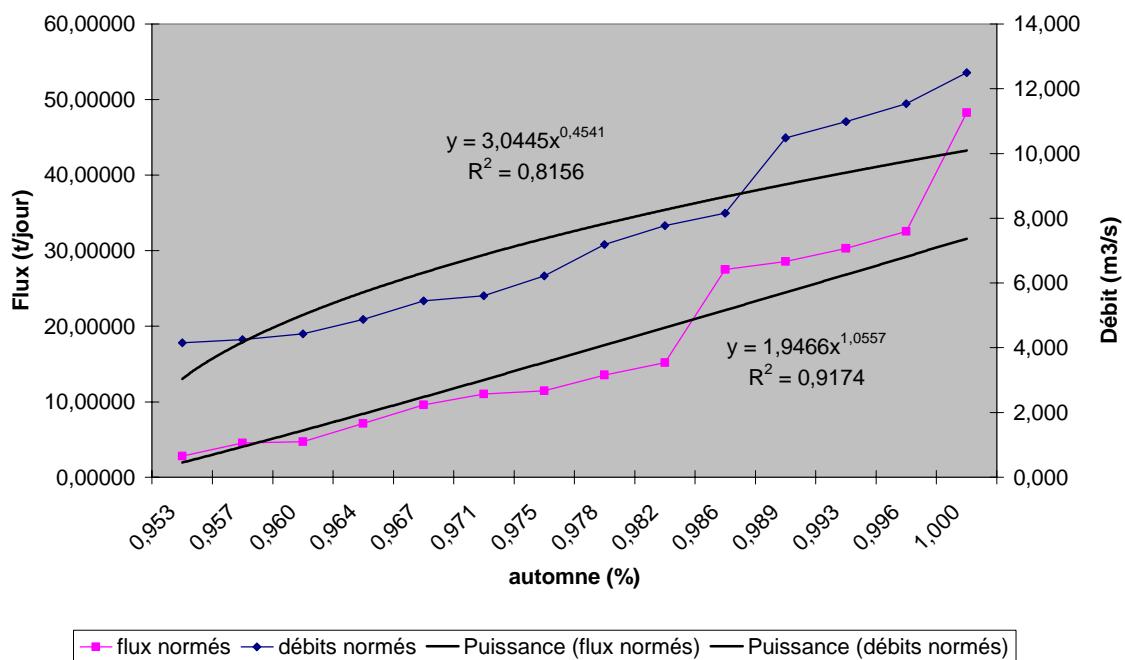


Figure 9 : Calage d'une fonction puissance sur les courbes de Flux et Débits classés du Buech (Automne)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\varphi}{\varphi_{moyen}} = A_{BV} \times x^{B_{BV}} \quad (2) \\ \frac{Q}{Q_{moyen}} = C_{BV} \times x^{D_{BV}} \quad (3) \end{array} \right.$$

avec A, B, C, D des paramètres propres au BV et x la fréquence d'occurrence.

		a	n
Buech amont	Printemps	1,6373	2,79
	Automne	1,9466	2,32
	Reste	1,5479	5,11
Bléone	Printemps	2,3782	3,26
	Automne	0,5423	3,49
	Reste	1,2025	3,53
Asse	Printemps	1,6373	3,81
	Automne	1,998	2,28
	Reste	1,5112	3,09

Tableau 3 : Coefficients α et n des bassins mesurés

On s'aperçoit de la variabilité des coefficients d'un bassin à l'autre. Pour l'extension géographique aux autres BV, on décide de prendre des coefficients moyens. On a alors :

$$\alpha_{BV} = \frac{\frac{1}{3} \sum (A_{Buech} + A_{Bléone} + A_{Asse})}{(C_{BV})^{n_{BV}}}$$

$$n_{BV} = \frac{\frac{1}{3} \sum (B_{Buech} + B_{Bléone} + B_{Asse})}{(D_{BV})}$$

Calcul du flux ϕ €:

Pour les bassins ne disposant pas de mesure, on va calculer le flux. Dans l'expression (1), la seule inconnue restante est le flux. On le détermine de la manière suivante :

$$\frac{\varphi}{\varphi_{moyen}} = \alpha_{BV} \times \left(\frac{Q}{Q_{moyen}} \right)^{n_{BV}}$$

$$\Leftrightarrow \varphi_j = \varphi_{moyen} \times \alpha_{BV} \times \left(\frac{Q_j}{Q_{moyen}} \right)^{n_{BV}}$$

Remarque : le flux moyen annuel est obtenu à partir des coefficients d'érodabilité calculés précédemment (*cf Tableau 2*).

On est alors en mesure de répartir le flux global annuel transitant dans chaque bassin versant de manière journalière. On obtient ainsi des chroniques de flux.

Nous avons donc une chronique de débits, une chronique de flux, il nous manque la chronique de MES. On l'obtient en faisant :

$$MES(g/L) = \frac{Flux(t/jour)}{Débit(m^3/s)} \times \frac{86400}{1000}$$

Cette relation présente l'avantage d'être facilement mise en œuvre et de donner des résultats assez intéressants compte-tenu de la simplicité de la relation. On s'aperçoit qu'elle modélise bien les forts débits de la queue de distribution (ceux pour lesquels le flux est le plus important). Néanmoins, elle s'éloigne des débits les plus faibles.

5-2 Présentation et exploitation du modèle MORDOR

L'expérience nous montre que les flux de MES ne dépendent pas uniquement du débit comme on l'a pris en compte dans la partie précédente mais aussi d'autres phénomènes tels que la pluie, le ruissellement...

Nous allons donc utiliser un modèle hydro-météorologique afin de reconstituer des chroniques de MES. Pour cela, nous faisons appel à deux modèles à réservoirs appelés MORDOR : le premier hydrologique et le second, sédimentaire.

Le principe de la modélisation du Transport Solide en Suspension (TSS) est le suivant :

- ✓ Calage d'un modèle hydrologique à réservoir (MORDOR) permettant d'identifier les composantes de l'écoulement : ruissellement du aux pluies, ruissellement du à la fonte nivale, écoulement de sub-surface et écoulement retardé. Ce modèle est utilisé par EDF pour réaliser des prévisions à quelques jours.
- ✓ Calage d'un modèle de flux solide à réservoir permettant de reproduire les flux sédimentaires à partir des températures, des pluies, des différentes composantes du débit (ruissellement de fonte et ruissellement superficiel). Ce modèle est expérimental, les données de TSS étant très rares en France. Il est utilisé pour étendre les séries de TSS en espérant ainsi mieux reconstituer la variabilité des processus.

5-2-1 Principe de modélisation des apports solides

MORDOR est un modèle qui simule le fonctionnement d'un bassin versant. Il a été développé en 1990 par le service ressources en eau de la DTG de Grenoble. Il s'agit d'un modèle à réservoirs : stock de neige, stock superficiel, stock évaporant, stock intermédiaire (nappes de versant), stock profond (nappes de vallées). Ce type de conceptualisation consiste à résumer le poids du passé par un certain nombre de variables d'état correspondant à la quantité d'eau stockée à l'intérieur du bassin sous diverses formes. Les échanges entre les réservoirs sont pilotés par des équations.

Mordor hydro raisonne de bout en bout sur des lames d'eau moyennes exprimées en mm. Les volumes stockés peuvent être déduits en multipliant ces lames d'eau par les surfaces de bassin.

Le modèle de reconstitution du TSS en flux journalier (*MORDOR sédiment*) est un modèle à réservoirs. Il utilise comme variables d'entrée les composantes de l'écoulement des pluies : ruissellement de fonte et ruissellement de pluie qui sont elles-mêmes issues du *MORDOR hydro*.

MORDOR sédiments est basé sur les processus suivants :

- ✓ La pluie, le ruissellement superficiel et la fonte des neiges produisent des MES qui se stockent dans le réservoir pour partie ou passent à l'exutoire pour le complément. La capacité à produire des MES pour les différents processus (pluie, fonte, ruissellement) est pris comme une fonction puissance de la variable
- ✓ Le débit reprend des MES dans le stock (dans la limite disponible) et les transporte à l'exutoire
- ✓ Chaque jour, le stock est incrémenté des apports (précipitation, ruissellement, fusion) et décrémenté de la reprise par les débits.

Les paramètres pris en compte dans la modélisation sont les suivants : Pluie, Température, Ruissellement, Erosivité, Stock et Reprise.

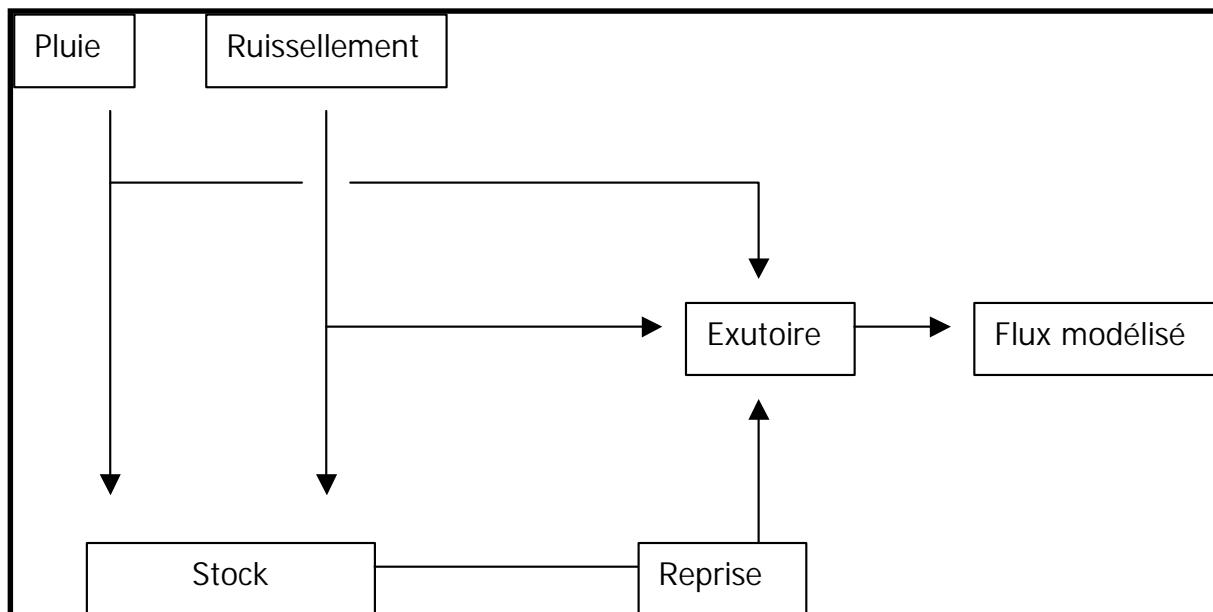


Figure 10 : Principe de fonctionnement de MORDOR sédiments

5-2-2 Calage du modèle

Le calage du modèle va du 7/07/2001 au 31/12/2003. Il s'agit d'une période de temps très restreinte (3 automnes et 2 printemps) avec un seul événement fort en novembre 2002.

Ce modèle nous permet d'obtenir des chroniques de flux plus proches de ce qu'elles sont dans la réalité car il prend en compte d'autres paramètres que la simple relation puissance liant flux et débit, comme par exemple : la pluviométrie et la température de l'air.

Ce sont donc ces chroniques que l'on va utiliser par la suite dans la modélisation.

En raison de la faible longueur de la série de transport solide, le calage d'un modèle à multiples paramètres est assez délicat. Pour le rendre plus robuste, le critère de calage a été choisi comme la somme de plusieurs sous critères complémentaires.

Ces derniers sont :

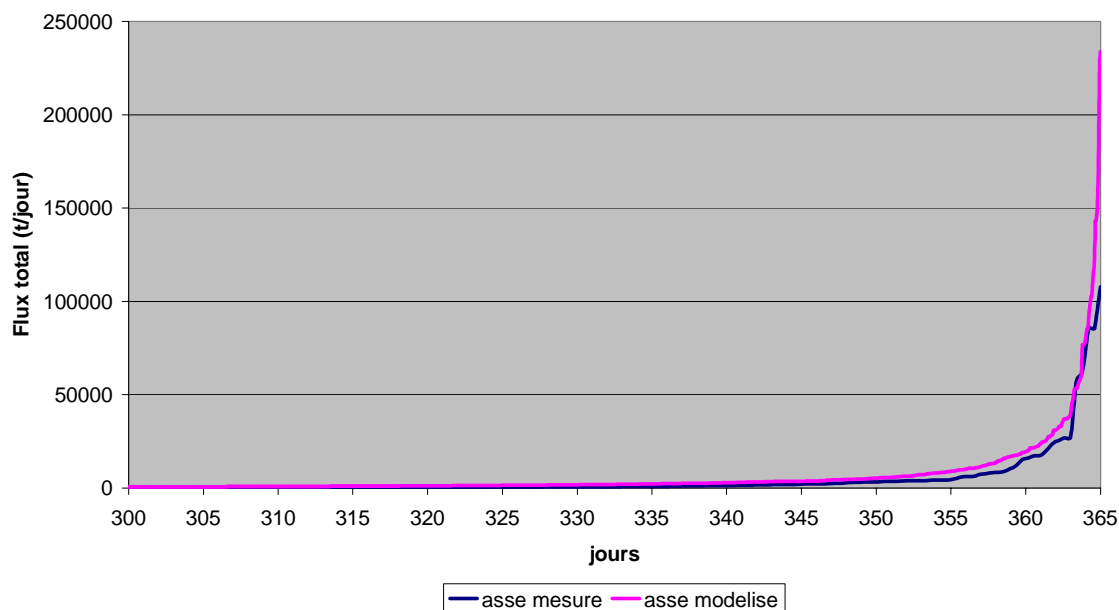
- ✓ L'écart sur les flux journaliers en valeur absolue (pris arbitrairement inférieur à 2 pour ne pas accorder trop de poids aux quelques évènements très forts)
- ✓ L'écart aux cumuls mensuels (pour privilégier le fait de retrouver les tonnages observés)
- ✓ L'écart entre la courbe de fréquence du modèle et des mesures (pour privilégier le fait de retrouver la même distribution statistique entre modèle et mesure).

Nous disposons désormais de deux types de séries de flux :

- ✓ Une série mesurée sur deux ans et demi (juillet 2001 à décembre 2003) pour les bassins versants du Buech amont, de la Bléone et de l'Asse.
- ✓ Une série modélisée sur 14 ans (janvier 1990 à décembre 2003) pour l'ensemble des treize bassins versants.

Il paraît intéressant de comparer ces deux séries de valeurs afin de voir si elles se comportent de la même manière et, sinon, de tenter d'expliquer d'où proviennent les différences.

