

Méthodologie intégrée de détermination du débit réservé: application au cas du Crupet

Laura Hirtt

26 août 2009

Table des matières

1	Introduction	1
2	Synthèse bibliographique	10
2.1	Introduction	10
2.2	La méthode holistique BBM	10
2.2.1	Introduction	10
2.2.2	Principe de la méthode	11
2.2.3	Principales étapes de mise en œuvre	12
2.2.4	Limites de la méthode	14
2.3	La méthode hydrologique RVA	14
2.3.1	Introduction	14
2.3.2	Principe de la méthode	15
2.3.3	Principales étapes de mise en œuvre	16
2.3.4	Limites de la méthode	19
2.4	La méthode des micro-habitats EVHA	19
2.4.1	Introduction	19
2.4.2	Principe de la méthode	20

2.4.3	Principales étapes de mise en œuvre	23
2.4.4	Limites de la méthode	24
2.5	La méthode hydraulique du périmètre mouillé	25
2.5.1	Introduction	25
2.5.2	Principe de la méthode	25
2.5.3	Principales étapes de mise en œuvre	27
2.5.4	Limites de la méthode	27
2.6	Récapitulatif des différentes méthodes	27
2.7	Conclusion	31
3	Mise en oeuvre des méthodes et résultats	32
3.1	Méthode du <i>Range of Variability Approach</i>	32
3.1.1	Acquisition des données et traitement	32
3.1.2	Diagnostic du cours d'eau	38
3.1.3	Détermination d'un débit réservé	41
3.2	Méthode des microhabitats - EVHA	46
3.2.1	Travail de terrain	46
3.2.2	Traitement des données	47
3.2.3	Dépouillement topographique	48
3.2.4	Calage hydraulique	49
3.2.5	Courbes de preferenda	51
3.2.6	Analyse des résultats	52
3.3	Méthode du périmètre mouillé	58

3.3.1	Principe de la mise en oeuvre	58
3.3.2	Première mise en oeuvre	60
3.3.3	Deuxième mise en oeuvre	63
4	Analyse des résultats	66
4.1	Séries hydrologiques	66
4.2	Méthode RVA	68
4.3	Méthode des micro-habitats (EVHA)	70
4.4	Méthode du périmètre mouillé	71
4.5	Comparaison entre les trois méthodes de détermination d'un débit réservé	72
5	Conclusion générale	73
A	Programmes réalisés au moyen du logiciel «R»	i
A.1	Programmes «R» - RVA	i
A.1.1	Transformation des débits horaires du Bocq en débits journaliers . . .	i
A.1.2	Débits naturels du Crupet	ii
A.1.3	Corrélation entre les deux séries de données	iv
A.1.4	Débits modifiés du Crupet	v
A.1.5	Elaboration du système d'équations	vi
A.2	Programmes «R» - Méthode du périmètre mouillé	viii
B	EVHA - tests de l'impact d'une modification des D84 sur les courbes SPU	x
B.1	Tableau des D84	x

B.2	Graphiques des SPU du chabot adulte	xi
B.3	Graphiques des SPU de la truite fario adulte	xiii
B.4	Graphiques des SPU de la truite fario aux différents stades de développement	xiv

Table des figures

1.1	Graphique des débits spécifiques en fonction de la superficie du bassin versant afférent en trois points de jaugeage	2
1.2	Graphique des moyennes mensuelles des pluviométries à Crupet de 2002 à 2008 (IRM, 2009)	3
1.3	Carte représentant les bassins versants du Crupet et du Bocq ainsi que le réseau hydrographique	4
1.4	Carte des pentes du bassin versant du Crupet	5
1.5	Répartition, en terme de surfaces, des classes de pentes sur le bassin versant du Crupet	6
1.6	Carte d'occupation du sol du bassin versant du Crupet	7
1.7	Carte de zones à risques de ruissellement diffus pour une pluie de 60 mm durant 1 heure sur le bassin versant du Crupet	8
1.8	Classes de risques de ruissellement diffus pour une pluie de 60 mm durant 1 heure sur le bassin versant du Crupet	9
2.1	Résumé des paramètres hydrologiques utilisés dans la méthode RVA et de leurs caractéristiques (Richter et al., 1998)	18
2.2	Macrodescription du cours d'eau (Pouilly et al., 1995)	21
2.3	Description fine des stations (Pouilly et al., 1995)	21
2.4	Détermination du débit minimum au moyen de la méthode du périmètre mouillé	26

3.1	Carte représentant les bassins versants du Bocq utilisés pour les calculs des débits modifiés du Crupet	35
3.2	Graphique présentant l'ajustement des courbes des débits modifiés du Crupet	37
3.3	Evolution des débits naturels et réels pour les mois de juin	40
3.4	Evolution du débit minimum moyen naturel et réel sur sept jours	41
3.5	Evolution du débit naturel et réel pour les mois de juin après correction des débits prélevés	44
3.6	Faciès de la station d'étude pour la mise en oeuvre de la méthode EVHA . .	47
3.7	Vue en plan de la station d'étude	48
3.8	Profil en long de la station d'étude - calage EVHA	50
3.9	Profil en long de la station d'étude - calage manuel	51
3.10	Valeur de la SPU pour la truite fario et le chabot, produites par le logiciel EVHA	53
3.11	Evolution de la surface mouillée du radier en fonction du débit	56
3.12	Représentation des hauteurs d'eau observées et simulées pour les neuf transects de la station	57
3.13	Photographie du point de jaugeage pour la méthode du périmètre mouillé . .	60
3.14	Profil en travers du cours d'eau au point de mesure pour la méthode du périmètre mouillé	61
3.15	Evolution de périmètre mouillé en fonction du débit du cours d'eau - jaugeage du mois d'octobre 2008	63
3.16	Evolution de périmètre mouillé en fonction du débit du cours d'eau	65
4.1	Graphique présentant l'ajustement des courbes des débits modifiés du Crupet	67
4.2	Graphiques des prélèvements à Crupet	69
B.1	Valeur de la SPU pour le chabot adulte	xii

B.2	Valeur de la SPU pour la truite fario adulte	xiii
B.3	Valeur de la SPU pour la truite fario aux différents stades de développement	xiv

Liste des tableaux

2.1	Tableau récapitulatif des méthode de détermination d'un débit réservé . . .	29
2.2	Estimation des coûts des méthodes de détermination d'un débit réservé . . .	30
3.1	Valeurs de l'erreur $\Delta\alpha$ affectant le rapport des débits réels sur les débit naturels, en fonction de l'erreur relative sur les prélèvements	34
3.2	Tableau présentant l'altération de chacun des paramètres hydrologiques . . .	39
3.3	Tableau présentant les altérations pour les différents paramètres hydrologiques après modification des débits prélevés	43
3.4	D84 pour chaque transect - calage EVHA	50
3.5	D84 pour chaque transect - calage manuel	51
3.6	Tableau présentant les limites des intervalles dans lesquels doit se situer le débit réservé en fonction de l'espèce et du stade de développement	53
3.7	Tableau des pourcentages des surfaces mouillées par rapport à la valeur du débit médian pour les débits constituant les limites des intervalles	55
3.8	Valeurs des débits réservés évalués pour chaque transect	64
B.1	Tableau présentant les D84 testés dans EVHA	xi

Liste des abréviations

BBM=*Building Block Methodology*

DR= Débit Recommandé

EVHA= Evaluation de l'Habitat (des poissons)

IFIM=*Instream Flow Incremental Methodology*

IFR = *Instream Flow Requirement*

IHA= *Indicators of Hydrologic Alteration*

RVA=*Range of Variability Approach*

SPU= Surface Pondérée Utile

VH= Valeur d'Habitat

WPM = *Wetted Perimeter Method*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma promotrice, Madame Aurore Degré, qui m'a suivie et conseillée tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Moussa Ouedraogo qui m'a beaucoup aidée pour les manipulations du théodolite.

Stéphane Becquevort, Eléonore Beckers, Louis Legros et encore Aurore Degré ont constitué une excellente équipe pour le travail de terrain.

Je tiens également à remercier Madame Marie Derick de la société Vivaqua, Messieurs Sébastien Gailliez et Thierry Demol de la Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, Sébastien Den Doncker du Groupe d'Intérêt pour les Poissons, la Pêche et l'Aquaculture (GIPPA asbl) qui m'ont gracieusement fourni les informations et données nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Grâce aux conseils de Messieurs Yves Souchon et Bryan Richter la mise en oeuvre des méthodes de détermination des débits réservés a été grandement facilitée .

Je tiens également à remercier Madame Catherine Sohier d'avoir réalisé la modélisation EPICgrid nécessaire à mon travail.

J'exprime par ailleurs ma profonde reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail : Monsieur Charles Debouche, Madame Aurore Degré, Monsieur Grégory Mahy, Monsieur Xanthoulis et particulièrement Monsieur Georges Michel qui est l'initiateur de ce travail et qui m'a fourni des contacts très utiles à sa réalisation.

Enfin, un grand merci à ma famille, tout particulièrement à mes parents, pour les relectures attentives et les conseils avisés.

Résumé

Les pompages et la présence de barrages entraînent des modifications des régimes d'écoulement des cours d'eau. Dans ce travail, nous proposons de mettre en oeuvre et de comparer les résultats de trois méthodes de détermination de débits réservés dans le cas d'un cours d'eau, le Crupet, dans le bassin versant duquel sont situées des stations de pompages avec exportation d'eau. Il s'agit de la méthode du *Range of Variability Approach*, de la méthode des micro-habitats et de la méthode du périmètre mouillé. La première consiste à déterminer un débit réservé tel que le cours d'eau conserve le plus possible son comportement naturel après pompage. Le calcul se base normalement sur l'étude de vingt années de données de débits avant et après la mise en place d'un captage. Dans notre cas, en raison notamment de l'absence d'une station limnimétrique sur le Crupet, ces séries ont dû être établies à partir d'extrapolations et d'hypothèses simplificatrices (estimation des captages, méthode de régionalisation). Nous analysons ensuite l'état d'altération de trente trois paramètres hydrologiques au moyen d'un logiciel informatique et élaborons une équation qui calcule quels débits peuvent être pompés sans qu'il y ait une trop forte altération de ces paramètres. La deuxième méthode se base sur des données topographiques, hydrologiques et biologiques (préférence d'habitat des poissons) afin de déterminer un débit minimum qui convient en période d'étiage. La méthode du périmètre mouillé, enfin, permet également de trouver un débit minimum mais en ne s'intéressant qu'à la morphologie des transects (relation entre périmètre mouillé et débit). Pour ces méthodes, le débit ainsi déterminé est celui qui convient au tronçon étudié. Il ressort de l'analyse des résultats que ces deux dernières méthodes préconisent, dans le cas du Crupet, le même débit minimum de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. La méthode RVA recommande par contre un débit minimum plus élevé. Elle suggère aussi de limiter les prélèvements actuels si les hypothèses émises se révèlent exactes.

Abstract

Pumping stations and dams generate modifications of rivers' state flow of. In this work, we propose to implement and compare the results of three instream flow assessments. We are studying a Belgian river called Crupet, which has some pumping stations on its catchment. The three methods are : the Range of Variability Approach, the Instream Flow Incremental Methodology, and the Wetted Perimeter Method. The aim of the first method is to find an instream flow such that the river conserves as much as possible its natural behaviour after pumping. This method is usually based on twenty years of flow data, before and after the construction of the pumping stations. In our case, the data were not available, especially because there are no stage gauging stations. So we had to generate hydrologic data based on some approximations and hypotheses (estimation of the quantity of water pumped on the catchment, method of regionalization). Next we use a software to analyse the alteration of thirty-three hydrologic parameters, and we formulate an equation that calculates how much water could be pumped to minimise the alteration of the parameters. The second method is based on hydrological, morphological, and biological (fish habitat) data to assess the minimum flow in a river at low water. The third method, the Wetted Perimeter Method, is used to find the minimum flow knowing the morphology of the transect (relation between wetted perimeter and flow). For the last two methods, we found the minimum flow for the studied section being equal to $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$. The RVA methodology recommends however a higher minimum flow and imposes to reduce the pumping, at least if all our hypotheses are correct.

Chapitre 1

Introduction

Les activités de l'homme entraînent des modifications plus ou moins sévères dans les régimes d'écoulement des cours d'eau, par exemple suite à la mise en place de captages et la construction de barrages. Ces modifications peuvent mener, à terme, à des altérations profondes de l'état écologique et morphodynamique du cours d'eau. Or, la Directive Cadre Eau de l'Union Européenne vise à atteindre le bon état des cours d'eau d'ici 2015. Dans cette optique, des méthodes de détermination des débits réservés se développent actuellement dans de nombreux pays européens. L'objectif de ces méthodes peut être soit de déterminer le débit minimum en dessous duquel le cours d'eau ne peut descendre en période d'étiage, soit de calculer, tout au long de l'année, quels sont les débits qui peuvent être prélevés afin que le cours d'eau conserve au moins partiellement un comportement naturel.

Le cours d'eau étudié lors de la réalisation de ce travail est le Cruquet. Il a été choisi pour la mise en application des méthodes de détermination de débits réservés car il subit des prélèvements depuis près de trente ans. Ce sont environ 4,5 millions de mètres cubes d'eau¹ qui y sont prélevés chaque année afin d'alimenter Bruxelles et son agglomération. Ceci engendre bien entendu des modifications du régime d'écoulement du cours d'eau, comme on peut le constater sur le graphique de la figure 1.1. Ce graphique représente le débit spécifique en trois points de jaugeages² à deux périodes de l'année : le premier octobre 2008, alors que le captage était complètement en décharge, et le dix-neuf mars 2009, lors du fonctionnement habituel du captage. Les jaugeages ont été réalisés en trois endroits : près du captage (en amont), au milieu du cours d'eau et à l'exutoire. Les triangles rouges correspondent à un comportement naturel du cours d'eau, sans prélèvement. Les ronds bleus correspondent aux débits spécifiques du cours d'eau lorsqu'il y a des prélèvements. On observe que les deux séries de points ne présentent pas exactement la même tendance. La valeur du débit

¹Cette estimation a été faite sur base des données annuelles de 2000 à 2007.

²Les jaugeages ont été réalisés au moyen d'un courantomètre électromagnétique Flo-Mate 2000. Les mesures sont réalisées le long de verticales situées à intervalles réguliers le long des transects étudiés. Sur chaque verticale, on mesure la vitesse à des profondeurs correspondant à 0,2 ; 0,4 ; 0,6 et 0,8 fois la hauteur d'eau.

spécifique correspondant au bassin versant le plus petit est supérieure aux autres valeurs dans le cas du débit naturel et inférieure dans le cas du débit modifié. Signalons que les jaugeages amont et aval ont été effectués deux fois au même endroit avec une erreur d'environ un mètre sur la position. Pour le jaugeage au centre du linéaire, il a été plus difficile de retrouver l'endroit exact du premier jaugeage. On estime que l'erreur est d'une dizaine de mètres. Cela ne change pas pour autant les conclusions issues de l'observation du graphique de la figure 1.1.

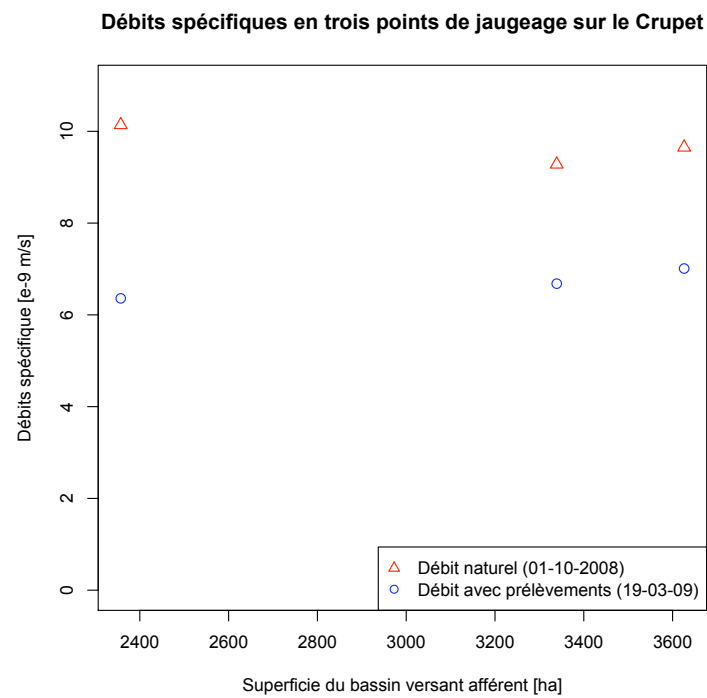


FIG. 1.1: Graphique des débits spécifiques en fonction de la superficie du bassin versant afférent en trois points de jaugeage

Le Crupet est situé dans le bassin de la Meuse, plus précisément dans le bassin versant du Bocq. Il est long d'environ 13 km. Son débit médian est estimé à $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'exutoire. Le graphique de la figure 1.2 présente la pluviométrie moyenne du bassin versant du Crupet pour chaque mois de l'année. On observe sur ce graphique que les mois pluvieux sont les mois d'août, mai et février et les mois les plus secs sont avril, juin et septembre.

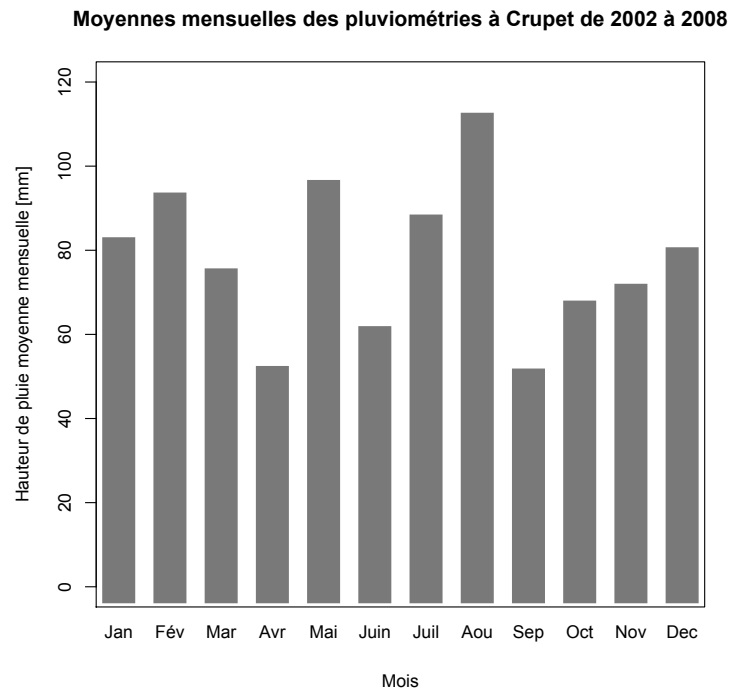


FIG. 1.2: Graphique des moyennes mensuelles des pluviométries à Crupet de 2002 à 2008 (IRM, 2009)

La densité de cours d'eau, tant sur le bassin versant du Crupet que sur celui du Bocq, est de 1 km de linéaire par kilomètre carré. On dénombre dix-sept stations de pompage sur le bassin du Bocq (voir carte de la figure 1.3). La texture du sol du bassin du Crupet est un limon caillouteux ou à phase caillouteuse (64% de la superficie). Le drainage est légèrement excessif sur environ 75% de la surface. Les sols sont donc relativement secs.