On obtient les trois graphes ci-dessous :



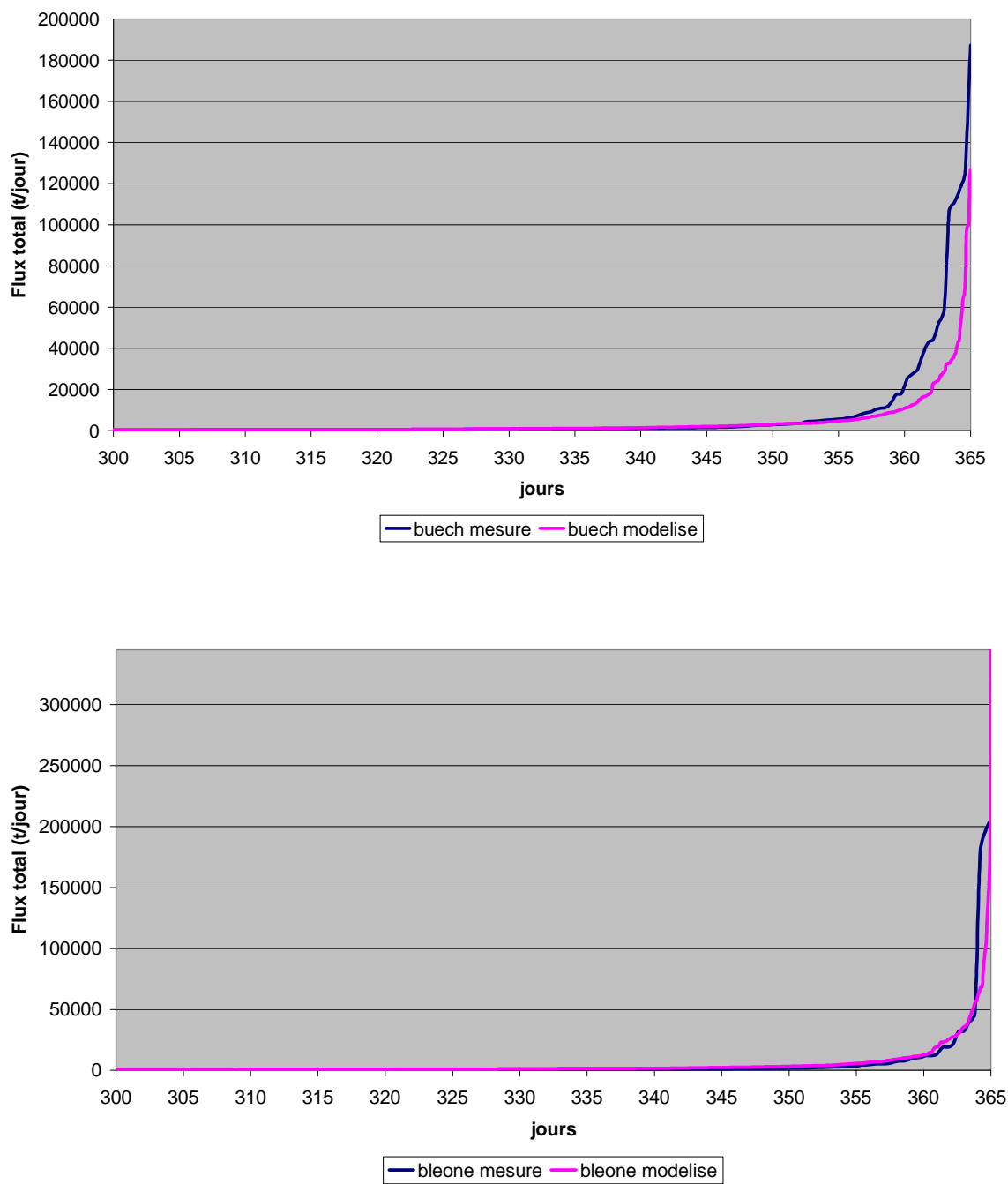


Figure 11 : Comparaison (modèle vs mesure) des flux classés pour trois BV

On note que les deux courbes mesures/modèle sont assez proches (écart de 5%). La petite différence entre les deux peut venir du fait que le modèle prend en compte 14 années, ce qui a pour effet de lisser les valeurs extrêmes car il utilise plus d'information.

Modélisation MORDOR (Bléone à Confluence) : période 1991-2001

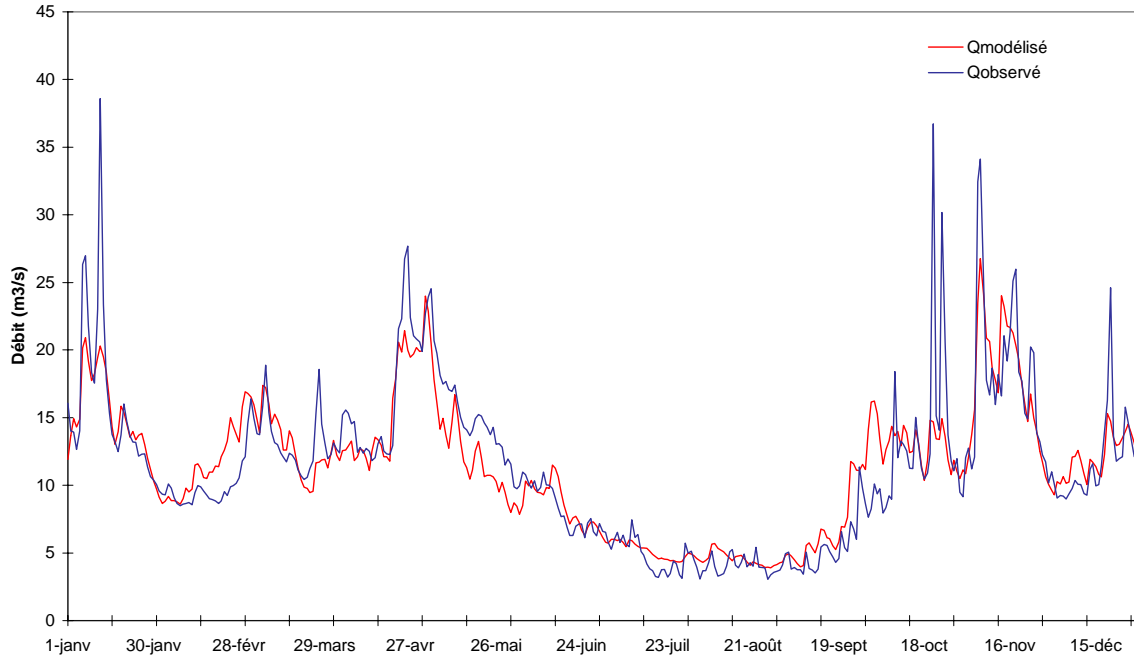


Figure 12 : Comparaison modèle vs mesure des flux journaliers pour le BV de la Bléone

Remarques :

Le modèle présente une qualité assez acceptable.
Coefficient de détermination en flux journalier : $R^2 = 0.9689$
Flux modélisé = 97.6 % Flux mesuré

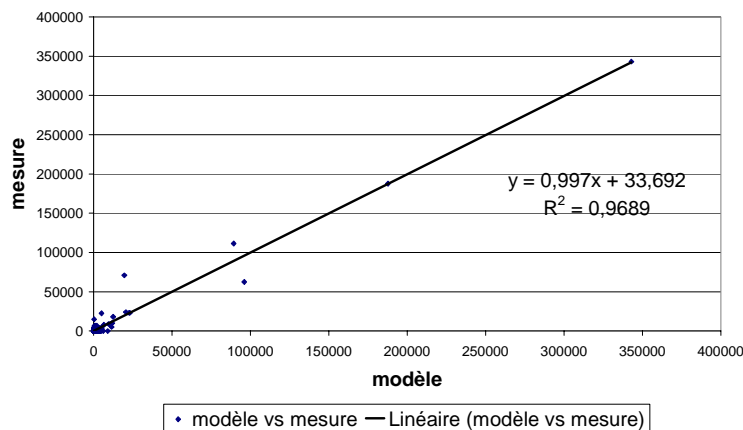
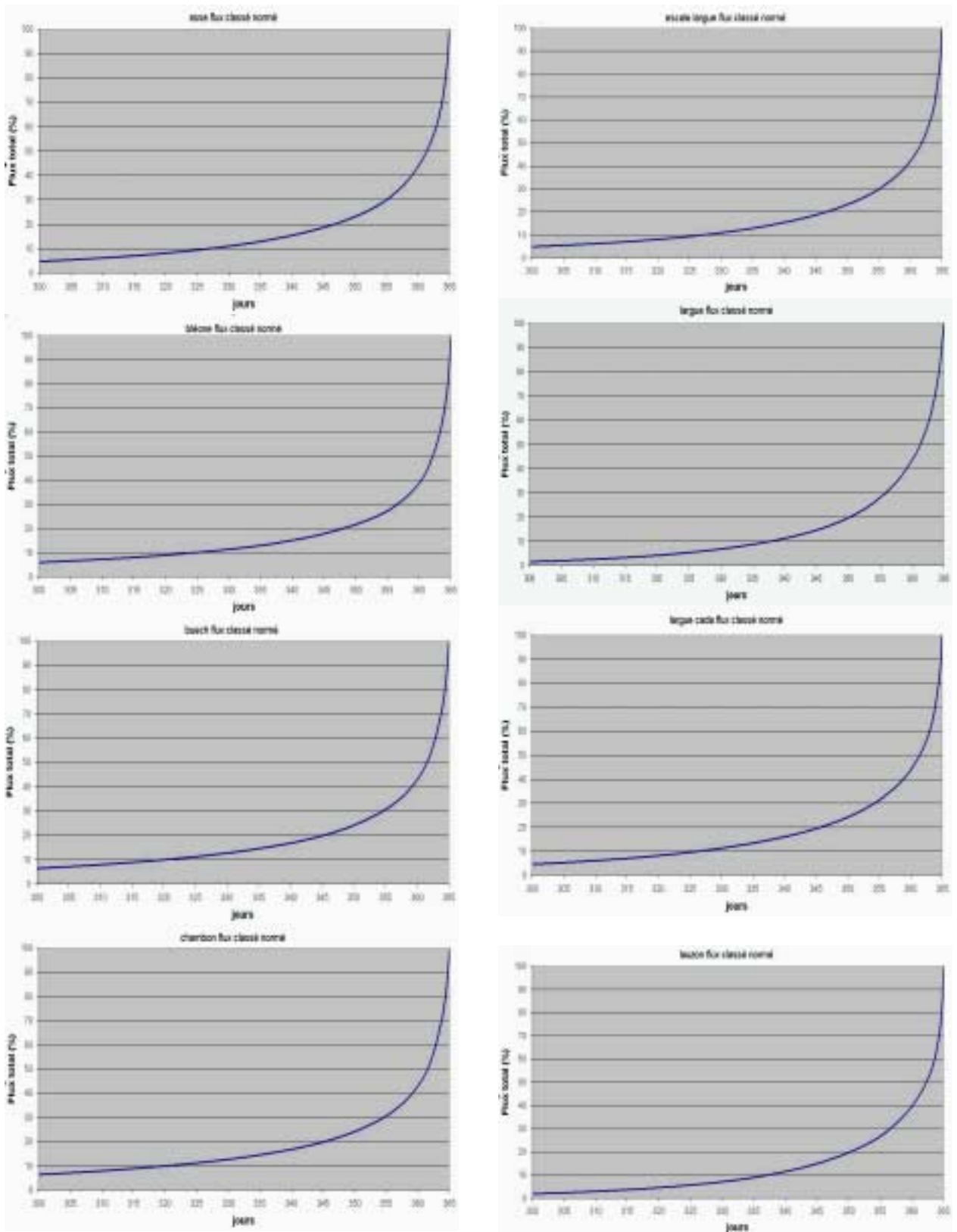


Figure 13 : Comparaison modèle / mesure pour le flux sédimentaire

5-2-3 Exploitation, extension aux autres Bassins versants.



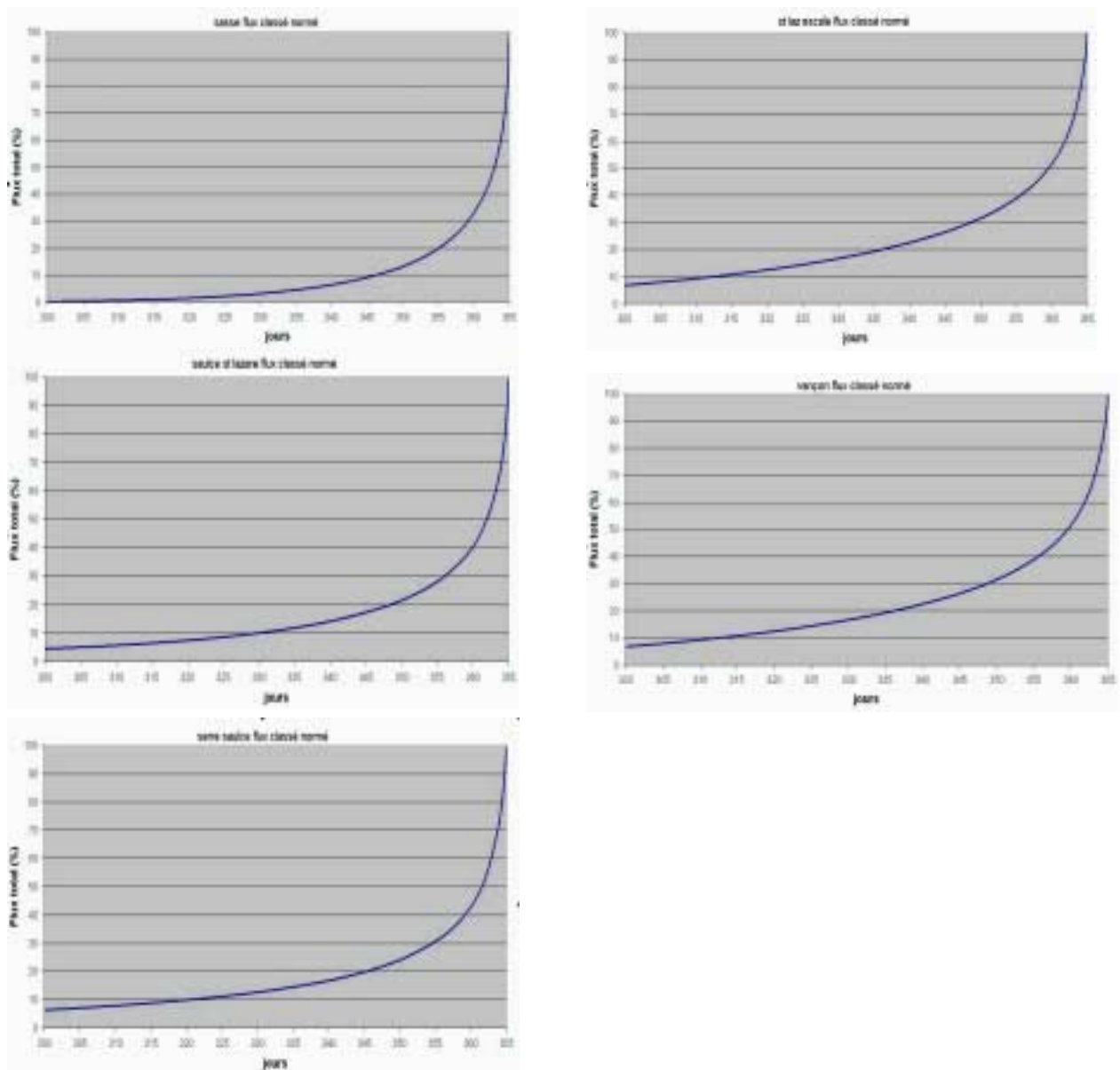


Figure 14 :Graphes des flux classés

L'extension des séries modélisées aux dix autres BV pour lesquels on ne dispose pas de mesure se fait en fonction de la surface de chaque bassin et du coefficient d'érosion calculé pour chacun (cf *Tableau 2*).

On remarque que l'essentiel du flux qui transite à l'exutoire de chacun des bassins versants, se produit de manière très « concentrée » sur l'année. En effet, on s'aperçoit que 90% du flux arrive en moins de 30 jours et dans certains cas, en moins de 20 jours (sasse). On retrouve la signature de précipitations méditerranéennes, rapides et brutales à la fois.

Dans tous les cas, 50% du flux solide passe en moins de cinq jours ce qui représente parfois (Sasse, Bléone, Buech, Asse,...) un à deux millions de tonnes de sédiments soient plusieurs centaines de milliers de tonnes par jour ! On a par exemple 650 000 tonnes qui transitent le 7 janvier 1994 sur le sasse et 345 000 tonnes le 1^{er} novembre 2003 sur la Bléone.

5-3 Analyse du modèle

5-3-1 Analyse de la statistique des apports

On ne dispose pas de séries de mesures très étendues (juillet 2001 à décembre 2003). On va ainsi regarder comment se situent ces années de mesure par rapport à une année « moyenne » obtenue à partir d'une série modélisée de 28 ans. On s'aperçoit alors que nos deux ans et demi de mesures se situent dans la moyenne : 2001 étant une année plutôt faible en flux tandis que 2002 est une année « noire » avec des flux très importants (*cf annexes 1*).