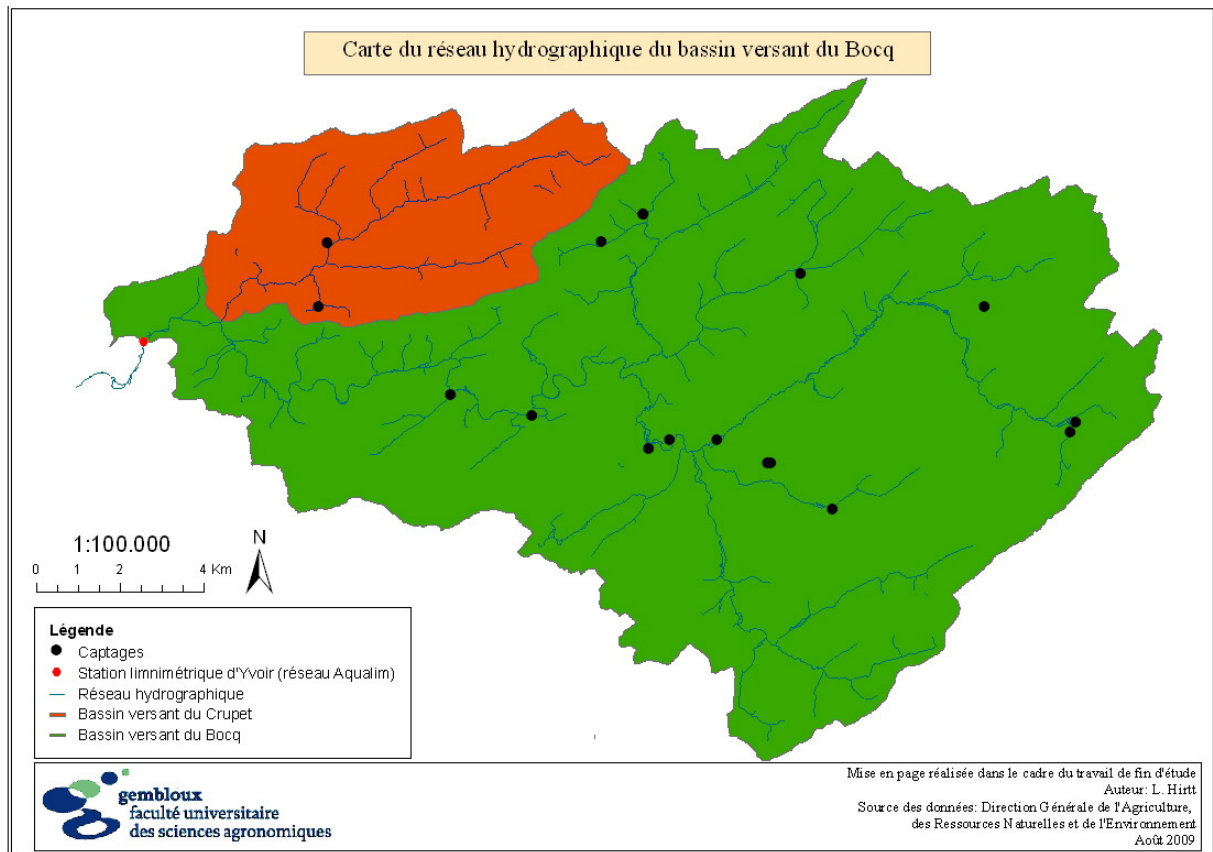


FIG. 1.3: Carte représentant les bassins versants du Crupet et du Bocq ainsi que le réseau hydrographique

Le bassin versant du Crupet est une zone vallonnée, comme nous pouvons l'observer sur la carte de la figure 1.4. La répartition des classes de pentes, en terme de superficies, est présentée au graphique de la figure 1.5. On observe qu'il y a une répartition assez égale entre les différentes classes sauf pour la classe des très faibles pentes qui occupe une surface réduite.

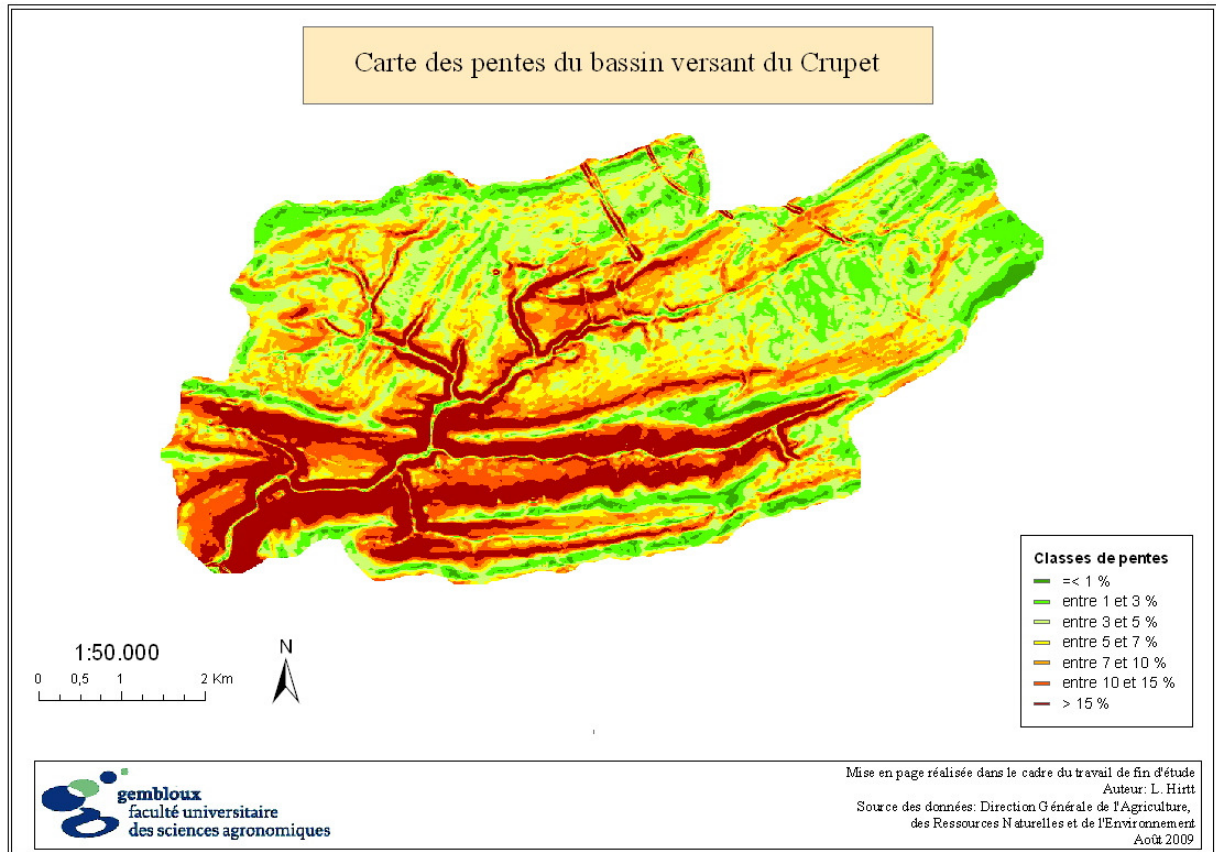


FIG. 1.4: Carte des pentes du bassin versant du Crupet

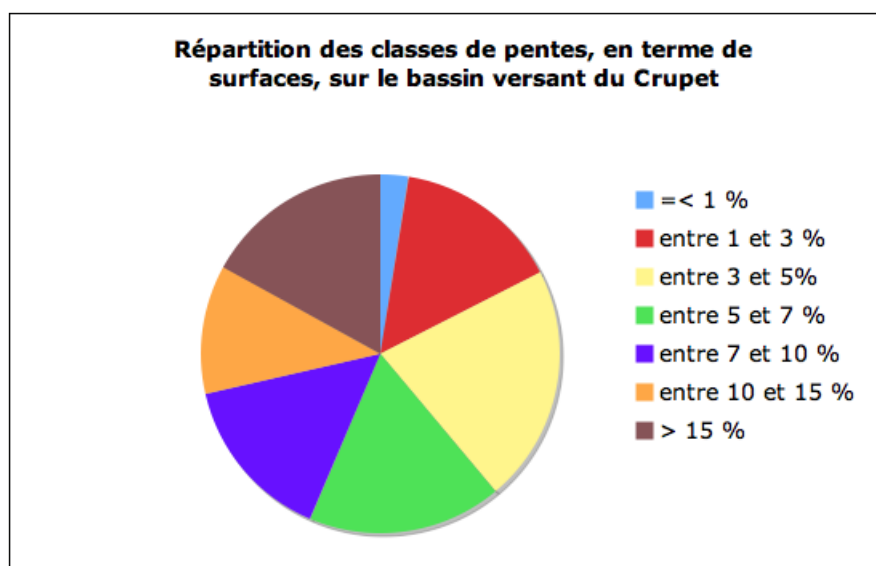


FIG. 1.5: Répartition, en terme de surfaces, des classes de pentes sur le bassin versant du Crupet

La carte de la figure 1.6 représente l'occupation du sol du bassin versant du Crupet pour l'année 2005. Il s'agit essentiellement de prairies permanentes et de cultures non sarclées. Les premières occupent environ 26 % de la superficie totale du bassin versant tandis que les secondes couvrent 22,5 % de la surface. On trouve également des forêts de feuillus sur 12% de la surface. On peut conclure que l'on se situe dans une zone rurale (le tissu de bâti discontinu couvre 6% de la surface).

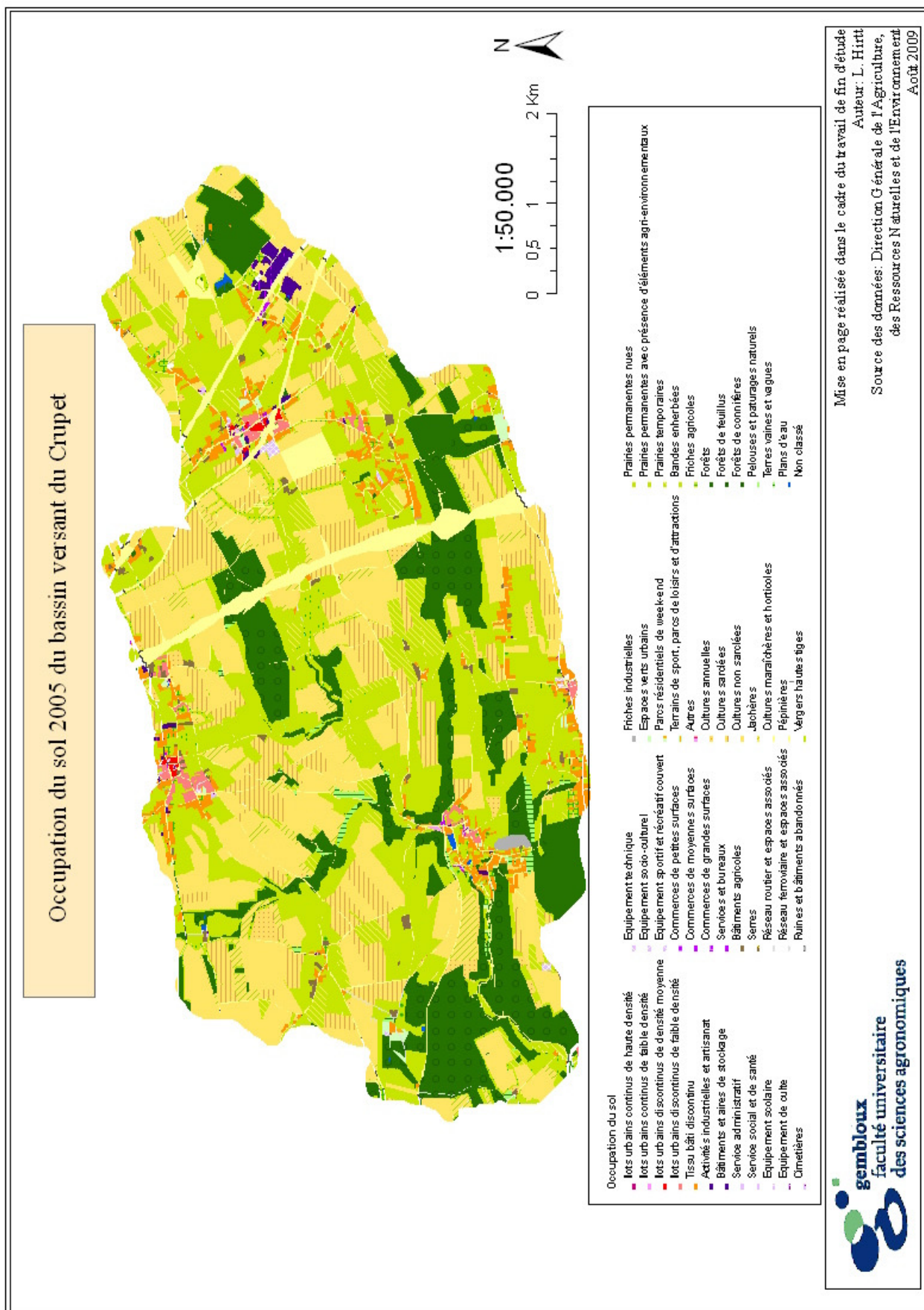


FIG. 1.6: Carte d'occupation du sol du bassin versant du Crupet

La carte de la figure 1.7 présente les zones à risques de ruissellement diffus sur le bassin versant du Crupet, suite à une pluie de 60 mm durant une heure. (Demarcin et al., 2009) Le graphique de la figure 1.8 représente le pourcentage de surface occupé par chacune des classes de risque. Il ressort de ce graphique que le bassin versant du Crupet présente un risque élevé de ruissellement lors de fortes pluies.

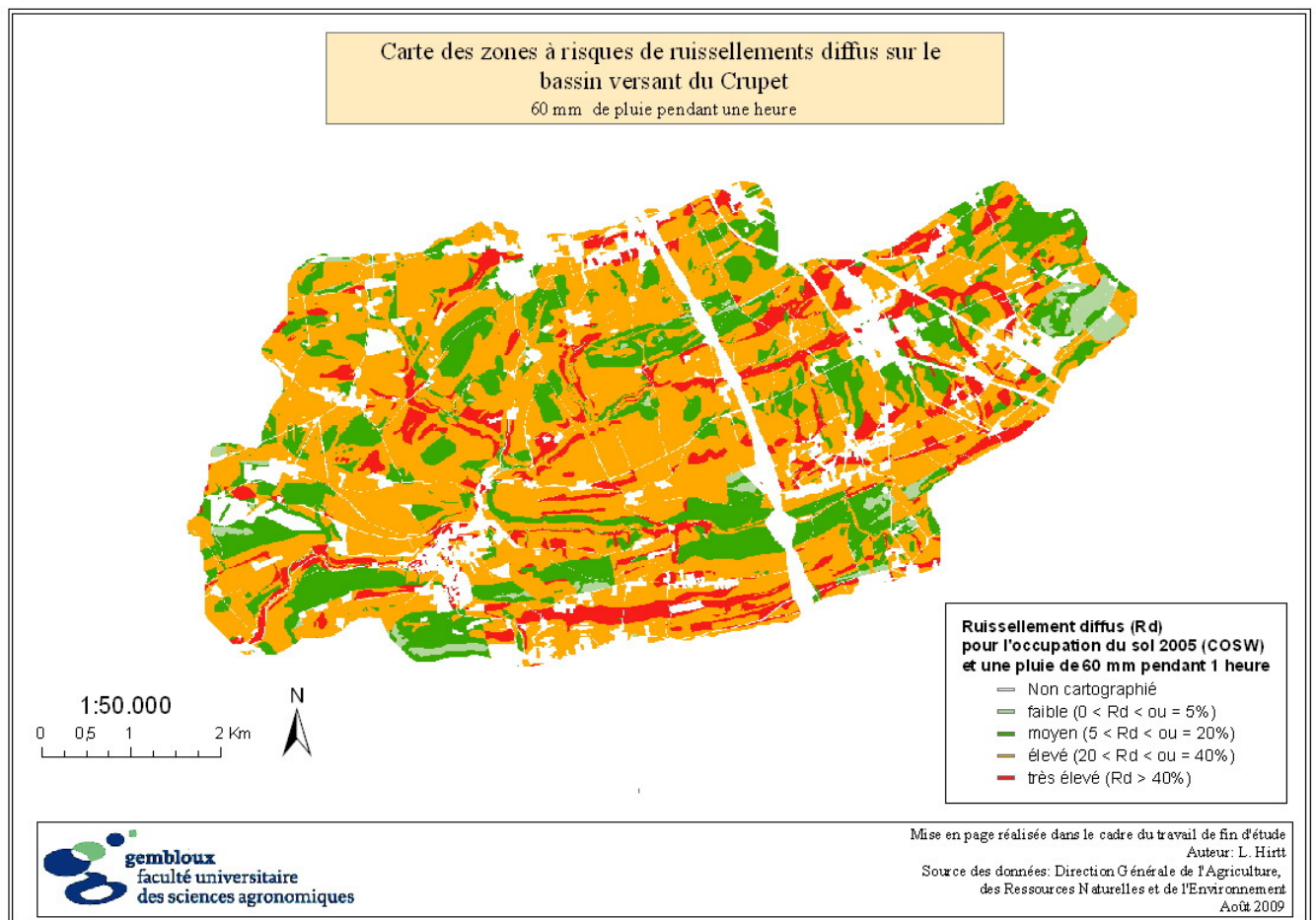


FIG. 1.7: Carte de zones à risques de ruissellement diffus pour une pluie de 60 mm durant 1 heure sur le bassin versant du Crupet

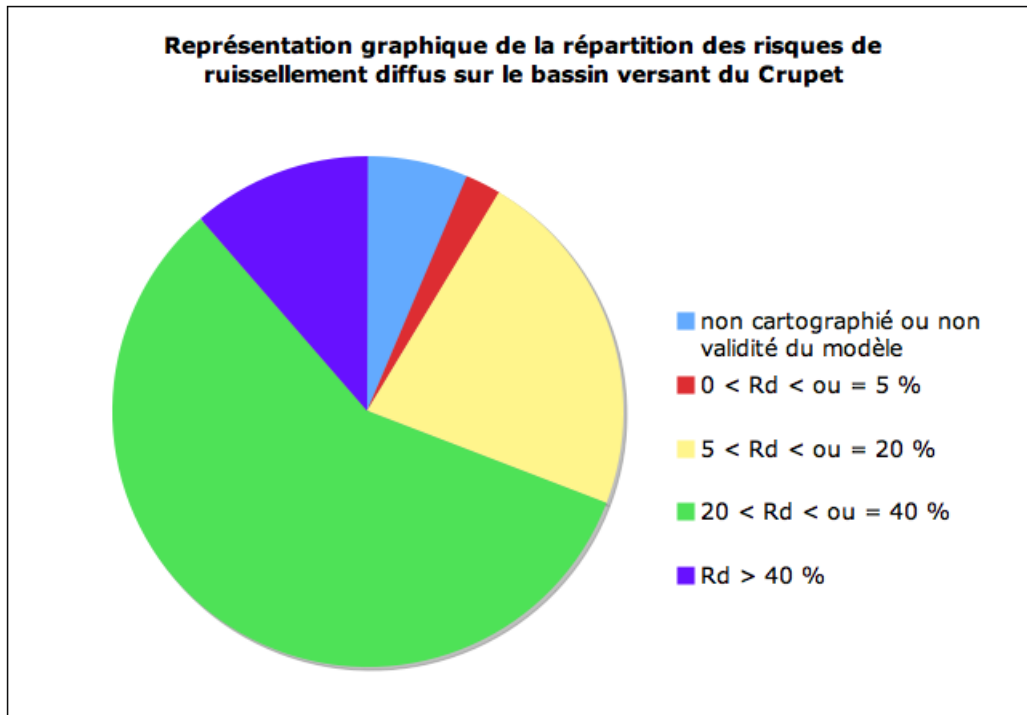


FIG. 1.8: Classes de risques de ruissellement diffus pour une pluie de 60 mm durant 1 heure sur le bassin versant du Crupet

L'objectif de ce travail est de mettre en oeuvre plusieurs méthodes de détermination du débit réservé sur le Crupet afin d'analyser leur faisabilité et de comparer les résultats obtenus. Les méthodes sont : la méthode du *Range of Variability Approach*, la méthode des micro-habitats et la méthode du périmètre mouillé.

Dans un premier temps, nous proposons une brève synthèse bibliographique qui permettra d'avoir une vue globale des diverses méthodes de détermination de débits réservés. Le chapitre suivant constitue le coeur du travail avec l'application des méthodes les plus pertinentes au Crupet. Nous poursuivons par une analyse comparative des résultats avant de conclure.

Chapitre 2

Synthèse bibliographique

2.1 Introduction

Les différentes méthodes utilisées pour la détermination d'un débit réservé dans les cours d'eau peuvent être classées en quatre subdivisions : les méthodes des micro-habitats, les méthodes holistiques, les méthodes hydrologiques et enfin les méthodes hydrauliques. Chaque catégorie compte plusieurs méthodes. Dans le présent mémoire, une seule a été sélectionnée par catégorie. Notre choix s'est porté sur les techniques les plus abouties et/ou les plus utilisées. Les méthodes retenues sont présentées dans ce chapitre.