Si on s'intéresse maintenant à la répartition annuelle des flux mensuels, on remarque que les flux se concentrent essentiellement sur les mois d'octobre et novembre (45% du flux).

5-3-2 Ajustement d'une distribution de Gumbel sur les flux annuels de TSS.

On a vu que ce sont essentiellement des événements « extrêmes », ponctuels qui sont à l'origine de la quasi totalité du transport solide dans le bassin versant de la Moyenne et Basse Durance. Il a semblé intéressant d'essayer de caler une distribution de Gumbel qui caractérise les valeurs extrêmes sur la série des flux modélisés.

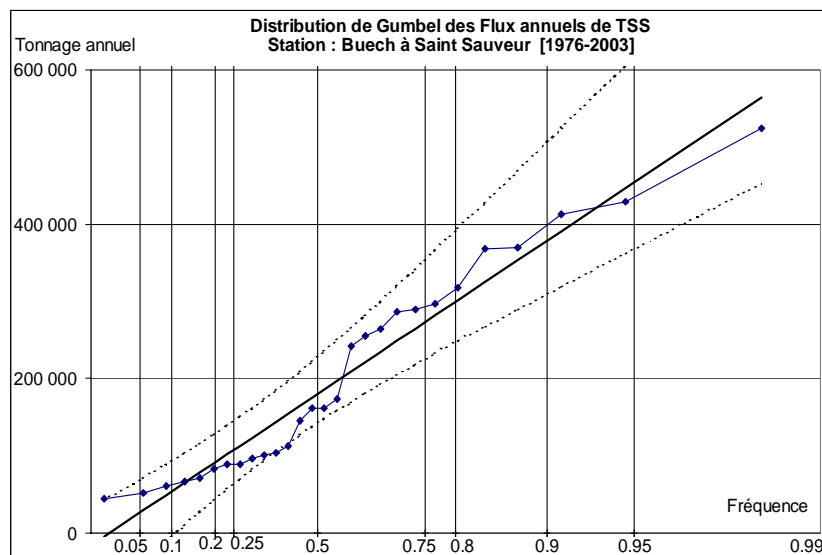


Figure 15 : Distribution de Gumbel des flux annuels sur le Buech amont

La courbe bleue représente le flux de sédiments en fonction de la fréquence d'occurrence. La courbe noire représente la distribution de Gumbel de ces flux. Les deux courbes en pointillés correspondent à l'intervalle de confiance à 90% (cf annexe 3).

On s'aperçoit que la distribution des flux et la distribution de Gumbel des flux sont assez proches notamment sur les événements de queue de distribution dits « extrêmes » qui contribuent majoritairement au flux total.

On obtient des courbes semblables pour chacun des BV étudié. Dans un souci d'économie de place, seul le graphe du Buech amont est présenté.

5-3-3 Relation TSS/Pluie et TSS/Débit

L'exploitation du modèle nous donne la possibilité de voir si le Transport Solide par Suspension est mieux corrélé au débit (§ 5-1) ou à un autre facteur notamment à la pluie (§ 5-2).

Or on s'aperçoit que la relation entre TSS et pluie donne de meilleurs résultats que la relation TSS/Débit :

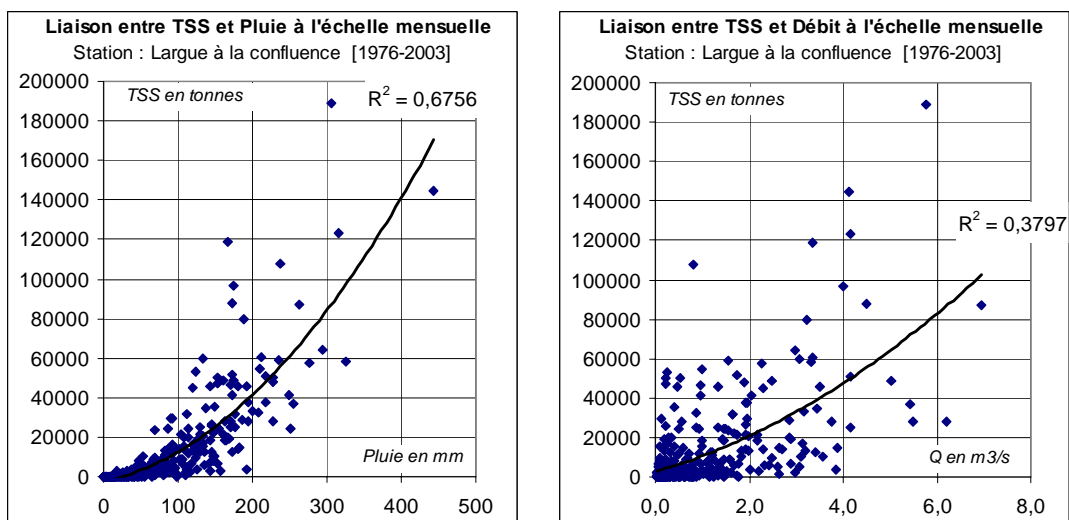


Figure 16 : Relation entre TSS et Pluie ou TSS et Débit

Ce résultat n'était pas une réelle évidence avant ce travail de modélisation. Il est donc très intéressant à mettre en relief.

6-Analyse des séries de flux de MES sur la Durance

Le modèle MORDOR nous a permis d'obtenir des chroniques de MES au niveau des exutoires des bassins versants. Le modèle GIS-Durance va nous permettre de généraliser à l'ensemble du Bassin de la Durance et ainsi d'obtenir des chroniques de MES au niveau des points qui nous intéressent à savoir les retenues et les usines hydroélectriques.

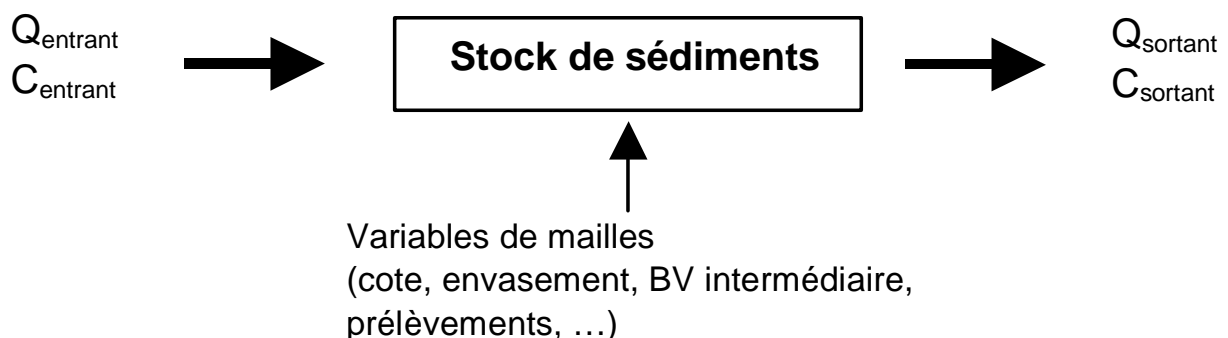
6-1 Modèle GIS Durance

Le domaine d'étude a été codé dans la plate-forme de calcul Platinéa appliquée au modèle GIS (Gestion Intégrée des Sédiments). On a découpé le domaine en 2500 mailles de calcul de longueur 200 mètres. Il existe cinq types de cellule différents :

- ✓ Bief de rivière : ce sont les tronçons représentant le lit naturel de la Durance.
- ✓ Bief de canal : ce sont tous les canaux usiniers ainsi que les conduites d'amenée.
- ✓ Retenue :
- ✓ Souille (étendue d'eau, gravière)
- ✓ Point triple : elle permet de gérer la dérivation vers l'étang de Berre ou le rejet en Durance via la restitution de Mallemort.

La plate-forme Platinea permet d'assembler différents codes (d'hydraulique, hydrologie...) fonctionnant sur PC. Elle est liée en pré et post traitement au SIG Arcview.

Sur chaque maille, la conservation des flux de MES et des débits est résolue de la manière suivante :



Le modèle de transport solide sur le Bassin Versant de la Durance peut se schématiser de la manière suivante :

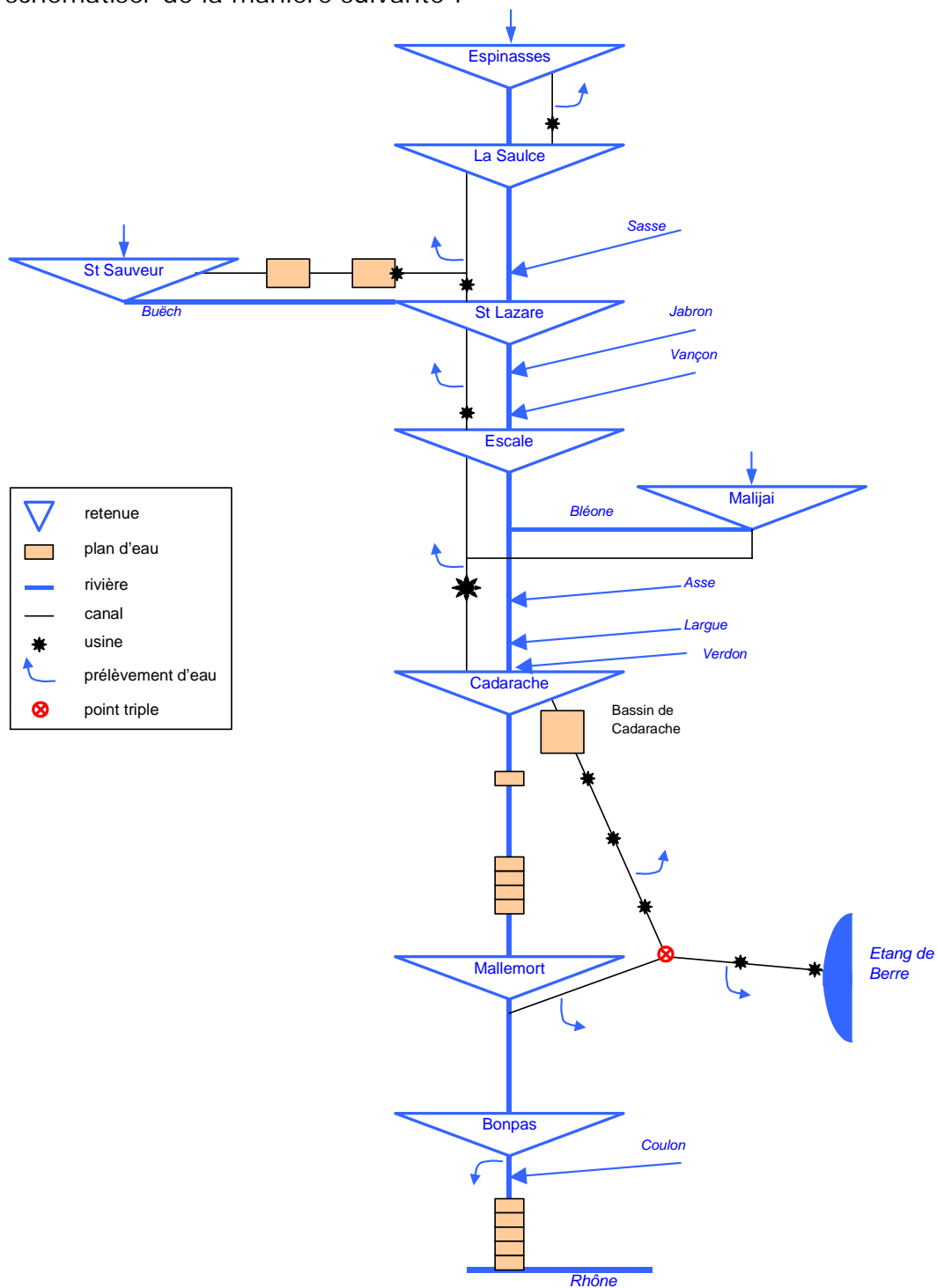


Figure 17 : Schéma de la chaîne de la Durance

Les objectifs du modèle sont de permettre le suivi des débits et des concentrations en Matières En Suspension le long de la chaîne de la Durance afin d'établir de nouvelles règles de gestion des aménagements hydroélectriques.

Pour cela, nous allons simuler plusieurs scénarii de gestion des retenues sur la période des dix ans à venir. On suppose dans un premier temps que les dix années à

venir se comportent de la même manière que les dix années précédentes qui ont permis le calage du modèle, du point de vue de la sédimentation. Deux autres scénarios sont ensuite étudiés : le premier qui prend en compte les chasses à St Lazare mais pas à l'Escale ; le second, qui correspond au mode de gestion actuel avec chasse à St Lazare et l'Escale si $Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$. On étudie alors pour chaque scénario envisagé, le degré d'envasement des retenues. Il faut choisir ensuite parmi ces scénarii, celui pour lequel l'envasement va être minimum : il déterminera alors les nouvelles règles à adopter dans la gestion des ouvrages hydrauliques de la Durance.

6-2 Analyse statistique des séries modélisées

6-2-1 Analyse fréquentielle des flux modélisés de Transport Solide par Suspension (TSS)

On s'intéresse dans cette partie à la répartition des flux de limons en fonction du temps et des débits.

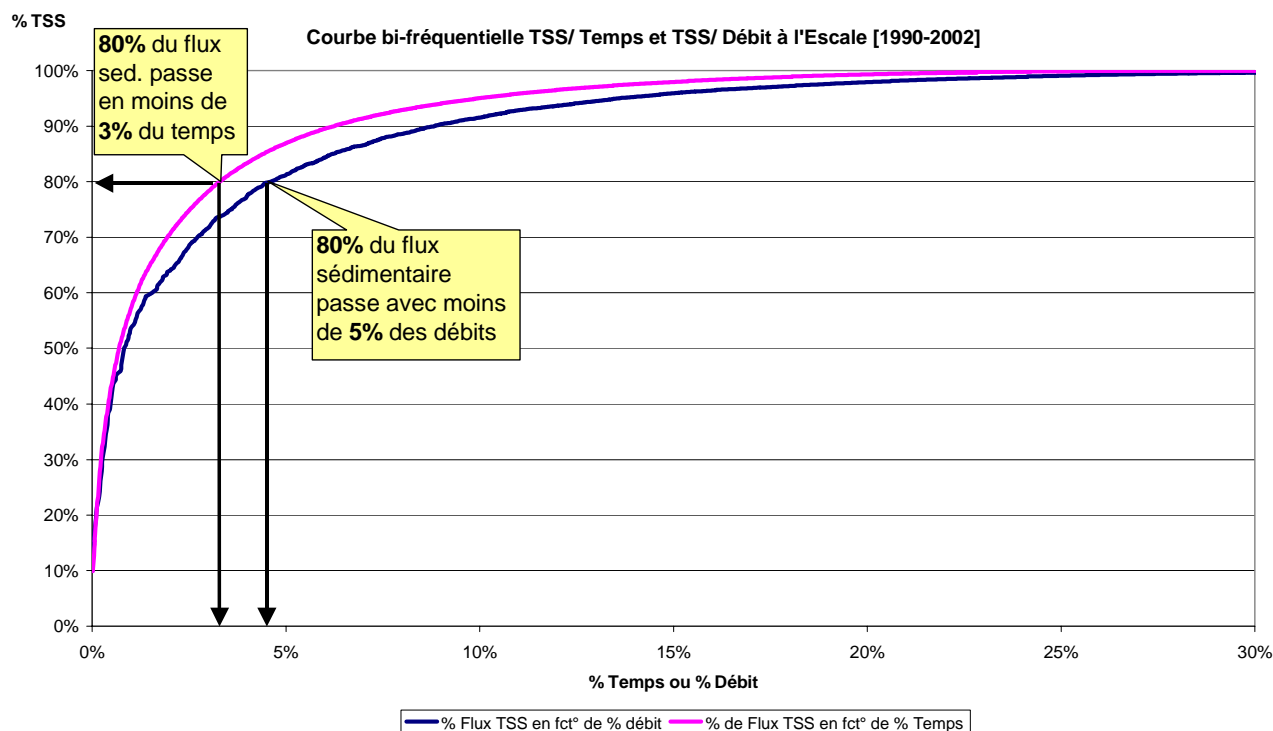


Figure 18 : Courbe bi-fréquentielle TSS/débit et TSS/temps

On s'aperçoit avec une certaine surprise que les flux de sédiments circulent en très peu de temps et avec une faible part du débit. On pouvait s'attendre à une répartition du flux plus étalée avec les débits, or il n'en est rien. Ce sont donc bien les quelques événements extrêmes qui contribuent pour la quasi totalité au transport solide en suspension dans le système Durance.