2.2 La méthode holistique BBM

2.2.1 Introduction

Développées dans les années 1990, les méthodes holistiques tendent à appréhender les besoins des écosystèmes aquatiques de façon globale en ne privilégiant pas d'espèce cible particulière. (Rebillard, 2006) La méthode holistique la plus communément utilisée est la *Building Block Methodology* (BBM) qui est présentée dans la suite de cette section. Cette méthode, applicable en moins d'un an, permet une gestion aisée de la ressource en eau, étant donné qu'elle préconise des débits mensuels. Elle est basée sur des avis d'experts et des modélisations hydrologiques dans de faibles proportions.

2.2.2 Principe de la méthode

La BBM a été créée pour répondre à deux exigences : permettre une approche holistique des écosystèmes aquatiques et préconiser des modes de gestion de la ressource dans un contexte caractérisé par le manque de données biologiques et l'urgence de la demande.(Rebillard, 2006)

Le concept de base est simple. Il existe certains débits, dans l'ensemble des débits d'une rivière, qui jouent un rôle plus important que d'autres pour la préservation de l'écosystème (débit de crue, débit d'étiage, ...). Ces débits peuvent être identifiés en termes de durée, de fréquence et d'amplitude. Lorsqu'on désire connaître le débit réservé d'un cours d'eau, il est possible de combiner ces débits. On peut alors modifier la loi de gestion du cours d'eau afin qu'elle soit en adéquation avec les exigences écologiques fixées au préalable. (King et Louw, 1998) La BBM est basée sur des avis d'experts ainsi que sur les meilleures connaissances existantes. Des groupes de travail sont organisés afin de réunir différents spécialistes dans des domaines très variés (gestionnaires de la ressource, ingénieurs, hydrologues, hydrauliciens, spécialistes en biologie, ...). Cette méthode semble être la meilleure solution pour rassembler les avis des spécialistes. L'aboutissement des discussions est la proposition de débits, pour chaque mois de l'année, en termes de volume d'eau. Ces débits doivent permettre une maintenance aisée de la rivière en fonction des exigences écologiques de celle-ci. D'autres acteurs tels que des consultants sociaux et des gestionnaires des ressources en eau peuvent également contribuer aux discussions. Ils apportent à celles-ci un aspect social et économique.(Hugues, 2001)

L'objectif final de la BBM est de déterminer pour chaque mois de l'année :

- le débit d'étiage de maintenance [m^3/s]
- le débit de crue de maintenance : événement défini comme un pic en [m^3/s] et en durée sur la journée
- le débit d'étiage en période sèche
- le débit de crue en période sèche : événement défini comme un pic en [m^3/s] et en durée sur la journée

Le débit de maintenance correspond aux années dites normales, en opposition avec les débits de périodes sèches. Une période sèche est caractérisée par des débits qui permettent la survie d'espèces et la conservation des processus les plus importants de l'écosystème. Une année normale est une année de précipitations normales qui permet d'espérer que toutes les fonctions et tous les processus liés au fonctionnement du cours d'eau soient rencontrés. (King et al., 2008) Chacun de ces débits est associé à une justification d'un ou de plusieurs spécialistes de l'équipe d'experts.(Hugues, 2001)

Les hypothèses de travail de la méthode BBM sont les suivantes :

1. Le biote ¹ associé à une rivière est fonction du régime d'écoulement de celle-ci. Si les débits ne sont pas caractéristiques de la rivière (intervention humaine), l'écosystème ripisylve subit une perturbation atypique qui peut changer ses caractéristiques.
2. L'identification de ce qui semble être les composants les plus importants du régime de la rivière et leur incorporation dans le régime modifié permet de maintenir le biote naturel ainsi qu'un fonctionnement naturel de la rivière.
3. Certains débits influencent plus que d'autres la géomorphologie du chenal. Leur identification et leur incorporation dans le régime modifié permettent de maintenir la structure et la diversité du biotope physique. (King et Louw, 1998)

Les débits incorporés dans le régime modifié constituent donc le débit recommandé (DR) soit le *Instream Flow Requirement* (IFR) en anglais. Le DR décrit, dans l'espace et dans le temps, la quantité minimale d'eau indispensable au maintien des états écologiques voulus.

2.2.3 Principales étapes de mise en œuvre

Préparation des tables de travail. Cette étape est préliminaire à la mise en œuvre des tables de travail. Il s'agit en effet de réaliser des études de terrain et de récolter un maximum de données hydrologiques, écologiques, ... Les données hydrologiques doivent permettre de déduire des séries temporelles du débit naturel et du débit actuel journalier. Lorsque le site d'étude est éloigné d'une zone de mesure, on réalise des modélisations hydrologiques afin de générer des séries temporelles du débit journalier. De plus, même si des données sont disponibles, les débits ont certainement été affectés par l'utilisation d'eau par l'agriculture et l'industrie. Le modèle proposé est généralement un modèle spatial intemporel de pas de temps journalier basé sur des courbes de débits classés. Ces courbes doivent être produites pour chaque mois. D'autres modèles peuvent être utilisés. Il tient à l'expérimentateur d'utiliser le modèle le plus adapté et celui qu'il maîtrise le mieux. Le modèle utilisé doit être capable de simuler les changements dans les débits dus aux modifications artificielles. (Hugues, 2001)

D'autres types de données sont nécessaires avant d'estimer le régime d'écoulement d'un cours d'eau. Les différentes étapes préalables sont présentées ci-dessous.

1. Il faut déterminer quel est l'état actuel de la rivière en termes de débit disponible et d'habitat rivulaire pour les plantes et les animaux.
2. L'importance de la zone étudiée sur le plan économique, social et écologique doit être connue.
3. Il faut savoir quelle est l'importance de la rivière d'un point de vue social pour les communautés qui vivent aux alentours.

¹Désigne l'ensemble des plantes, micro-organismes et animaux que l'on trouve dans un biotope (région ou secteur donné). <http://www.dictionnaire-environnement.com> (13 février 2009)

4. Les caractéristiques géomorphologiques du cours d'eau doivent être décrites avec précision.
5. Il faut évaluer les besoins passés, présents et futurs en termes de qualité physico-chimique de l'eau de la rivière.
6. Une compilation des données existantes sur la biologie du cours d'eau doit être mise en oeuvre afin de réaliser une zonation longitudinale de celui-ci en fonction de la distribution des espèces. Il est nécessaire de savoir si certaines espèces ou communautés sont plus importantes que d'autres.
7. Les sites BBM doivent être identifiés. En ces points, sont réalisées la collecte, la création et l'analyse de nouvelles données. Un DR sera évalué pour chacun des sites.
8. Il est primordial de déterminer les objectifs de l'étude. Cela implique de répondre à la question suivante : «dans quelles conditions environnementales devrait être maintenue la rivière dans le futur ?»
9. Une analyse des courbes de jaugeage, de la section en travers du cours d'eau et d'autres informations relatives aux débits, en relation avec l'hydraulique, la morphologie du chenal et le biotope doivent être disponibles pour les sections des sites BBM étudiés. (King et Louw, 1998)

Phase d'interprétation des données - Table de travail BBM. L'objectif de cette étape est d'établir les régimes hydrologiques préconisés pour les zones étudiées. Les groupes de travail sont composés de spécialistes et s'attachent à déterminer les DR pour chacun des sites BBM identifiés lors de la première étape de travail. La phase d'interprétation des données se divise en quatre sessions principales de travail.

La première session consiste à effectuer une évaluation de terrain en présence des spécialistes. Le site doit être le moins modifié possible pour que ceux-ci aient une vision correcte de la biodiversité du cours d'eau. Les spécialistes décrivent les impacts probables d'une modification du débit. Les sections en travers et les courbes de jaugeage sont fournies et un questionnaire est remis à chacun afin d'avoir une base de discussion. Le débit au moment de l'étude doit être connu. (King et Louw, 1998)

La deuxième session consiste en l'échange des informations. (King et Louw, 1998)

La session trois consiste en la détermination du DR en petits comités. Afin de tenir compte du rôle sélectif joué par la variabilité hydrologique naturelle, ce régime est décomposé en deux alternatives : une alternative correspondant à un écoulement de maintenance et une autre associée aux années sèches. Pour intégrer ces deux options dans le mode de gestion, il faudra tenir compte de la période de retour des années sèches. Après une discussion sur le type de régime qui faciliterait la maintenance de l'état écologique désiré, les débits requis sont identifiés mois par mois, en commençant par les débits d'étiage. Les plus hauts débits sont ensuite décrits. (King et Louw, 1998) L'hydraulicien interprète alors les écoulements et les quantifie pour les différentes variables hydrauliques et hydrologiques (hauteur d'eau, périmètre mouillé, vitesse, aire inondée, ...). Pour chaque composante de l'écoulement retenu, on doit avoir une idée de la fréquence de dépassement associée par rapport au régime

actuel et par rapport au régime naturel de référence. Pour les composantes associées aux débits plus élevés, il faut mentionner également la durée. Enfin, pour permettre une plus grande clarté par rapport aux quantités disponibles pour les usages de la ressource, on calcule le volume annuel associé à chaque composante du régime. Ce volume est ensuite exprimé en pourcentage du volume annuel écoulé, moyen ou médian, pour le régime naturel de référence et pour le régime actuel. (Rebillard, 2006)

La quatrième et dernière session consiste à évaluer la pertinence des propositions. Pour chaque site, les régimes proposés sont comparés, afin de vérifier leur concordance et d'élaborer une proposition globale pour tout le linéaire. (King et Louw, 1998)

Faisabilité de la méthode. Lors de cette étape, une analyse est réalisée en terme de faisabilité, par rapport aux contraintes imposées par les différents usages de la ressource. En cas d'incompatibilité avec la demande, il faut modifier les débits réservés en minimisant les impacts écologiques. Ensuite, il faut traduire le régime grossier obtenu en véritables séries hydrologiques à partir de modèles climatiques et hydrologiques. En cas de validation du régime proposé, des études plus poussées doivent être menées pour pallier les manques identifiés au cours de l'analyse. Un programme de suivi doit également être mis en place pour réajuster le mode de gestion au cours du temps. (Rebillard, 2006)

2.2.4 Limites de la méthode

La méthode holistique présente diverses limitations.