On retrouve des résultats identiques pour les autres retenues de la chaîne hydroélectrique.

6-2-2 Répartition mensuelle des flux

Nous avons représenté la répartition inter-annuelle des flux de sédiments mensuels pour chacune des retenues.

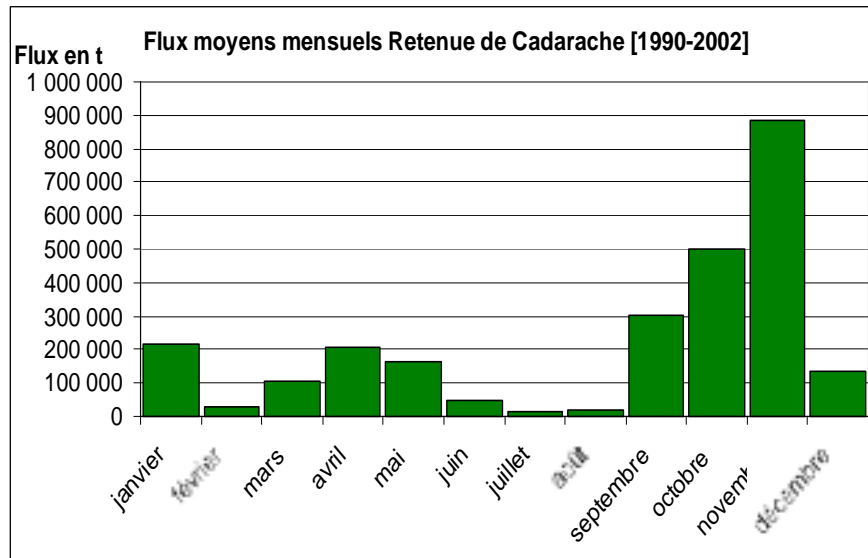


Figure 19 : Répartition inter-annuelle des flux de sédiments mensuels à Cadarache

On s'aperçoit bien de la forte contribution des mois d'automne alors que la fonte nivale de printemps n'a que peu d'influence sur le transport solide en suspension.

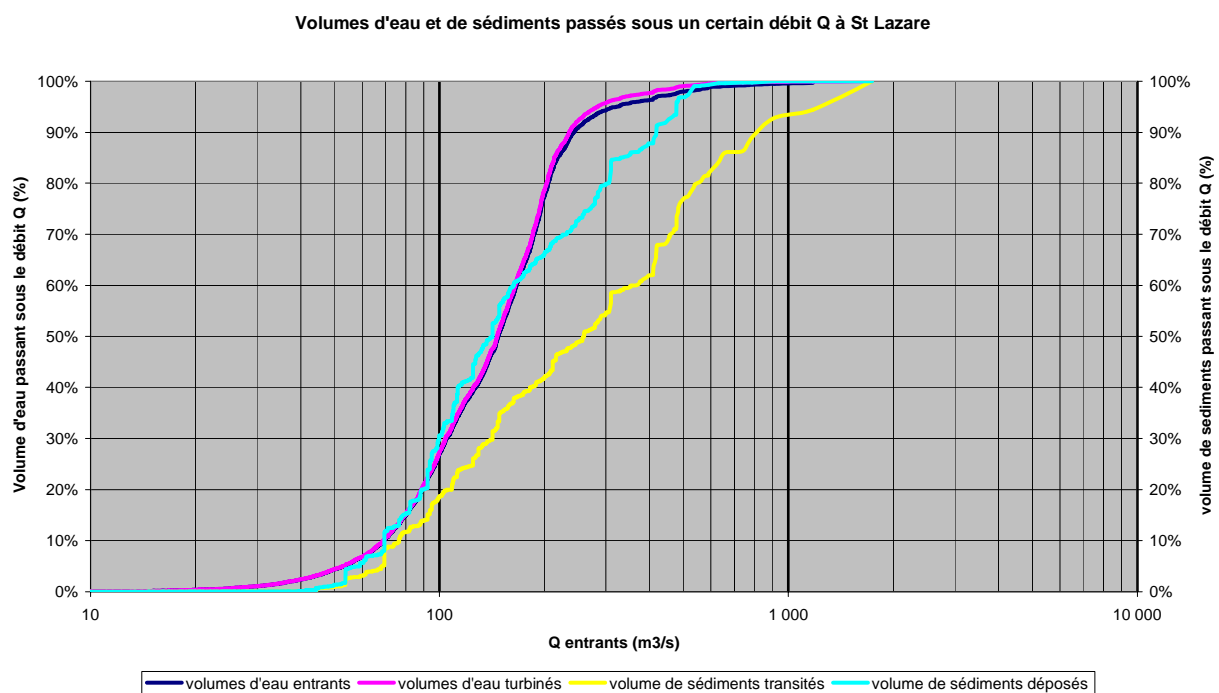
Cette contribution des mois d'octobre et novembre est à mettre directement en relation avec les fortes pluies automnales méditerranéennes qui s'abattent invariablement sur la région chaque année.

7-Détermination des règles de gestion des retenues

Dans ce paragraphe, on se propose de déterminer les nouvelles règles de gestion des retenues. On représente ainsi graphiquement les volumes d'eau et de sédiments qui passent sous un débit entrant Q en fonction de ce débit entrant. Cette représentation nous permet de connaître, pour un débit donné, la part du volume de sédiment susceptible de se déposer et qui ne se déposera pas si l'on ouvre les vannes des retenues à partir de ce débit.

7-1 Analyse des flux modélisés transités et déposés

On obtient pour chacune des retenues un graphe du type :



Si l'on s'intéresse maintenant au volume de sédiments qui transite dans la retenue (courbe jaune) et si l'on prend le mode de gestion actuel (on effectue une chasse si le débit entrant $Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$), on réduit de 25% le flux de sédiments entrant. Néanmoins, ce qui nous intéresse, ce ne sont pas les sédiments qui transitent dans la retenue mais ceux qui s'y déposent. On s'aperçoit alors que pour un débit d'ouverture des vannes de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, le volume de sédiments déposés dans la retenue de St Lazare (courbe bleu ciel) n'est réduit que de 5%. Ceci signifie que 5% des sédiments potentiellement « déposables » vont traverser la retenue (et ne vont donc pas se déposer) pour un volume turbiné perdu de l'ordre de 2 à 3% (courbe rose).

7-2 Détermination du débit de chasse

L'objectif de cette étude est donc de trouver un compromis entre un maximum de dépôt évité pour un minimum de débit turbiné (celui qui produit l'électricité et donc la raison d'être des usines) perdu. C'est donc à partir d'une telle courbe que l'on doit pouvoir se faire une idée du débit de chasse à choisir.

Par ailleurs, on couple ces informations (*figure 20*) à celle donnant le nombre d'évènements dépassant un certain débit seuil :

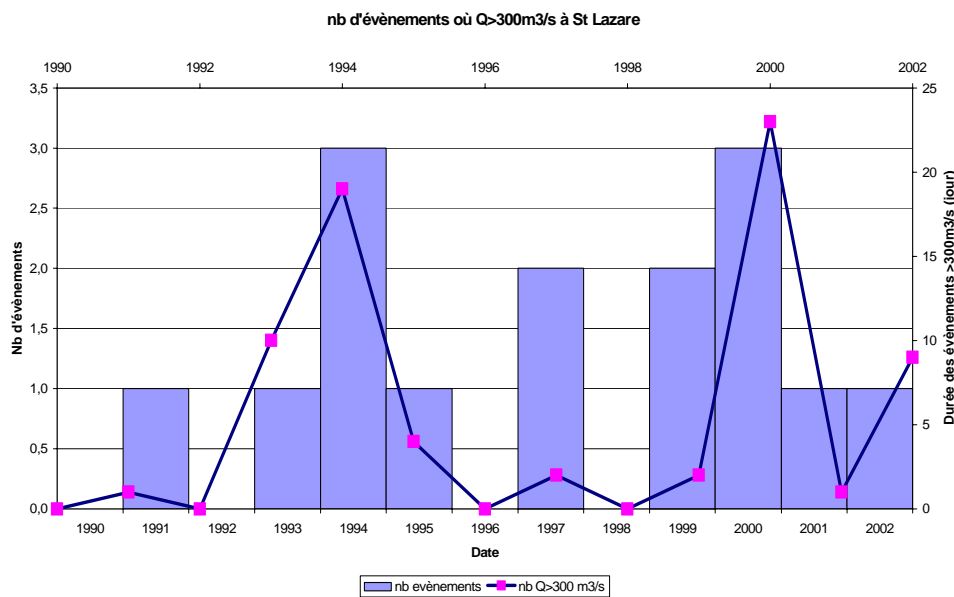


Figure 21 : Répartition et durée des évènements où $Q > 300 \text{ m}^3/\text{s}$ à St Lazare

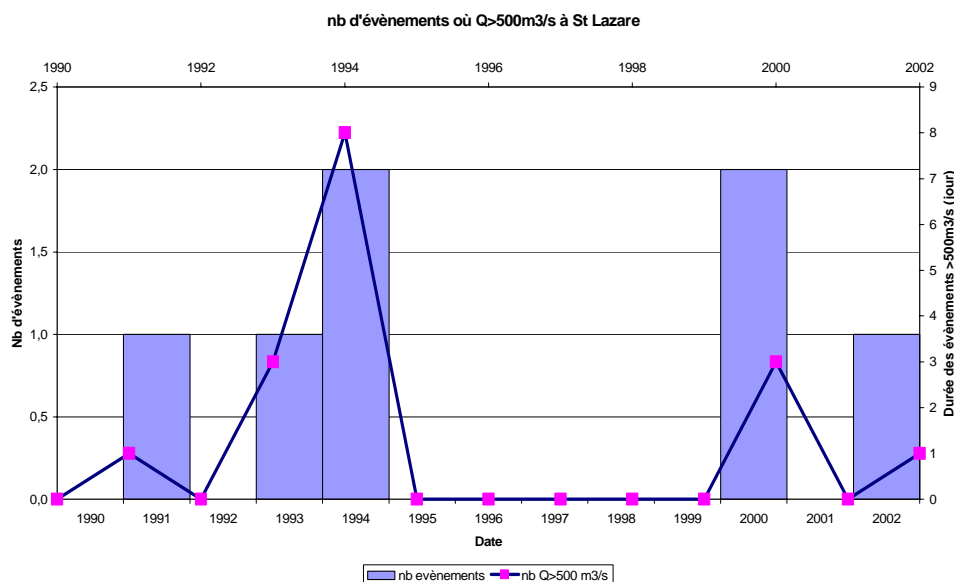


Figure 22 : Répartition et durée des évènements où $Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$ à St Lazare

On s'aperçoit alors que le débit d'ouverture des vannes utilisé actuellement à St Lazare ($500 \text{ m}^3/\text{s}$) laisse de longues périodes sans chasse (la *figure 22* montre

une période de 5 ans sans chasse). Ce débit seuil mériterait sans doute d'être abaissé afin d'obtenir l'équivalent d'une chasse par an ou, au moins une tous les deux ans. Un débit de chasse plus proche des 300m³/s permettrait à la fois de réduire le dépôt d'environ 20% tout en ménageant des chasses régulières.

Pour chacune des retenues de la chaîne, on a donc les valeurs indicatives suivantes :

	Q _{chasse} actuel (m ³ /s)	Q _{chasse} recommandé (m ³ /s)	Volume de sédiments perdu	Volume turbiné perdu
La Saulce	270	250	6 %	< 1 %
St Sauveur	120	80 à 100	9 à 16 %	4 à 6 %
St Lazare	500	300	20 %	4 %
Escale	500	300	16 %	5 %

Il paraît important de remarquer les informations suivantes :

- ✓ Ces débits indicatifs ne tiennent pas compte de l'érosion entraînée par la mise en place de ces chasses. On indique uniquement des volumes de sédiments qui ne se déposeront pas étant entendu qu'il faut ajouter à ces volumes de limons, les volumes érodés. Ce sont donc là des valeurs minimales.
- ✓ Le choix d'un débit d'ouverture des vannes n'est pas uniquement conditionné par le seul facteur « volume déposé économisé » ; il dépend aussi du contexte économique : il faut choisir le meilleur rendement entre coût du mètre cube d'eau turbiné et coût du mètre cube de vase et regarder ce qu'il est préférable de faire.

Les débits de chasse proposés n'ont donc qu'une valeur indicative et ne correspondent pas aux débits de chasse à mettre en œuvre. Ces derniers ne peuvent être obtenus qu'en couplant les informations sédimentologiques (*figure 19*) les données économiques ainsi que les impératifs écologiques.

7-3 Détermination de la durée de chasse

La *figure 23* présente les durées modélisées classées en jours, des évènements de crue à St Lazare. Ainsi, on s'aperçoit que 70% des évènements pour lesquels le débit est supérieur à 300 m³/s ont une durée inférieure à 10 jours.

Sachant que les consignes « officieuses » de déclenchement des chasses conseillent aux exploitants d'attendre de passer le pic de crue avant d'ouvrir les vannes afin de ne pas aggraver la crue en elle-même, il semble raisonnable de choisir des durées de chasse allant de 24 à 48h.

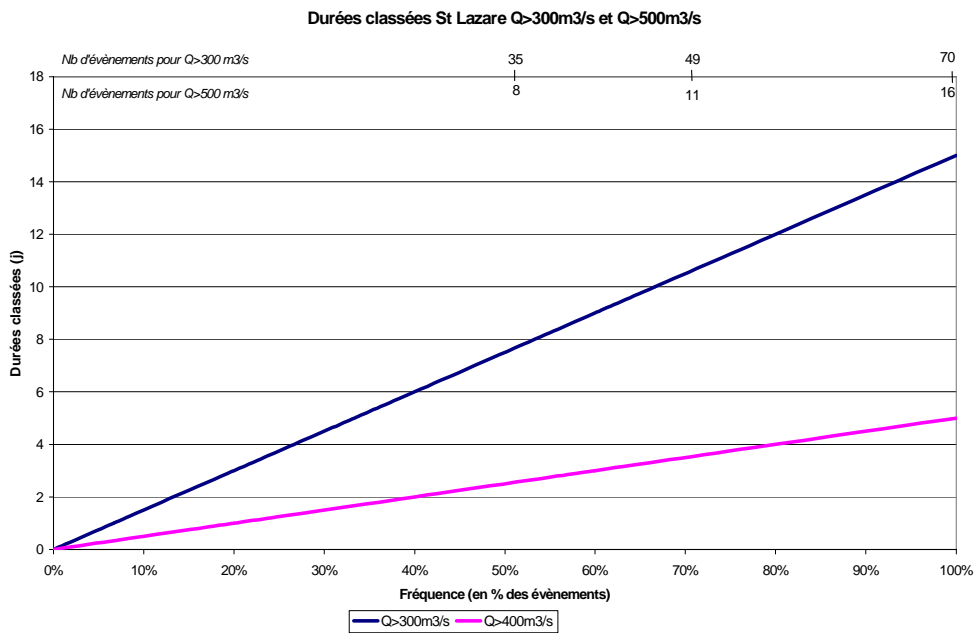


Figure 23 : Durées classées des évènements où $Q > 300\text{m}^3/\text{s}$ et $Q > 500\text{m}^3/\text{s}$ à St Lazare

7-4 Courbe-guide flux/débit en aval du point triple

Le point triple constitue l'un des endroits stratégique de la chaîne d'aménagements de la Durance. Il se situe en aval de l'usine de Mallemort, à une dizaine de kilomètres au nord est de Salon de Provence. Ce point névralgique forme un aiguillage avec, d'un côté un canal qui se jette dans l'étang de Berre et de l'autre, un canal qui rejoint le lit naturel de la Durance qui va se jeter dans le Rhône à Avignon.