- La nécessité de faire appel à un groupe d'environ onze spécialistes durant quatre jours pour effectuer l'étude du cours d'eau rend l'application de la méthode difficile.
- Du fait d'une approche holistique, les objectifs retenus sont assez qualitatifs ce qui rend plus difficile la mise en place d'un suivi efficace.
- La méthode est moins adaptée aux rivières fortement aménagées car elle s'inscrit dans une démarche de préservation des écosystèmes existants.
- Les résultats donnés par la BBM sont relativement subjectifs. Ils s'appuient sur des avis d'experts facilement contestables par les différents acteurs. (Rebillard, 2006)

2.3 La méthode hydrologique RVA

2.3.1 Introduction

Les méthodes hydrologiques sont largement utilisées pour déterminer des débits réservés. Il en existe trois principaux types. On peut exprimer le débit réservé en pourcentage du module

interannuel du cours d'eau ou des modules saisonniers. Il est également possible de l'évaluer sur base de courbes de débits classés. Dans le cadre de ce travail, nous nous focaliserons sur la troisième méthode qui prend en compte non seulement des paramètres hydrologiques mais également des paramètres écologiques. Dans cette catégorie, la méthode la plus pertinente à utiliser est la méthode de *Range of Variability Approach* (RVA). La méthode RVA est d'application dans les rivières pour lesquelles la conservation de la biodiversité aquatique et la protection de l'écosystème sont les objectifs de gestion du cours d'eau. Nous allons expliciter cette méthode dans la présente section. La majorité des informations reprises ci-dessous sont issues de l'article de Brian D. Richter «*How Much Water Does a River Need ?*» de 1997, qui constitue une référence en la matière.

2.3.2 Principe de la méthode

De nombreuses études sur les relations entre les variables hydrologiques et l'intégrité des écosystèmes des rivières mènent à un paradigme sur le débit naturel qui stipule que la totalité de la plage des variations intra- et inter-annuelles des régimes hydrologiques, et les caractéristiques associées tels la magnitude, la saisonnalité, la durée, la fréquence, et le taux de variation, sont critiques pour maintenir la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes aquatiques. Il en découle que gérer un écosystème avec toutes ses plages de variations naturelles est un moyen approprié pour maintenir un système diversifié, productif, souple et sain. Donc, si la conservation de la biodiversité indigène et l'intégrité de l'écosystème sont les objectifs de gestion de la rivière, alors les objectifs du gestionnaire doivent prendre en compte le paradigme sur le débit naturel. C'est ce que propose la méthode RVA.

La méthode RVA identifie les objectifs annuels de gestion en se basant sur une étude statistique complète des caractéristiques du débit qui sont pertinentes d'un point de vue écologique. A cette fin, on doit identifier des paramètres, soit un ensemble de 33 paramètres hydrologiques nommés indicateurs de l'altération hydrologique (*Indicators of Hydrologic Alteration*, IHA). Ceux-ci sont des paramètres de statistique descriptive. Une méthode de gestion est ensuite élaborée. Elle a pour but d'atteindre les objectifs fixés sur une base annuelle. La méthode RVA est adaptative. Cela signifie que l'on enregistre les effets de la gestion du cours d'eau sur son écologie et que ces informations servent à redéfinir de nouveaux objectifs et règles de gestion.

Pour appliquer la méthode RVA, il est nécessaire de connaître les valeurs des débits qui, dans le meilleur des cas, ont été mesurés durant une période où la rivière était encore peu modifiée par l'homme. Comme cette série de données n'est pas toujours disponible, la méthode RVA propose trois cas de figure qui sont explicités ci-après. Un premier cas se présente lorsque des données existent sur une période où les mesures représentent les conditions naturelles. C'est le cas le plus avantageux mais également le plus rare. Il est recommandé de posséder au minimum vingt années de données. Le second cas de figure est celui où des données inadéquates existent pour une période représentative du régime d'écoulement naturel de la rivière. Si les données existent mais pour une période inférieure à vingt ans, il peut être

nécessaire d'utiliser des modélisations hydrologiques. Quelques années de données permettent de calibrer le modèle et d'améliorer sa fiabilité. On peut également utiliser des méthodes d'estimation hydraulique. Ces méthodes permettent d'étendre l'échantillon connu à partir de régressions qui font un lien entre le site d'intérêt et d'autres sites de jaugeages, moins altérés ou non perturbés. Dans ces deux cas, il est préférable de ne pas analyser tous les paramètres IHA. Et tout particulièrement les paramètres du groupe 5 (taux et fréquence de changements consécutifs dans les conditions d'écoulement) qui sont plus sensibles aux erreurs dans l'estimation des débits journaliers. Le troisième cas de figure est celui où il n'existe pas de données disponibles pour la période d'intérêt. Dans ce cas, deux alternatives sont possibles : la simulation hydrologique ou l'utilisation d'une base de données «normalisée» d'un autre bassin versant. Celui-ci doit avoir les mêmes conditions climatiques, la même géologie et être peu affecté par des activités anthropiques. Comme pour le second cas, il est préconisé de ne pas prendre en compte les paramètres IHA du groupe 5.

2.3.3 Principales étapes de mise en œuvre

La méthode RVA repose sur six points pour le démarrage, la mise en oeuvre, et l'affinage des objectifs et des règles pour une rivière spécifique ou un tronçon.

1. La variation naturelle du débit est caractérisée par un ensemble de 33 paramètres hydrologiques (voir figure 2.1) en rapport avec l'écologie du cours d'eau, ce sont des paramètres d'altération hydrologique soit *Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA). Ces derniers peuvent être évalués au moyen du logiciel informatique IHA fourni par *The Nature Conservancy* ². La méthode nécessite d'avoir des données de débits sur environ vingt ans, avant et après modification du régime hydrologique du cours d'eau. Les mesures des tendances générales et de la dispersion des débits sont tirées des séries annuelles pour chacun des paramètres étudiés et sont utilisées pour caractériser des variations inter-annuelles.
2. Un objectif est choisi pour chacun des paramètres. Le principe de base est que la rivière doit être gérée de telle sorte que les valeurs annuelles de chaque paramètre IHA soient incluses dans la fourchette des variations naturelles de ce paramètre. Donc, les objectifs de gestion pour chacun des paramètres sont donnés dans une fourchette de valeurs acceptables. (Richter et al., 1997) On peut choisir :
 - de rester à l'intérieur de la plage de variation naturelle de l'indicateur,
 - de rester dans une plage déterminée par deux fréquences de dépassement associées à la distribution naturelle de l'indicateur,
 - de rester pour x % des années à l'intérieur de la plage minorée par la valeur moyenne moins l'écart type et majorée par la valeur moyenne plus l'écart type. (Rebillard, 2006)

Les objectifs de gestion peuvent prendre en compte, lorsque les données sont disponibles, l'impact écologique qu'engendre l'exclusion d'événements extrêmes, lorsque les

²www.nature.org

objectifs n'incluent pas toute la fourchette de variations naturelles. En l'absence d'informations écologiques adéquates, on recommande d'utiliser par défaut la méthode de l'écart-type. Le système de gestion devant être partiellement flexible afin de pourvoir aux besoins des hommes en eau, cette méthode n'est pas toujours préférée. Avec le temps, les recherches en écologie et la surveillance des résultats permettent de mettre en évidence les débits critiques et d'adapter les objectifs de gestion du cours d'eau.

3. En utilisant les objectifs de l'étape numéro deux comme ligne de conduite, l'équipe de gestion met en place des règles de gestion qui permettront d'atteindre les objectifs sur plusieurs années. Il n'est pas possible d'envisager une gestion qui puisse, en continu et instantanément, satisfaire indépendamment toutes les exigences de tous les paramètres pour chaque année. L'équipe de gestion doit alors mettre en place un «système de gestion» qui permette d'atteindre les objectifs RVA. En fonction des objectifs sélectionnés, le système de gestion peut être élaboré de manière à les atteindre chaque année ou sur plusieurs années.
4. Lorsque le système de gestion est mis en place, commencent la surveillance et les recherches en écologie. Celles-ci permettent d'estimer les effets du nouveau régime d'écoulement. En effet, les objectifs RVA sont supposés atteindre des objectifs écologiques et ne sont pas une fin en soi. Il est donc nécessaire d'avoir, dans le plan de gestion, un énoncé des objectifs écologiques afin d'évaluer s'ils sont atteints ou non. Les résultats de ces investigations permettent d'actualiser et de perfectionner le système de gestion déjà mis en place.
5. A la fin de chaque année, la variation du régime d'écoulement est caractérisée en utilisant tous les paramètres hydrologiques RVA. La valeur de ces paramètres est comparée à celle que l'on souhaite obtenir.
6. Les étapes deux et cinq sont ensuite répétées en incorporant les résultats des années antérieures et toutes les nouvelles données écologiques disponibles ainsi que les informations de surveillance. Ces données permettent de réviser soit le système de gestion soit les objectifs de la méthode RVA. (Richter et al., 1997)

General Group	Regime Characteristics	Streamflow Parameters Used in the RVA	Examples of Ecosystem Influences
1. Magnitude of Monthly Discharge Conditions	Magnitude Timing	1. Mean discharge for each calendar month	<ul style="list-style-type: none"> * Habitat availability for aquatic organisms * Soil moisture availability for plants * Availability of water for terrestrial animals * Availability of food/cover for fur-bearing mammals * Reliability of water supplies for terrestrial animals * Access by predators to nesting sites * Influences water temperature, oxygen levels, photosynthesis in water column
2. Magnitude and Duration of Annual Extreme Discharge Conditions	Magnitude Duration	1. Annual maxima 1-day means 2. Annual minima 1-day means 3. Annual minima 3-day means 4. Annual maxima 3-day means 5. Annual minima 7-day means 6. Annual maxima 7-day means 7. Annual minima 30-day means 8. Annual maxima 30-day means 9. Annual minima 90-day means 10. Annual maxima 90-day means 11. Number of zero-flow days 12. 7-day minimum flow divided by mean flow for year	<ul style="list-style-type: none"> * Balance of competitive, ruderal, and stress-tolerant organisms * Creation of sites for plant colonization * Structuring of aquatic ecosystems by abiotic vs. biotic factors * Structuring of river channel morphology and physical habitat conditions * Soil moisture stress in plants * Dehydration in animals * Anaerobic stress in plants * Volume of nutrient exchanges between rivers and floodplains * Duration of stressful conditions such as low oxygen and concentrated chemicals in aquatic environments * Distribution of plant communities in lakes, ponds, floodplains * Duration of high flows for waste disposal, aeration of spawning beds in channel sediments
3. Timing of Annual Extreme Discharge Conditions	Timing	1. Julian date of each annual one-day maximum discharge 2. Julian date of each annual one-day minimum discharge	<ul style="list-style-type: none"> * Compatibility with life cycles of organisms * Predictability/avoidability of stress for organisms * Access to special habitats during reproduction or to avoid predation * Spawning cues for migratory fish * Evolution of life history strategies, behavioral mechanisms
4. Frequency and Duration of High/Low Flow Pulses	Magnitude Frequency Duration	1. number of high pulses each year 2. number of low pulses each year 3. mean duration of high pulses within each year 4. mean duration of low pulses within each year	<ul style="list-style-type: none"> * Frequency and magnitude of soil moisture stress for plants * Frequency and duration of anaerobic stress for plants * Availability of floodplain habitats for aquatic organisms * Nutrient and organic matter exchanges between river and floodplain * Soil mineral availability * Access for waterbirds to feeding, resting, reproduction sites * Influences bedload transport, channel sediment textures, and duration of substrate disturbance (high pulses)
5. Rate/Frequency of Hydrograph Changes	Frequency Rate of change	1. means of all positive differences between consecutive daily values 2. means of all negative differences between consecutive daily values 3. number of flow reversals	<ul style="list-style-type: none"> * Drought stress on plants (falling levels) * Entrapment of organisms on islands, floodplains (rising levels) * Desiccation stress on low-mobility streamedge (varial zone) organisms

FIG. 2.1: Résumé des paramètres hydrologiques utilisés dans la méthode RVA et de leurs caractéristiques (Richter et al., 1998)

2.3.4 Limites de la méthode

- Le premier problème de la méthode RVA est le manque de fondements écologiques. En l'absence d'informations supplémentaires, une analyse purement statistique ne permet pas de valider la pertinence des indicateurs choisis. Ensuite, la sélection de séries hydrologiques retenues comme références doit être réalisée minutieusement : la prise en compte partielle d'un cycle hydrologique peut biaiser l'analyse et mener à des objectifs mal adaptés.
- La multitude d'indicateurs engendre un certain nombre de problèmes. Tout d'abord, l'analyse de ces paramètres ne peut se réaliser de manière indépendante, ce qui rend le problème complexe. D'autre part, les informations données par les indicateurs sont souvent insuffisantes pour proposer des alternatives de gestion. Enfin, il est délicat de différencier pour chaque indicateur l'impact écologique observé.
- La méthode RVA est réservée pour les cours d'eau pour lesquelles on désire une restauration partielle du régime naturel. Cela peut impliquer une restriction des usages en eau pour d'autres activités.
- La méthode RVA ne prend pas en compte des paramètres de qualité de l'habitat tels les paramètres physiques et chimiques. Il est donc préférable de compléter l'analyse hydrologiques avec d'autres modèles.(Rebillard, 2006)

2.4 La méthode des micro-habitats EVHA

2.4.1 Introduction

La méthode IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology*) a été mise au point dans les années septante, au sein de l'*U.S. Fish and Wildlife Service*, en vue de calculer les débits réservés dans les cours d'eau. Elle se base sur une approche de type micro-habitat. C'est une méthode qui inclut un modèle «habitat» explicite. Cette méthode quantifie les impacts écologiques dus à un changement de régime hydrologique en calculant des indices représentatifs de la surface d'habitat disponible par espèce, en fonction du débit. (Rebillard, 2006)

La méthode IFIM a été élaborée initialement pour les cours d'eau aux Etats-Unis. Elle a ensuite été adaptée pour la France par le Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative du Cemagref de Lyon qui a développé le logiciel EVHA. Les informations présentes dans cette section sont essentiellement relatives à l'adaptation française de la méthode, dont le choix semble plus judicieux étant donné le contexte belge de l'étude. On a en effet supposé que les caractéristiques des cours d'eau belges auront plus de similitudes avec les cours d'eau français qu'américains.

2.4.2 Principe de la méthode

La méthode des micro-habitats nécessite de déterminer les composants de la structure physique de l'habitat. Pour ce faire, on utilise trois paramètres morphodynamiques³ représentatifs de l'habitat. Il s'agit du débit, de la nature du substrat et de la hauteur d'eau dans le cours d'eau. D'autres paramètres peuvent également être pris en compte tels la température de l'eau, la concentration d'oxygène dissout, la présence de caches, ...

Le cours d'eau étudié doit être divisé en unités homogènes d'habitat. On identifie donc tour à tour des sous-tronçons, des faciès et des transects (voir figures 2.2 et 2.3). Le découpage en sous-tronçons est fonction de l'évolution du profil en long, de la présence de disparités amont-aval ou de la présence d'apports intermédiaires. Les faciès d'écoulement sont des portions de cours d'eau avec une certaine uniformité structurelle et fonctionnelle générale sur le plan des vitesses, des hauteurs d'eau, de la granulométrie du substrat, de la pente du lit et de la ligne d'eau et des profils en travers. La notion de transect se rapporte à un aspect biologique. Il s'agit d'établir un nouveau transect lorsqu'un changement intervient dans la physionomie rendue par les trois variables d'habitat.

La méthode des micro-habitats se base sur une espèce de référence pour laquelle sont fixés des objectifs écologiques. Il est important que le choix soit aussi représentatif que possible de tous les types de mésohabitats du cours d'eau afin de ne pas privilégier certaines espèces et d'en négliger d'autres. (Rebillard, 2006) Des courbes de *preferenda* ou courbes de préférence d'habitat sont réalisées pour l'espèce étudiée. Ces courbes sont établies sur base d'expériences, d'informations disponibles dans la littérature et d'avis d'experts. Elles permettent de prédire la répartition théorique des poissons en fonction des variables physiques. Elles sont réalisées pour un stade de développement donné et pour les différents paramètres caractérisant l'habitat. Elles attribuent un indice entre 0 et 1 en fonction du paramètre morphodynamique. Ces indices prennent en compte l'exigence du poisson par rapport à ces paramètres. (Sabaton et Miquel, 1993)

³Etude des rapports entre les forces, les mouvements et les formes.
<http://dictionnaire.reverso.net/francais-definitions/morphodynamique> le 23 février 2009

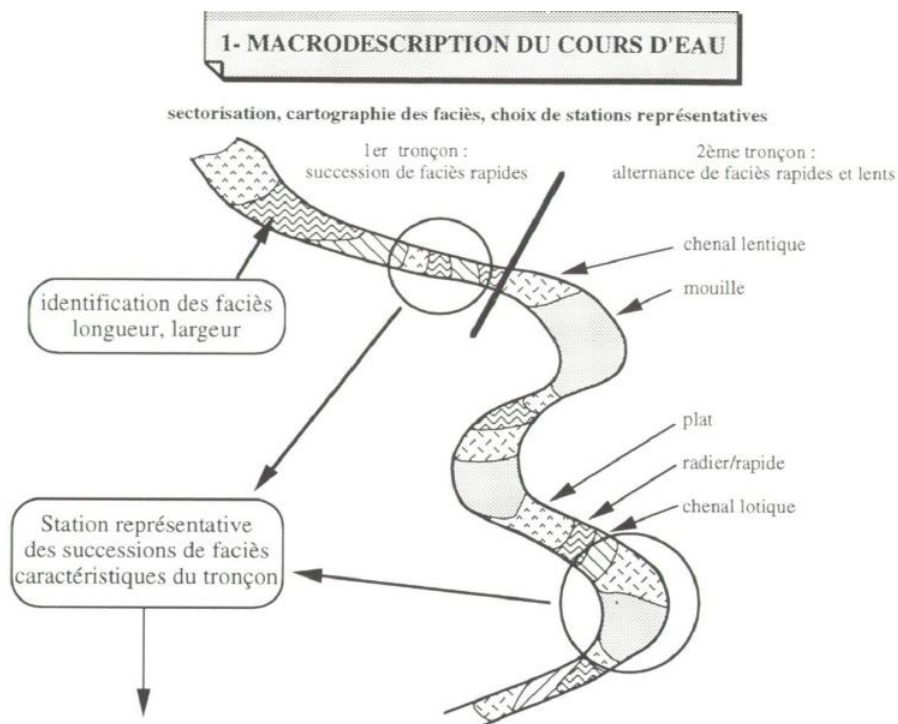


FIG. 2.2: Macrodescription du cours d'eau (Pouilly et al., 1995)

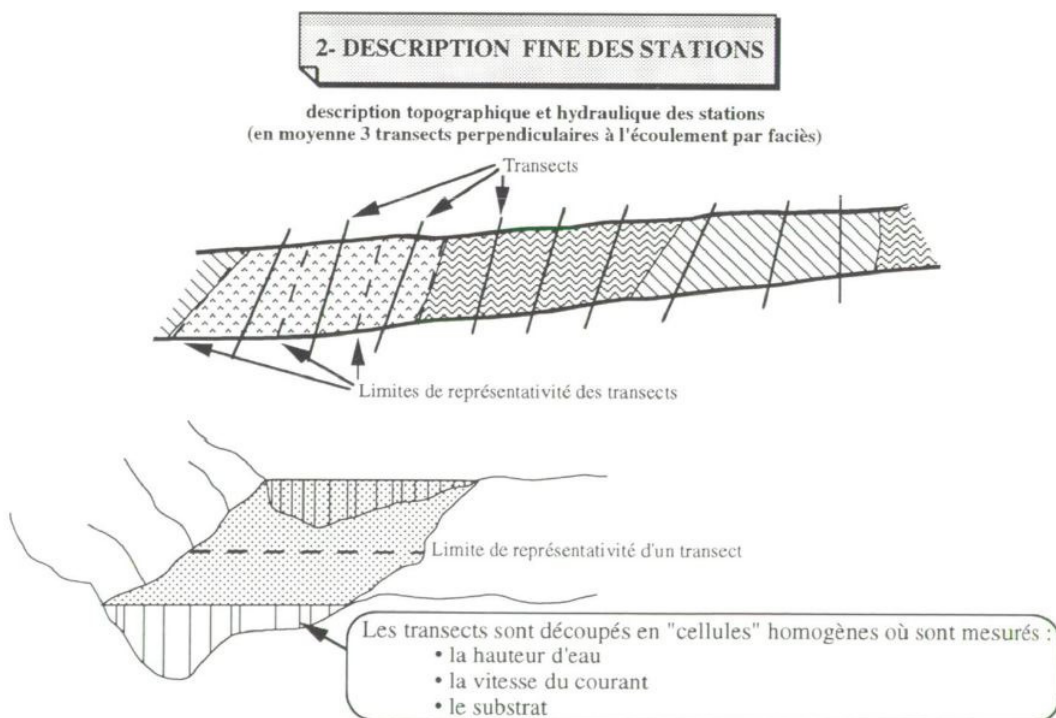


FIG. 2.3: Description fine des stations (Pouilly et al., 1995)

Deux types de modèles sont utilisés dans la méthode des micro-habitats. Il s'agit de modèles biologiques et hydrauliques.