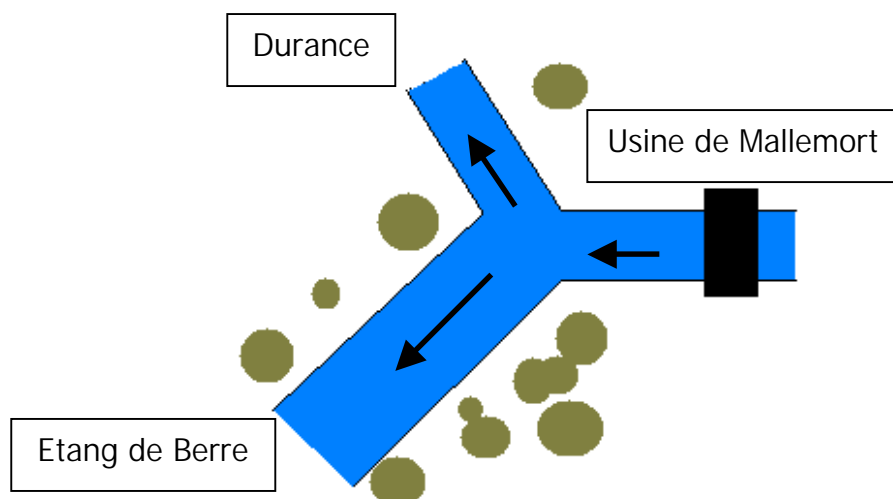


Figure 24 : Schéma du point triple

Le point triple a une importance écologique ; les rejets dans l'étang de Berre sont soumis à de fortes contraintes :

- ✓ La concentration maximale admise en sédiments est de 2g/L.
- ✓ Le quota de sédiments transitant dans Berre ne doit pas dépasser 100 000 t/an.
- ✓ Du point de vue hydrologique, le volume maximal d'eau douce rejeté dans l'étang ne doit pas dépasser 2 100 millions de m³ (soit 2.1 km³) dont 400 millions de m³ maximum en été.

Pour satisfaire à toutes ces contraintes, les exploitants suivent ce que l'on appelle une courbe guide qui leur permet d'adapter en temps réel la gestion du point triple. Cette courbe exprime les volumes d'eau cumulés annuels (en débutant au 1^{er} novembre) qui passent dans l'usine de Mallemort. On sait ainsi que si l'on dépasse cette courbe, il nous faut stopper les rejets dans l'étang jusqu'à ce que l'on recoupe la courbe. Elle transcrit le quota annuel de rejets admissibles dans l'étang de Berre.

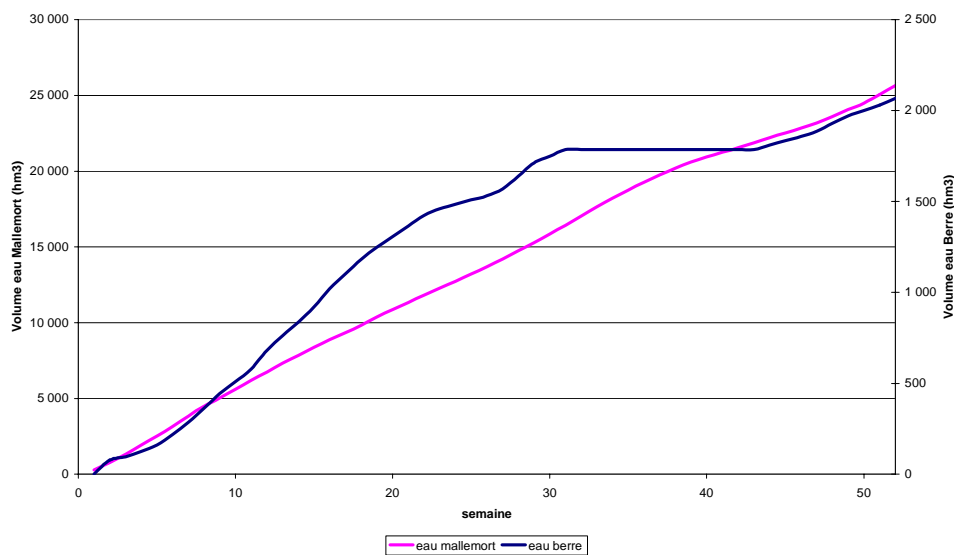


Figure 25 : Comparaison des volumes d'eau transités à Mallemort et à Berre

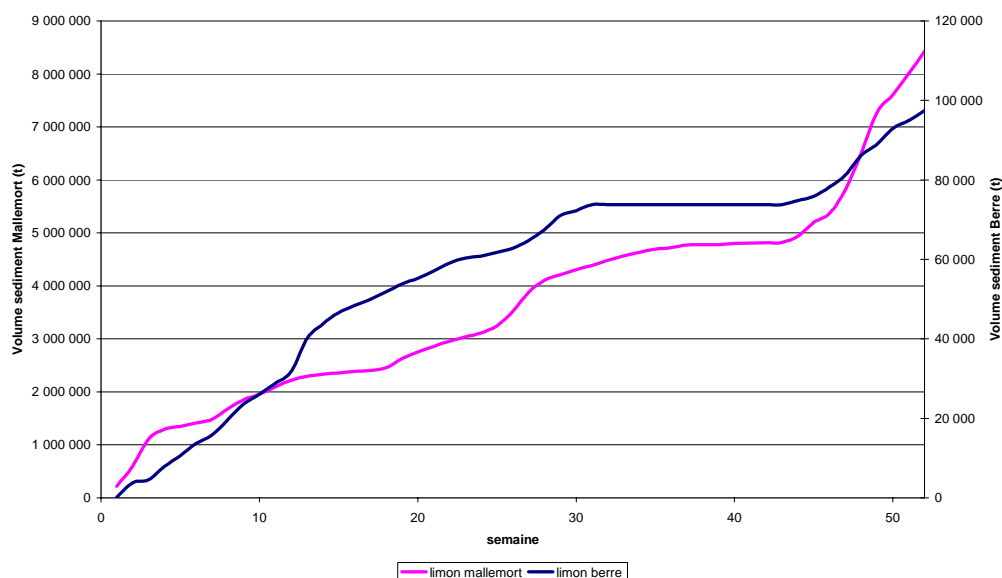


Figure 26 : Comparaison des volumes de limons transités à Mallemort et à Berre

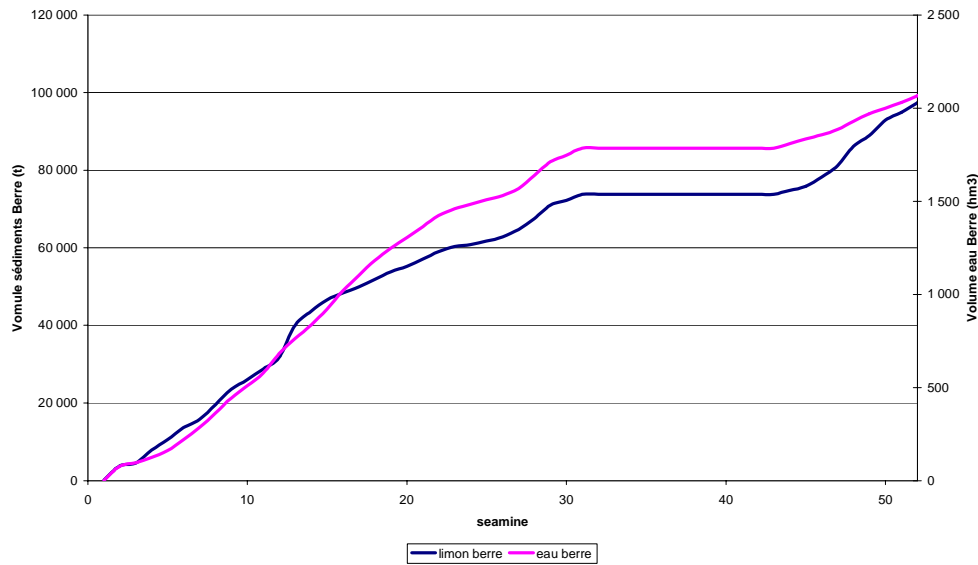


Figure 27 : Courbe guide en débit et flux à Berre

La *figure 25* nous montre la faible influence de l'hydrologie : les apports d'eau à Mallemort (courbe rose) sont assez réguliers. Cela est dû en partie à l'énorme capacité du lac de retenue de Serre-Ponçon qui tamponne les irrégularités de débit. Par ailleurs, la *figure 26* nous montre l'importance des apports tardifs de MES automnaux ; ainsi, une telle courbe nous fait prendre conscience de la nécessité d'anticiper cette arrivée de sédiments pour pouvoir tenir les quotas fixés. Il faudrait pour cela que la courbe des apports de sédiments à Berre suive la courbe des apports de sédiments à Mallemort (ce qui n'est pas tout à fait le cas).

On cherche à savoir comment a été obtenue la courbe guide à l'étang de Berre.

Cette courbe a été établie alors qu'il n'existait pas encore de suivi des concentrations dans le canal. On suppose donc (et l'observation des courbes semble le confirmer) que la courbe guide des volumes de sédiments a été obtenue par une homothétie de la courbe des volumes d'eau. Pour cela, il suffit de regarder comment varie le rapport entre les deux ; s'il est constant, alors on peut raisonnablement supposer qu'elle a été établie de la sorte.

Or le calcul nous montre en effet que le rapport est constant et qu'il vaut environ 40, mais cela n'est valable que pour la période allant de février à septembre. Le reste du temps les deux courbes sont sensiblement différentes.

Il est très difficile de savoir réellement comment une telle courbe a pu être établie, néanmoins, on peut penser qu'elle tient compte à la fois de facteurs environnementaux et de facteurs économiques (par exemple, on note un palier dans les volumes estivaux ; ceci correspond à une période où l'électricité est la moins chère par conséquent, on rejette l'eau plutôt que de la turbiner).

8-Conclusions – Perspectives

Cette étude a permis de mieux cerner certaines caractéristiques du transport solide en suspension. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le TSS est fonction de deux processus principaux : la présence de Terres Noires d'une part, les pluies intenses d'automne d'autre part.
- Il s'établit une moyenne annuelle de 3 millions de tonnes sur la Durance au niveau de Cadarache.
- La variabilité inter-annuelle est très forte avec un rapport de plus de dix entre le tonnage d'une année faible et celui d'une année forte. De même, certaines journées très chargées peuvent dépasser le tonnage annuel d'une année faible !
- L'essentiel des apports solides est concentré de septembre à novembre.
- Statistiquement, 50% du transport solide s'effectue en moins de 5% du temps.

Cette étude, outre son intérêt immédiat donnant une information sur la direction dans laquelle doivent s'orienter les nouvelles gestions afin de limiter l'envasement des retenues, a permis de lever le voile sur certains points et de battre en brèche certaines notions que l'on pensait acquises.

Ainsi, en début de stage, alors que l'on ne disposait pas encore de chroniques de MES, nous avons décidé de créer nos propres chroniques en utilisant une formule reliant flux et débit du type $\phi = A \cdot Q^B$. Or, l'étude statistique a montré que le flux de sédiment (TSS) était mieux corrélé à la pluie à l'échelle mensuelle qu'aux débits. Ceci a constitué une nouveauté quand nous nous attendions à l'inverse.

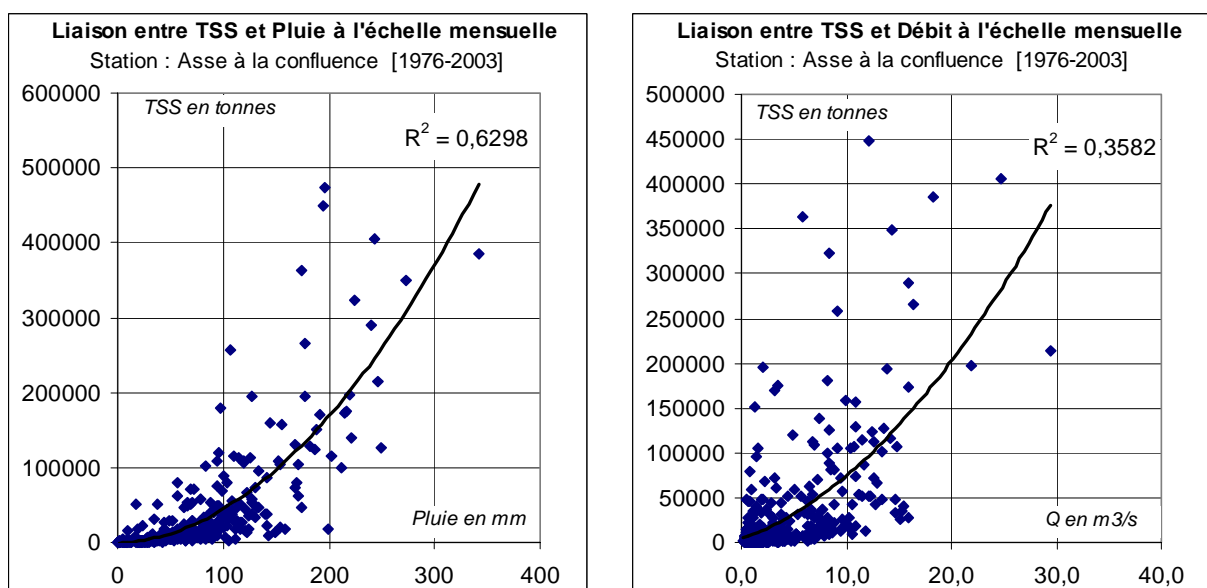


Figure 28 : Relation entre TSS et Pluie ou TSS et Débit

Ces résultats sont valables pour chacun des BV du bassin de la Moyenne et de la Basse Durance (cf Annexe 2).

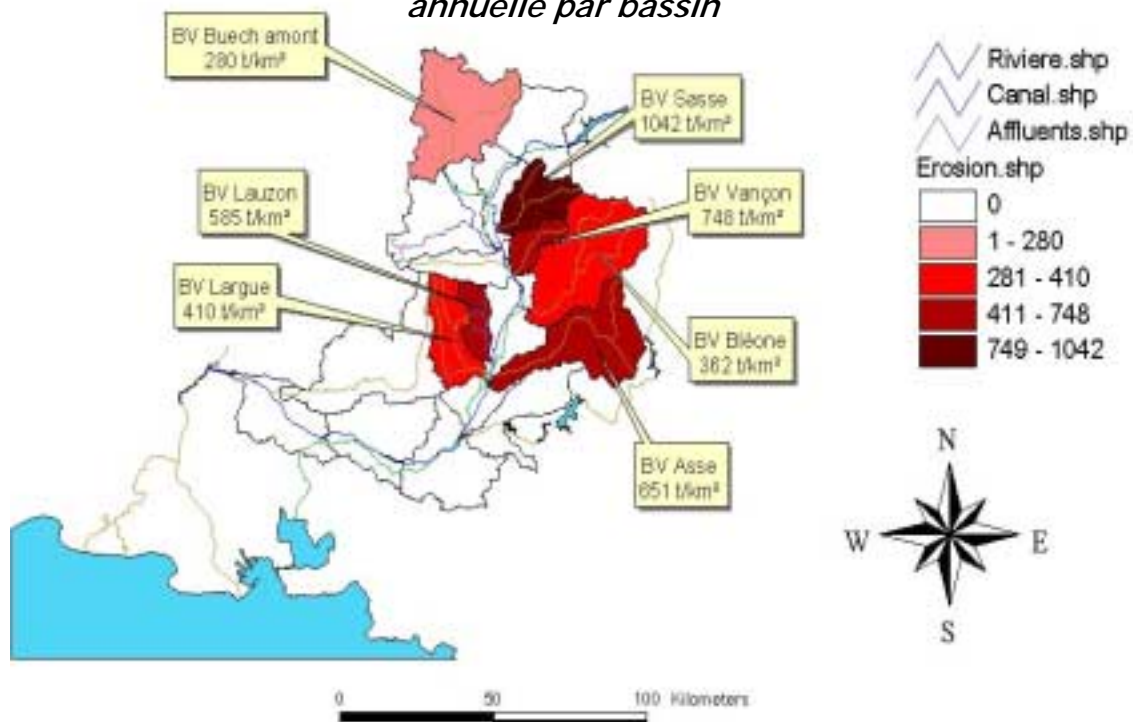
Par ailleurs, l'analyse des flux modélisés déposés a mis en évidence le très faible impact du changement de débit d'ouverture des vannes sur la réduction des flux de sédiments déposés. Ceci intéresse tout particulièrement les exploitants des retenues.

On pouvait s'attendre à ce que l'abaissement des débits d'ouverture permette d'économiser une large part du volume des sédiments se déposant au fond des retenues. Au contraire, et ceci du à la forme des courbes très voisine, on s'aperçoit que si on veut réellement diminuer ce dépôt, alors cela s'accompagne d'une perte de volume d'eau turbiné qui peut être préjudiciable en matière de rentabilité des usines. La marge de manœuvre des exploitants est donc assez faible et le volume gagné plutôt léger.

L'un des points noirs de cette étude reste la compréhension totale des contributions au transport solide par suspension des différents bassins. L'étude bibliographique n'a pas permis de lever totalement le voile sur les différences de contribution d'un bassin à un autre. De même, un flou artistique demeure quant aux différentes couches géologiques regroupées sous l'appellation « Terre Noire ». On sait que l'on y trouve les marnes noires du callovo-oxfordien en majorité mais il semble que certaines autres formations marneuses peuvent être englobées sous ce terme.

Le but recherché était de retranscrire les coefficients d'érosion sur la carte du BV de la Durance afin d'avoir une idée de l'évolution géographique de ces coefficients. Malheureusement, le peu de données dont nous disposons ne permet pas de tirer des enseignements d'une telle représentation.

Figure 29 : Répartition des coefficients d'érosion spécifique moyenne annuelle par bassin



Ainsi, on peut remarquer la grande variabilité prise par le coefficient d'érosion spécifique entre le bassin du Buech amont et celui du Sasse, pourtant voisins géographiquement et géologiquement. Seuls diffèrent a priori le mode de transport des sédiments ; dans le Sasse, on obtient une désagrégation complète permettant une bonne mise en suspension du matériel sédimentaire, dans le Buech amont, la désagrégation des badlands se fait sous forme de plaquettes plus difficilement mises en suspension (cf § 5-1-2).

Si ce travail a permis de clarifier un certain nombre d'informations ayant trait au comportement des flux de sédiments dans la vallée de la Durance, il devrait constituer non le point final, mais plutôt le début d'une campagne de généralisation des stations de mesures de flux solide afin de pouvoir avoir une idée plus nette de leur comportement mais aussi afin de comparer les conclusions de cette étude avec des données réelles.

9-Annexes

Annexe 1

Exemples de répartition des flux :



D4161/RAP/2004-00016-A

Flux Mensuels et Annuels de Transport Solide en Suspension

Point de calcul des Flux : **Buech à Saint Sauveur**

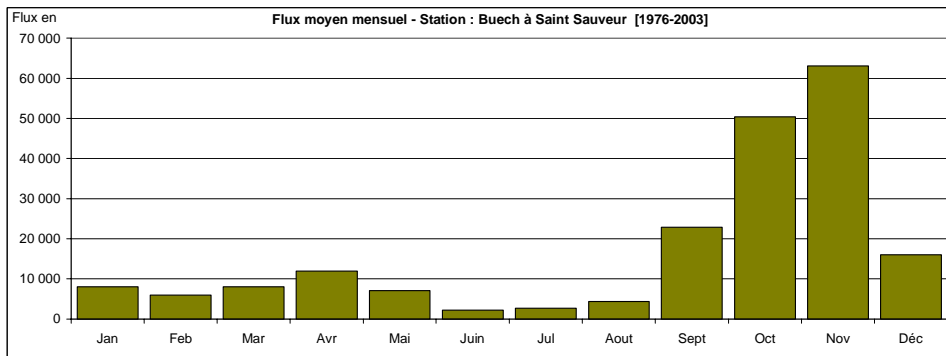
BV= 723 km²

Composantes : Débit : Buech à Saint Sauveur /// MES : Modèle Buech

Flux annuel minimal : 44 441 tonnes
 Flux annuel maximal : 524 869 tonnes
 Flux moyen annuel : 202 583 tonnes

Rapport Max /Min : **11,8**
 Erosion spécifique moyenne : **280 t/km²/an**

	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Tot An.
1976	1 100	2 400	6 600	10 300	1 700	200	1 600	2 400	23 300	89 100	108 200	17 500	264 400
1977	30 500	34 100	12 100	6 100	39 100	3 300	11 300	2 500	200	90 900	4 300	54 600	289 000
1978	1 000	52 600	9 900	3 500	7 600	2 800	4 300	4 900	100	300	100	1 800	88 900
1979	5 500	7 800	7 400	2 100	2 800	1 900	300	900	900	208 600	1 600	2 300	242 100
1980	2 000	6 700	3 600	5 400	4 000	2 200	4 700	6 600	13 200	45 000	2 100	600	96 100
1981	800	1 500	38 900	13 800	7 700	1 500	2 600	1 300	48 500	4 500	600	40 500	162 200
1982	31 100	1 100	1 200	5 600	3 100	4 000	14 000	3 700	7 200	10 800	264 700	21 900	368 400
1983	1 300	500	5 100	8 700	23 800	1 200	200	2 200	2 900	10 100	6 600	8 800	71 400
1984	700	1 800	5 400	13 900	14 000	11 500	400	8 400	9 300	19 500	8 700	9 700	103 300
1985	4 000	3 400	4 900	13 000	16 300	2 500	300	19 000	0	0	2 700	1 000	67 100
1986	1 000	900	5 700	54 500	6 300	1 100	1 200	4 400	15 300	4 800	5 500	600	101 300
1987	700	3 000	2 000	31 100	1 900	1 100	2 700	15 000	12 200	77 600	6 700	7 900	161 900
1988	6 100	8 400	10 200	11 900	9 400	1 400	2 100	1 000	2 900	31 500	800	3 300	89 000
1989	500	3 000	4 200	26 000	4 200	500	400	800	600	1 700	3 400	6 800	52 100
1990	1 900	17 600	1 700	1 800	2 600	900	100	4 300	2 100	23 000	4 200	1 100	61 300
1991	4 000	1 100	52 100	1 300	1 100	1 200	6 500	500	101 800	38 500	35 900	10 800	254 800
1992	1 900	1 100	2 800	11 000	2 200	7 800	4 100	18 100	19 500	56 900	31 200	17 000	173 600
1993	700	300	500	28 400	12 600	1 100	800	2 200	48 900	218 000	1 400	3 500	318 400
1994	63 900	1 100	4 400	3 000	2 100	2 300	4 000	4 900	38 000	31 000	257 600	600	412 900
1995	1 900	7 600	3 000	28 900	2 400	1 100	1 500	3 300	14 900	12 600	22 800	12 400	112 400
1996	42 200	900	2 800	2 900	4 300	3 200	6 000	3 800	2 400	2 900	183 000	42 900	297 300
1997	9 700	1 800	2 800	1 300	1 200	2 400	1 000	2 500	200	5 400	72 500	44 300	145 100
1998	4 100	1 600	1 600	7 600	3 800	1 600	300	600	12 400	8 800	1 500	600	44 500
1999	2 300	2 900	14 600	14 300	5 900	1 200	300	900	77 300	163 100	2 700	1 600	287 100
2000	700	1 700	4 100	21 800	3 300	300	2 500	2 800	89 700	111 300	283 600	3 100	524 900
2001	1 800	1 300	6 800	1 700	4 600	200	2 800	200	52 900	9 900	300	300	82 800
2002	500	1 300	6 600	300	6 600	2 000	800	4 100	37 400	4 600	358 500	7 100	429 800
2003	1 800	400	2 000	3 100	1 300	800	100	2 200	8 100	130 200	95 400	124 800	370 200
Moy Mens	8 000	6 000	8 000	11 900	7 000	2 200	2 700	4 400	22 900	50 400	63 100	16 000	202 582



DEA HHGG : Modélisation de la production des apports sédimentaires dans le bassin versant de la Durance



D4161/RAP/2004-00016-A

Flux Mensuels et Annuels de Transport Solide en Suspension

Point de calcul des Flux :

Sasse à la Confluence (modèle)

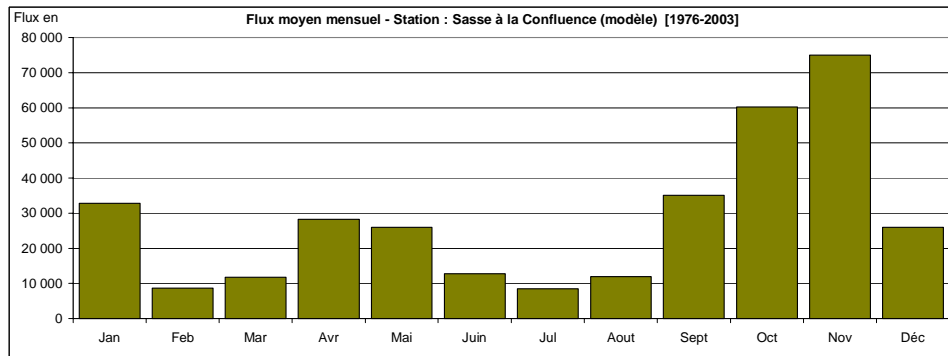
BV= 323 km²

Composantes : Débit : Sasse à la Confluence (modèle MORDOR) /// MES : Modèle Bléone adapté

Flux annuel minimal : 72 309 tonnes
 Flux annuel maximal : 1 102 247 tonnes
 Flux moyen annuel : 336 531 tonnes

Rapport Max /Min : 15,2
 Erosion spécifique moyenne : 1042 t/km²/an

	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Tot An.
1976	3 100	700	600	2 800	1 300	22 500	6 800	3 400	28 500	95 400	80 900	44 100	290 100
1977	33 600	16 900	14 000	4 100	78 200	34 600	24 900	38 800	1 400	66 300	9 300	52 800	374 900
1978	36 600	48 500	19 600	6 400	41 300	5 500	9 400	12 600	100	600	0	6 000	186 600
1979	27 500	33 800	34 700	7 100	2 400	8 300	300	1 000	700	242 200	3 000	3 800	364 800
1980	700	7 900	5 800	5 200	38 100	11 200	20 200	13 400	3 200	37 800	6 700	0	150 200
1981	800	100	18 500	17 100	33 300	11 500	6 900	3 100	62 900	3 600	0	182 600	340 400
1982	6 100	200	1 400	700	2 200	10 900	25 100	6 300	9 500	11 100	103 100	18 800	195 400
1983	0	17 400	30 400	8 400	66 200	9 700	200	6 900	5 200	25 700	3 100	35 500	208 700
1984	10 100	7 900	11 800	28 600	77 100	40 500	0	11 200	12 700	25 800	21 400	12 100	259 200
1985	19 900	3 200	37 700	1 100	36 600	3 500	500	44 100	200	100	12 000	3 100	162 000
1986	21 900	21 000	1 900	70 200	3 400	100	34 100	15 000	51 100	1 800	34 500	1 600	256 600
1987	3 200	30 500	4 200	107 000	9 700	10 200	40 000	18 900	10 400	189 000	7 500	49 400	480 000
1988	26 000	6 700	7 800	15 400	12 100	22 200	1 800	2 200	4 000	55 500	1 300	7 800	162 800
1989	100	12 600	1 800	89 400	2 800	7 000	700	600	500	2 800	3 200	3 200	124 700
1990	3 000	4 000	800	4 000	29 600	2 800	0	200	200	44 800	15 600	44 700	149 700
1991	1 000	3 100	57 300	800	800	3 700	1 000	2 100	194 300	121 600	123 100	1 700	510 500
1992	1 600	4 600	14 500	12 700	6 900	37 600	6 200	61 700	45 800	29 600	48 300	10 300	279 800
1993	0	0	0	91 700	28 200	21 200	12 600	2 100	143 400	245 800	1 200	1 100	547 300
1994	563 800	3 100	200	4 900	4 100	38 500	16 100	10 300	109 700	87 600	263 500	500	1 102 300
1995	3 000	5 500	1 900	201 400	24 900	200	8 000	11 300	14 600	14 000	58 300	21 700	364 800
1996	96 000	2 900	3 000	3 500	14 400	16 300	9 000	5 300	8 400	3 100	175 000	15 500	352 400
1997	29 200	200	0	5 300	10 900	12 200	4 800	30 900	5 500	41 600	106 300	144 500	391 400
1998	2 900	300	300	9 800	16 600	14 400	400	500	11 800	14 500	900	0	72 400
1999	18 900	1 500	32 500	19 500	10 900	3 500	2 900	2 700	93 700	111 800	12 400	600	310 900
2000	0	200	4 600	61 200	5 300	2 500	100	4 500	83 500	95 200	250 500	5 600	513 200
2001	1 900	700	22 100	1 900	107 900	800	2 400	0	20 700	5 800	500	0	164 700
2002	800	6 700	200	3 400	58 200	3 500	800	22 800	49 200	24 500	313 100	8 700	491 900
2003	6 000	300	100	6 000	1 900	900	200	1 600	10 300	90 500	446 500	50 600	614 900
Moy Mens	32 800	8 600	11 700	28 200	25 900	12 700	8 400	11 900	35 100	60 300	75 000	25 900	336 521



DEA HHGG : Modélisation de la production des apports sédimentaires dans le bassin versant de la Durance



D4161/RAP/2004-00016-A

Flux Mensuels et Annuels de Transport Solide en Suspension

Point de calcul des Flux : **Bleone à Malijai**

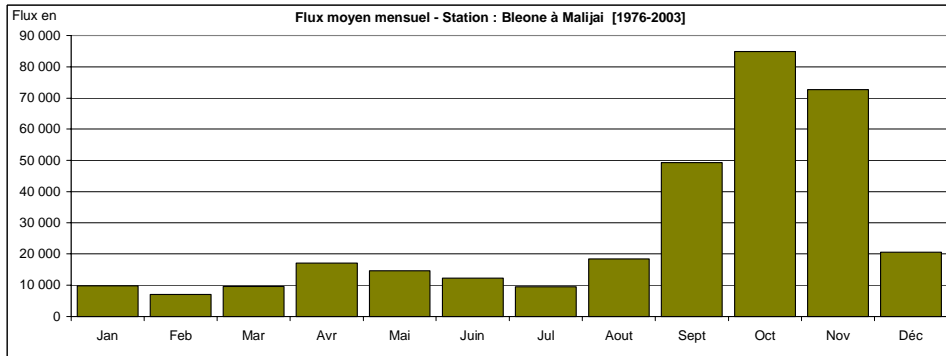
BV= 901 km²

Composantes : Débit : Bléone à Malijai /// MES : Modèle Bleone

Flux annuel minimal : 95 107 tonnes
 Flux annuel maximal : 744 134 tonnes
 Flux moyen annuel : 325 831 tonnes

Rapport Max/Min : **7,8**
 Erosion spécifique moyenne : **362 t/km²/an**

	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Tot An.
1976	22 700	7 900	43 200	43 800	34 500	21 500	35 400	33 800	121 100	265 700	54 800	22 700	707 100
1977	21 600	40 200	6 400	7 000	30 100	20 400	23 800	81 300	9 900	78 900	16 500	85 300	421 400
1978	5 300	68 100	13 800	6 700	20 000	9 400	8 200	12 500	800	700	0	6 000	151 500
1979	35 300	15 100	23 300	3 100	3 600	6 300	900	5 700	2 500	354 100	4 200	5 600	459 700
1980	2 400	5 300	6 800	6 500	11 200	6 800	20 800	24 400	2 700	34 900	13 300	2 300	137 400
1981	1 600	1 400	22 800	24 400	18 300	14 400	9 700	3 600	58 500	7 600	1 900	98 100	262 300
1982	21 200	700	600	5 100	3 900	5 900	4 100	8 800	14 800	24 300	130 600	39 100	259 100
1983	800	500	2 000	9 600	38 500	7 300	1 300	16 900	5 000	13 200	3 500	16 100	114 700
1984	1 000	1 100	8 700	19 700	49 000	62 900	200	13 400	19 300	48 700	6 700	3 900	234 600
1985	18 100	3 900	3 200	7 700	17 600	5 200	1 300	53 300	300	200	14 300	6 300	131 400
1986	4 300	3 000	13 700	63 300	9 200	1 300	3 500	28 700	29 900	1 900	4 500	200	163 500
1987	100	1 700	1 500	59 200	3 500	12 100	35 300	25 700	6 500	135 100	5 500	22 900	309 100
1988	6 200	9 100	5 300	9 600	17 800	18 500	5 700	4 700	4 700	104 100	3 500	5 300	194 500
1989	200	5 500	5 900	71 100	4 800	8 500	2 800	3 700	5 900	2 000	7 100	10 300	127 800
1990	2 100	9 100	1 900	14 700	11 100	4 700	1 100	16 200	4 400	84 700	25 600	5 600	181 200
1991	7 500	3 000	45 800	1 500	1 200	4 300	7 700	3 700	250 500	86 300	104 900	1 000	517 400
1992	1 400	300	600	6 600	10 700	33 800	11 300	36 300	69 000	145 100	26 300	21 800	363 200
1993	200	100	100	12 400	6 700	7 300	6 800	8 700	86 500	329 800	2 000	1 500	462 100
1994	28 900	1 600	4 000	2 200	3 500	21 600	8 700	2 400	378 800	39 400	252 000	1 000	744 100
1995	2 000	7 100	1 000	30 000	11 600	1 700	23 700	37 100	34 600	8 500	26 500	61 700	245 500
1996	49 400	500	600	2 500	11 300	32 100	9 000	20 400	2 800	7 500	161 400	49 400	346 900
1997	14 000	1 800	1 200	1 500	3 100	10 200	4 400	27 400	4 300	5 700	145 400	32 900	251 700
1998	8 000	2 600	2 000	13 900	9 300	6 400	500	3 300	20 600	21 000	7 000	500	95 100
1999	1 000	800	14 700	24 800	9 900	1 800	10 900	2 800	122 000	250 100	15 700	12 900	467 400
2000	6 100	3 300	16 400	25 100	3 900	5 900	13 500	12 700	72 100	148 700	279 600	12 000	599 300
2001	10 800	1 200	16 200	1 800	34 000	1 000	10 800	400	25 500	19 000	4 700	500	125 900
2002	800	2 600	5 000	1 400	30 100	10 400	5 200	16 700	18 600	22 000	352 000	6 500	471 300
2003	2 200	700	700	4 400	1 800	2 100	300	10 900	8 000	136 900	364 900	44 400	577 300
Moy Mens	9 800	7 100	9 600	17 100	14 700	12 300	9 500	18 400	49 300	84 900	72 700	20 600	325 804



DEA HHGG : Modélisation de la production des apports sédimentaires dans le bassin versant de la Durance



D4161/RAP/2004-00016-A

Flux Mensuels et Annuels de Transport Solide en Suspension

Point de calcul des Flux : **Asse à la confluence**

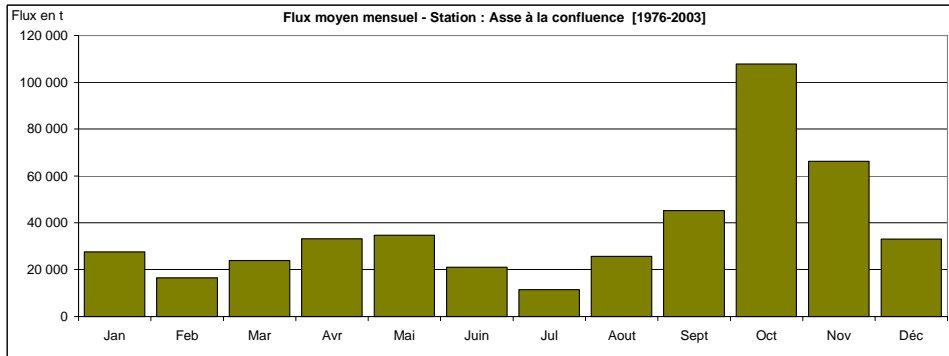
BV= 685 km²

Composantes : Débit : Asse à la confluence /// MES : Modèle Asse

Flux annuel minimal 150 167 tonnes
 Flux annuel maximal 1 239 392 tonnes
 Flux moyen annuel 446 239 tonnes

Rapport Max /Min 8,3
 Erosion spécifique moyenne : 651 t/km²/an

	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Tot An.
1976	6 900	9 000	62 800	52 800	32 000	43 700	48 500	11 200	32 200	473 400	26 000	17 800	816 300
1977	12 900	101 200	14 700	5 200	86 500	14 800	27 400	58 600	4 200	44 200	3 000	46 600	419 300
1978	17 500	88 500	28 200	20 800	66 100	6 900	3 800	14 900	400	600	100	4 600	252 400
1979	100 000	41 100	72 100	9 800	3 600	13 500	2 700	4 300	4 800	385 300	7 600	9 000	653 800
1980	8 900	14 700	13 700	8 400	47 300	10 400	2 700	46 600	0	15 700	9 800	100	178 300
1981	600	200	51 400	113 200	22 400	14 300	7 400	4 900	33 100	1 200	100	125 900	374 700
1982	52 000	2 400	1 200	2 700	4 000	4 600	0	11 900	8 100	18 200	56 400	13 200	174 700
1983	300	1 800	18 900	14 100	42 000	52 300	8 600	9 600	8 200	34 800	4 000	112 900	307 500
1984	1 800	4 000	16 600	26 800	107 800	53 400	100	15 800	11 400	31 400	9 400	28 500	307 000
1985	31 500	3 900	24 600	3 100	50 900	2 800	100	21 900	2 200	1 100	5 300	2 700	150 100
1986	7 500	13 000	18 800	41 800	3 200	4 700	27 500	15 200	6 300	600	17 400	900	156 900
1987	600	70 400	5 100	115 700	15 200	47 700	37 300	151 300	15 500	363 100	4 200	120 600	946 700
1988	5 300	2 800	3 800	6 700	37 800	35 400	4 700	600	1 200	61 000	3 300	8 400	171 000
1989	200	19 100	5 900	129 800	4 400	37 000	4 000	600	6 900	1 200	8 400	1 500	219 000
1990	1 200	6 500	500	9 400	25 500	1 700	5 200	14 500	3 200	139 200	17 800	9 300	234 000
1991	7 700	3 600	51 600	3 100	3 300	4 400	1 000	3 300	175 900	80 800	74 300	1 400	410 400
1992	1 300	300	3 000	28 000	22 900	115 000	27 800	32 600	96 200	156 500	80 300	8 800	572 700
1993	100	100	1 200	124 200	34 600	9 400	4 200	9 500	169 500	265 000	15 200	4 200	637 200
1994	173 300	35 800	22 000	6 700	12 700	39 800	58 600	1 400	323 500	158 900	405 800	900	1 239 400
1995	1 700	25 800	7 500	105 600	27 900	2 300	1 700	28 500	17 100	12 800	21 700	37 700	290 300
1996	197 300	2 600	5 600	6 500	11 300	23 800	7 700	104 800	5 700	7 500	349 500	34 000	756 300
1997	43 200	2 100	600	2 600	3 700	5 400	5 600	79 100	2 000	400	108 800	257 600	511 100
1998	10 300	600	300	21 400	32 600	2 700	0	48 400	46 200	21 100	7 900	100	191 600
1999	10 400	5 400	180 400	25 100	29 200	800	8 500	2 200	195 500	449 200	3 400	3 800	913 900
2000	300	300	6 200	17 300	5 200	17 200	14 500	2 800	67 900	193 900	214 500	13 300	553 400
2001	71 900	1 300	47 200	3 700	127 800	1 200	4 500	0	10 500	9 400	5 000	100	282 600
2002	300	3 800	3 200	6 300	105 100	13 500	5 300	20 000	16 100	20 300	289 000	10 200	493 100
2003	5 000	2 500	900	18 000	5 600	9 700	1 200	3 000	2 000	72 600	107 500	52 600	280 600
Moy Mens	27 500	16 500	23 900	33 200	34 700	21 000	11 500	25 600	45 200	107 800	66 300	33 100	446 225

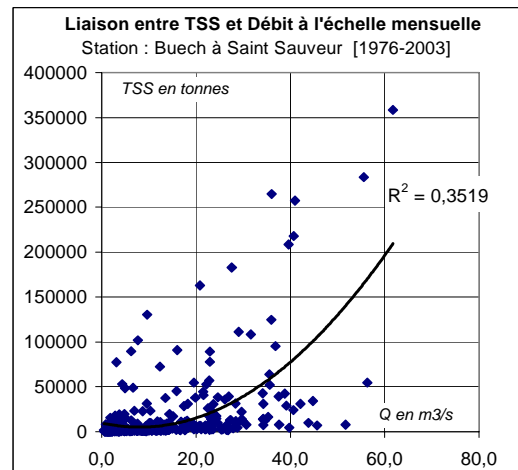
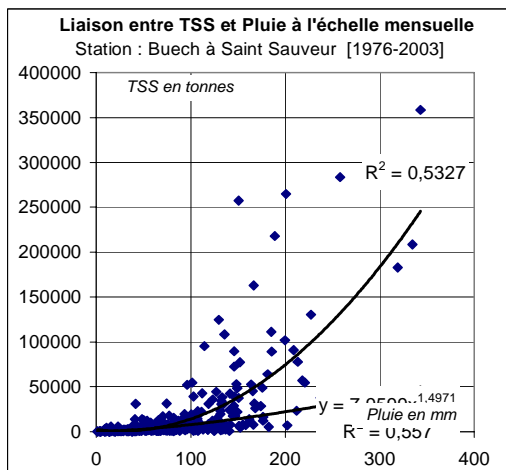
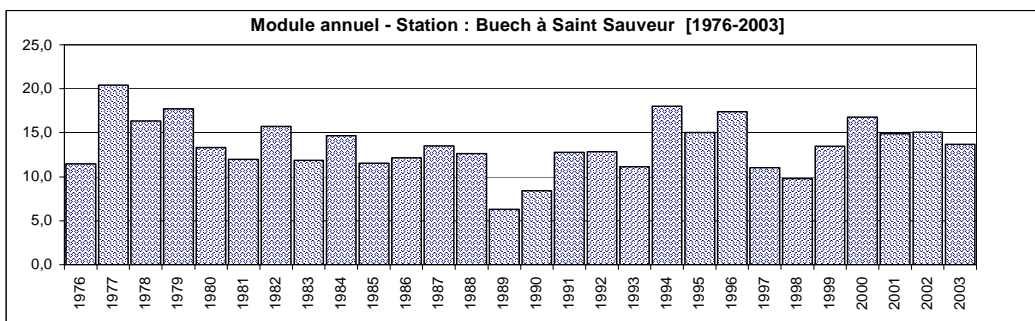
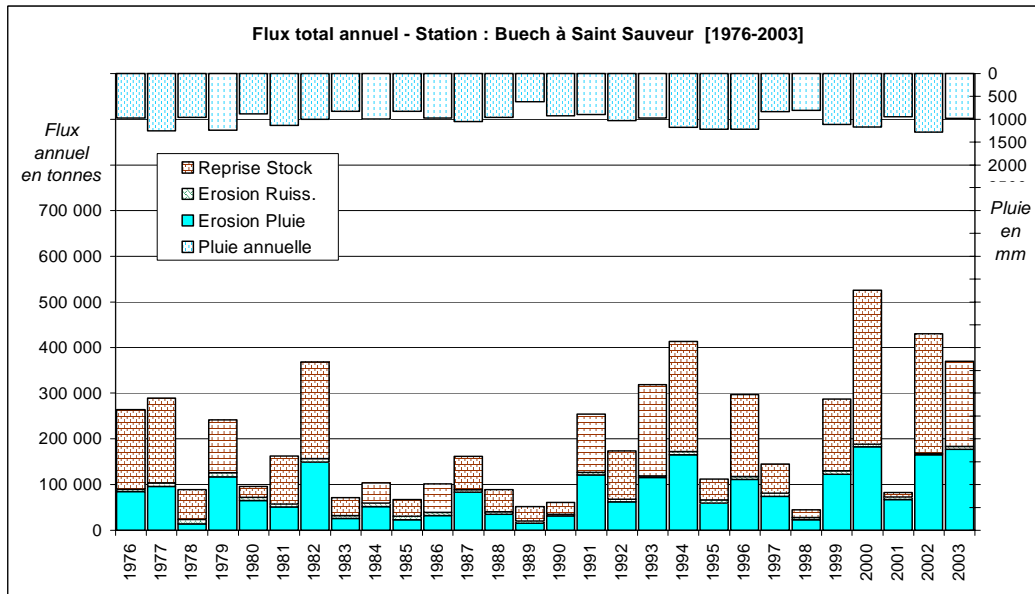


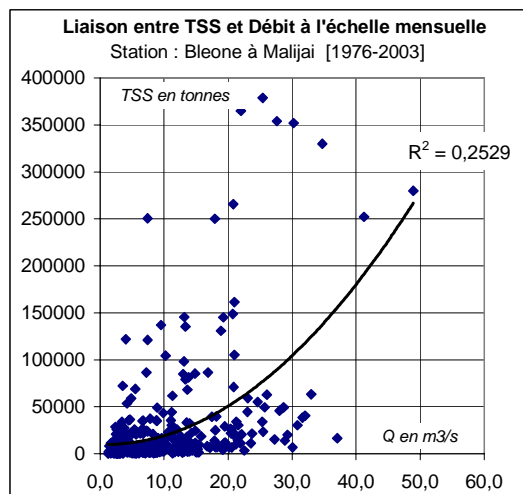
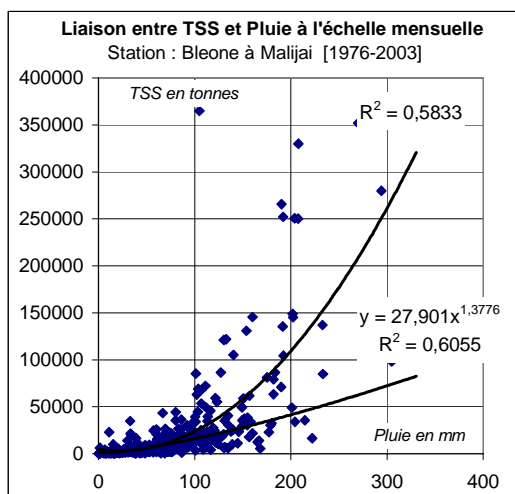
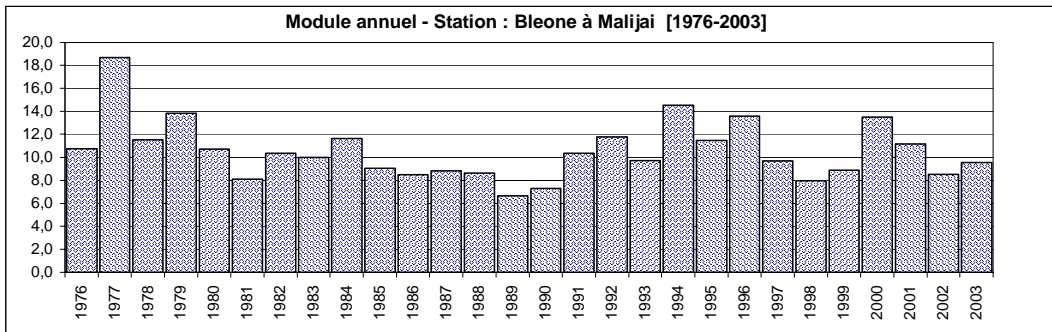
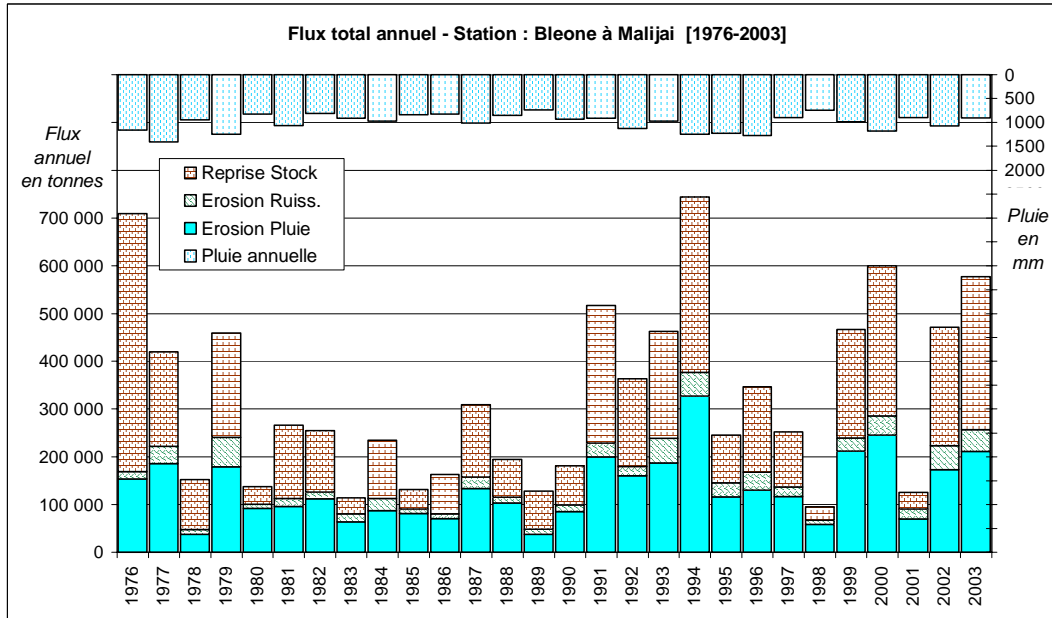
Annexe 2

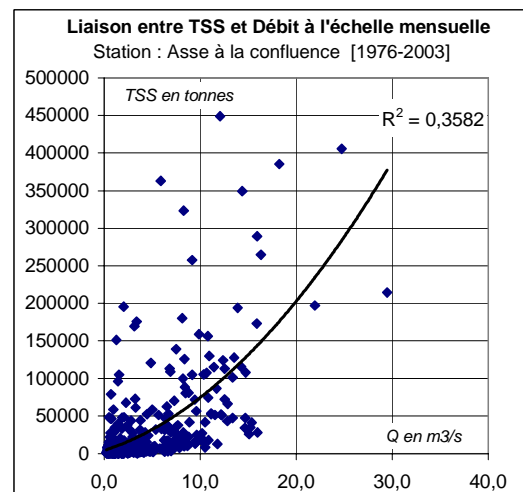
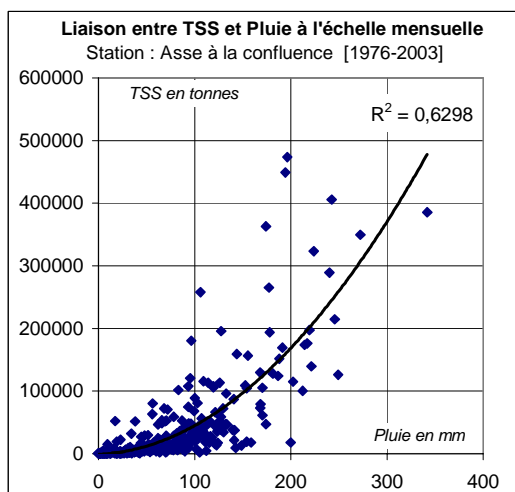
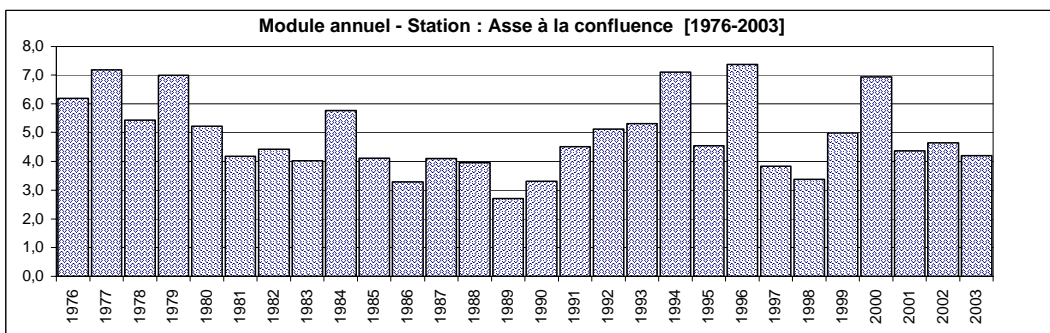
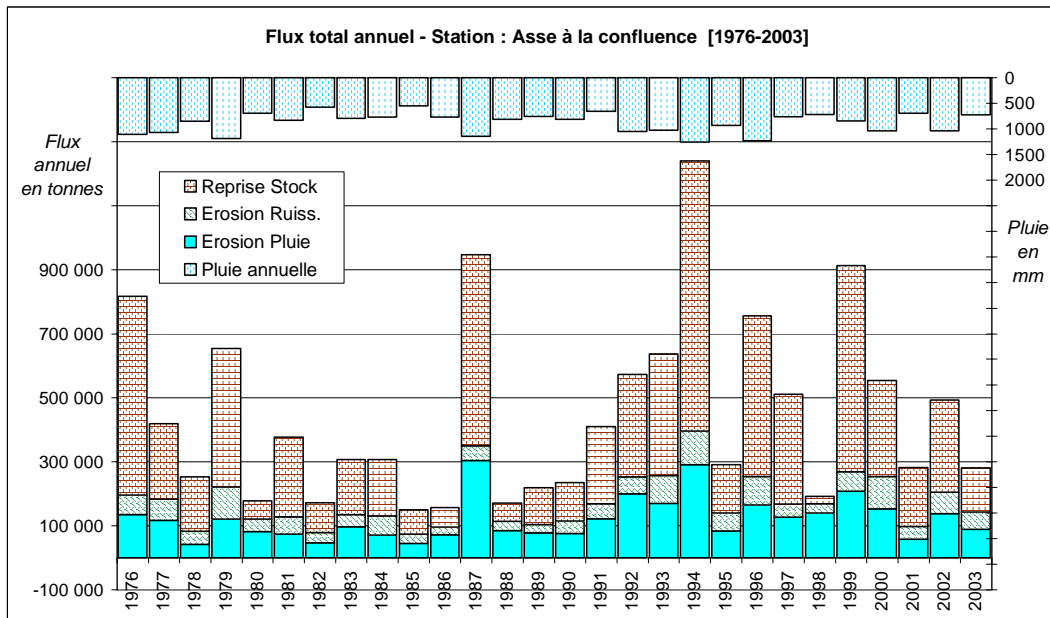
Exemples de variabilité des conditions hydroclimatologiques et du TSS :



D4161/RAP/2004-00016-A







Annexe 3

Rappels sur la distribution de Gumbel :

La fonction de répartition de Gumbel est une fonction doublement exponentielle. Elle s'écrit:

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

avec $y = a(Q - Q_0)$, y est la droite de Gumbel.

Les paramètres d'ajustement étant :

- Le paramètre d'échelle : $1/a = 0,78 \sigma$. σ est l'écart-type de la série des crues.
- Le paramètre de forme $Q_0 = Q - (1/a * 0,577)$; Q est la moyennes des crues.

Connaissant les paramètres a et Q_0 , on obtient, l'équation de la droite de Gumbel :

$$y = a(Q - Q_0)$$

On trace cette droite sur un papier de Gumbel, sur lequel on porte aussi les valeurs des fréquences au non-dépassement de toutes les crues de la série étudiée.

A défaut du papier diagramme à échelle de probabilité de Gumbel, on procède à un changement de variable pour obtenir une échelle linéaire y sachant que :

$$F(Q) = e^{-e^{-y}}, \text{ par conséquent, } y = -\text{Log}(-\text{Log} F(Q))$$

C'est à dire que pour la fréquence 0,9 $y = -\text{Log}(-\text{Log} 0,9) = 2,25$

En transformant toutes les fréquences en variable réduite y , on peut utiliser une échelle linéaire en abscisse et en ordonnées.

10-Références

Liste des ouvrages (rapports EDF, thèses, autres...)

- ✓ [1] **ALARY Claire**. *Mécanismes et bilans de l'érosion dans un bassin versant méditerranéen aménagé : le cas de la Durance*. Thèse soutenue le 13 février 1998 – 275p.
- ✓ **ARTRU Philippe**. *Les Terres Noires du bassin rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen). Stratigraphie, sédimentologie, géochimie*. Thèse de l'Université de Lyon – 1972.
- ✓ **AWONGO Marie-Louise**. *Stratigraphie, Sédimentologie et Géochimie des Terres Noires du jurassique moyen et supérieur de la Provence, sud-est de la France*. Thèse de la Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme – 1993.
- ✓ **BERGOUGNOUX Laurence, MATHYS Nicolle, OLVIER Jean-Emmanuel**. *Sediment measurements in small mountainous badlands catchments : experiments and results from experimental catchments of Draix, France*. Report from International Water Resource Engineering Conference, Seattle – august 8-12 1999.
- ✓ **BERTIER Christine**. *Projet GIS – Description du modèle hydrosédimentaire de la Durance (HP-76/02/034/A) — juin 2002 – 11p.*
- ✓ **BERTIER, PRUDHOMME, HENDRICKX**. *Projet GIS – Modèle des débits liquides de la Durance (HP-76/02/062/A) — décembre 2002 – 33p.*
- ✓ **BORGES Ana Luisa**. *Modélisation de l'érosion sur 2 bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud*. Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble – 1993.
- ✓ **BOUCHARD Jean-Pierre**. *Etude générale moyenne et basse Durance – Analyse de l'étude et de ses implications pour l'exploitation des aménagements hydrauliques (HP-76/2001/024/A) — Mai 2001 – 30p.*
- ✓ **BOUCHARD Jean-Pierre**. *Analyse morphologique de la sédimentation dans les retenues de l'Escale et St Lazare sur la Durance (HP-76/03/012/A) — juin 2003 – 34p.*
- ✓ **BOUCHARD Jean-Pierre**. *Modélisation des processus sédimentaires dans les retenues de l'Escale et St Lazare (HP-76/03/036/A) — Août 2003 – 25p.*
- ✓ **BOUCHARD J. P.** *Conception et entretien des aménagements fluviaux (Sédimentologie) — Mars 1998 – 30p.*

- ✓ **BRAVARD J P** *La gestion intégrée des bassins versants et la zone atelier bassin du Rhône* -- Université Lyon 2, IUFM et UMR 5600.
- ✓ **BROCHOT Sylvie**. *Contribution des Terres Noires et assimilées aux charges sédimentaires transportées dans le Rhône lors de la crue de novembre 1994*. Rapport du Cemagref --mars 1996 – 12p.
- ✓ **BROCHOT Sylvie**. *Erosion de Badlands dans le système Durance-Etang de Berre*. Rapport de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, service des études générales -- septembre 1993 – 6 tomes.
- ✓ **BROCHOT Sylvie, MATHYS Nicole, MEUNIER Maurice**. *L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du Sud : contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes*. Revue de Géographie Alpine 1996.
- ✓ **BUFALO M, OLIVEROS C, QUELENNEC R E** *L'érosion des Terres Noires dans la région du Buêch. Contribution à l'étude des processus érosifs sur le bassin versant représentatif de St Genis*. -- la Houille Blanche - 1989.
- ✓ **Cémagref Grenoble, Aix, Antony**. *Conséquences hydrologiques de la forêt méditerranéenne* -- 34p.
- ✓ **DESCROIX Luc**. *L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud*. Thèse de l'Université Lyon II, 300 p – 1994.
- ✓ **DESCROIX Luc**. *La mesure de l'érosion actuelle dans les Terres Noires des préalpes du sud : recherche sur parcelles expérimentales*. Bulletin du Laboratoire Rhodanien de Géomorphologie. N°23-24, p 11 à 30 – 1989.
- ✓ **DESCROIX Luc, OLIVRY Jean-Claude**. *Spatial and temporal factors of erosion by water of black marls in the badlands of the French southern Alps*. Hydrological Sciences Journal – April 2002.
- ✓ **GAUTIER Emmanuelle**. *Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le Bassin du Buech*. Thèse soutenue en Janvier 1992 – 440p.
- ✓ **HENIN Stéphane, MICHON X., GOBILLOT TH**. *Etude de l'érosion des vallées de Haute Durance et du Haut Drac*. Compte-rendu de l'assemblée générale de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques – Rome 1954.
- ✓ **MANEUX Eric**. *Erosion mécanique des sols et transports fluviaux de MES*. Thèse soutenue le 19 juin 1998.
- ✓ **MEUNIER Maurice, MATHYS Nicolle, CAMBON Jean-Pierre**. *Panorama synthétique des mesures d'érosion effectuées sur trois bassins du site expérimental de Draix*. Compte-rendu de recherches n°3 : BVRE de Draix – Cemagref éditions 1995.

- ✓ **MIRAMONT C.** *Erosion and sedimentation dynamics in southern Alps : Black marls and Durance watersheds*. Conférence sur la forêt méditerranéenne – Arles – 26 mai 2002.
- ✓ **OLIVRY J C, HOORELBECK J** *Erodabilité des Terres Noires de la vallée du Buëch (France Alpes du Sud)* – 1990.
- ✓ **OOSTWOUD WIJDENES Dirk J., ERGENZINGER Peter.** *Erosion and sediment transport under simulated rainfall on steep marly hillslopes, Draix, Alpes de Haute Provence, France*. . Compte-rendu de recherches n°3 : BVRE de Draix – Cemagref éditions 1995.
- ✓ **PARRON Claude.** *Durance fluvial system : interdisciplinary study of the spatio-temporal dynamics of a Mediterranean intensely managed torrential river*. Rapport du Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement - 1995.
- ✓ **PEYRET Hugues.** *Problématique du transport solide en Durance – (IH/UPME-GO/ENVA-ENV/00002/A)* – 2000 – 35p.
- ✓ **PRUDHOMME Christel.** *Projet GIS Durance – Génération de chroniques de débit liquide (HP-76/03/023/A)* – mars 2004 - 81p.
- ✓ **SIMONNET Jean-Pierre, RICHY Pascale, PARRON Claude.** *Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des « Terres Noires » du bassin de la Durance – Exemple des bassins versants représentatifs expérimentaux de Draix*. . Compte-rendu de recherches n°3 : BVRE de Draix – Cemagref éditions 1995.
- ✓ **Revue de Géographie Alpine.** *Les processus d'érosion en milieu montagnard : Bilan et méthodes*. N°2 1996
- ✓ **Etude hydraulique et sédimentologique de la moyenne et basse Durance** – rapport SOGREAH ingénierie – juin 1998.
- ✓ **Données sur l'eau de la Banque HYDRO :**
<http://hydro.rnde.tm.fr/>