Le modèle biologique se base sur les courbes de preferenda de l'espèce de poissons étudiée comme présenté ci-dessus.

Les modèles hydrauliques sont de trois types. On peut, dans le cadre d'une étude sur la détermination d'un débit minimum, réaliser une modélisation hydraulique complète. Il s'agit dans ce cas de réaliser la modélisation sur l'ensemble du tronçon. Ce type de modélisation est rarement employée. Elle demande des conditions strictes en ce qui concerne la pente du radier ainsi que la granulométrie du substrat. Une autre solution est de réaliser des mesures de hauteur d'eau et de vitesse du courant en quelques secteurs représentatifs et d'éventuellement avoir recours à une modélisation hydraulique simplifiée. Cette méthode nécessite de pouvoir explorer une gamme de débit. Cela peut être réalisé, par exemple, en aval d'ouvrages hydroélectriques. Une troisième possibilité consiste à réaliser des mesures et une modélisation hydraulique classique en quelques secteurs représentatifs. Cette méthode est généralement retenue car elle permet de réduire considérablement les mesures à effectuer sur le terrain. En effet, elle ne nécessite qu'une seule campagne de mesure. Le modèle est alors calé à partir de ces données. (Sabaton et Miquel, 1993) Le logiciel EVHA utilise un modèle monodimensionnel de type fluvial. Il fournit donc la cote de la ligne d'eau et cette cote est calculée en remontant de l'aval vers l'amont. En effet, pour des écoulements de type fluvial la cote en amont est non seulement fonction de l'altitude mais également de la hauteur d'eau en aval.

Le couplage entre le modèle biologique et le modèle hydraulique se réalise en multipliant la surface de chaque cellule par un indice global. On calcule la Surface Pondérée Utile (SPU). Une cellule est une surface élémentaire délimitée par deux points de mesure consécutifs, étendue aux limites amont et aval du transect considéré. (Ginot et al., 1998) L'indice global est obtenu soit en multipliant les indices soit en effectuant leur moyenne géométrique ou encore en optant pour le minimum des indices. Il est ensuite possible d'étendre ce calcul au transect, au faciès et enfin à l'ensemble de la station, en sommant les SPU des différentes cellules.

Pour obtenir une grandeur qui permette de réaliser des comparaisons, on peut ramener les SPU à 100 mètres du linéaire du cours d'eau. Si l'on veut comparer des sites de largeurs différentes, alors on peut ramener les SPU à l'unité de surface. La capacité d'accueil s'exprime dans ce cas en valeur d'habitat (VH) égale au pourcentage de SPU par rapport à la surface mouillée. (Pouilly et al., 1995)

À partir des mesures morphodynamiques et/ou de modélisations hydrauliques, il est possible d'estimer des notes de qualité d'habitat des faciès et, par extension, du tronçon. On peut dès lors, par l'analyse de l'ensemble des résultats et en fonction des objectifs retenus, proposer un débit réservé. (Sabaton et Miquel, 1993)

2.4.3 Principales étapes de mise en œuvre

Nous traçons ici les grandes lignes de la mise en œuvre de la méthode des micro-habitats. Ces informations sont extraites du Guide Méthodologique du logiciel EVHA (version 2.0) mis à disposition par le Cemagref.

Sectorisation et identification des faciès d'écoulement. Il s'agit de découper le tronçon étudié en un ensemble de faciès d'écoulement. Les faciès d'écoulement, également appelés unités morphodynamiques, sont des portions de cours d'eau ayant une certaine uniformité structurelle et fonctionnelle générale sur le plan des vitesses, des hauteurs d'eau, de la granulométrie du substrat, de la pente du lit, de la ligne d'eau et des profils en travers. Leur longueur peut varier d'une à quelques largeurs du lit mouillé. La diversité longitudinale des formes et de leur structure physique est mise à profit par la flore et la faune aquatique qui y rencontrent les différents habitats nécessaires à l'accomplissement de leurs cycles vitaux. Les hydrogéomorphologues considèrent les faciès, et notamment les alternances de radiers et de moulles, comme les unités fondamentales des rivières. (Malavoi et Souchon, 2002) L'identification des faciès d'écoulement est primordiale pour guider le choix des stations de mesures, donner une limite spatiale à l'étude. Elle permet également l'extrapolation des résultats à tout le linéaire du cours d'eau.

Choix des stations d'étude. L'idéal, lors du choix des stations d'étude, est de travailler sur une succession de faciès regroupés en une seule station d'étude. En effet, les faciès d'écoulement s'enchaînent selon les séquences répétitives caractéristiques du tronçon dans lequel ils se trouvent et une modélisation précise s'intéresse à la succession des sections hydrauliques prises comme un ensemble (écoulement de type fluvial).

Date de la campagne de mesure. Il est important de fixer la période de mesure lorsque le débit est proche du débit d'étiage. En effet, les débits faibles permettent une prédiction hydraulique fiable et précise. Le modèle de réponse biologique (courbes de preferenda) n'est en effet pas adapté aux forts débits.

Positionnement des sections hydrauliques et notion de transect. Le positionnement longitudinal des sections hydrauliques est réalisé sous l'hypothèse que le modèle hydraulique ne connaît la réalité qu'à travers les sections fournies. Il relie ensuite linéairement les sections. Les sections hydrauliques se positionnent dans des zones où il y a rupture de pente ou modification du profil du transect.

La notion de transect se rapporte à un aspect biologique. Il s'agit d'établir un nouveau transect lorsque la physionomie rendue par les trois variables d'habitat change. On réalise en général trois transects par faciès, un en tête, un au centre et un dernier en queue.

Relevés hydrauliques et relevés topographiques. Les relevés hydrauliques ne concernent que les transects et sont réalisés dans le lit mouillé. Il s'agit d'identifier le substrat, de mesurer la hauteur d'eau ainsi que la vitesse du courant.

2.4.4 Limites de la méthode

La méthode des micro-habitats présente diverses limitations.

- Elle ne prend pas en compte les phénomènes de crues sur la dynamique des populations de poissons et de la végétation rivulaire. En effet, elle n'étudie que les faibles débits (débits d'étiage).
- Le modèle biologique basé sur les courbes de preferenda est fortement critiqué. (Tharme, 2003) D'une part, pour le choix des indicateurs de qualité d'habitat (vitesse, hauteur d'eau, substrat) d'autre part pour l'utilisation monovariée de ces paramètres qui interviennent de manière combinée dans la sélection de l'habitat du poisson. Il semble important d'intégrer d'autres paramètres tels la température, la présence d'abris pour les poissons, ... et d'envisager une analyse multivariée.
- Les courbes de preferenda posent également un problème de transposition et de validation malaisée d'un cours d'eau à l'autre.
- Les résultats de la méthode reflètent une situation potentielle qui correspondrait à un peuplement monospécifique et non influencé par d'autres paramètres limitants biotiques (prédation, compétition, ressources trophiques) ou abiotiques (température, physico-chimie). (Pouilly et al., 1995)
- La méthode ne prend pas en compte la variabilité spatiale de l'habitat. (Ginot et al., 1998)
- La quantité de données à collecter pour appliquer la méthode est considérable.
- La méthode est difficilement utilisable dans le cas de forts changements géomorphologiques étant donné qu'elle ne permet pas de simuler l'évolution du lit du cours d'eau.
- La méthode n'intègre pas de modélisation des sources de nourriture en fonction du débit.
- Le choix du tronçon influe sur les résultats. Ce choix est fonction de l'opérateur.
- Les données sur l'habitat total disponible occultent l'importance de la qualité de l'habitat. En effet, le résultat est le même, que l'on prenne un grand nombre d'habitats de qualité médiocre ou un nombre restreints d'habitats de bonne qualité.
- L'analyse des résultats peut poser problème lorsqu'on se base sur plusieurs espèces de poissons dont les besoins peuvent être différents voir antagonistes. (Rebillard, 2006)

2.5 La méthode hydraulique du périmètre mouillé

2.5.1 Introduction

Les méthodes hydrauliques permettent la détermination de débits réservés dans les cours d'eau en tenant compte de leur morphologie. Le principe consiste soit à préserver une partie du lit mouillé, soit à aménager une hauteur minimale dans le lit du cours d'eau. (Souchon et al., 1998) La technique de détermination du débit réservé la plus utilisée actuellement parmi les méthodes hydrauliques est celle dite du périmètre mouillé (*Wetted Perimeter Method* - WPM). Dans cette méthode, on suppose que l'intégrité de la rivière est directement liée à la longueur du périmètre mouillé, surtout dans les *riffles*⁴ et autres zones critiques au niveau du biotope. (Tharme, 2003) La méthode du périmètre mouillé est exposée dans la suite de cette section.

2.5.2 Principe de la méthode

La méthode du périmètre mouillé est basée sur l'hypothèse qu'il existe une relation directe entre le périmètre mouillé dans un *riffle* et l'habitat des poissons dans un cours d'eau. La méthode a pour objectif de maintenir un débit suffisant dans le cours d'eau afin que les conditions soient adéquates pour préserver les communautés de poissons.

La première étape de cette méthode est d'évaluer la relation entre le périmètre mouillé et le débit. Cela peut se réaliser par des mesures dans le cours d'eau ou par des modélisations. A partir de ces informations, on réalise des graphiques du périmètre mouillé en fonction du débit. Ces courbes présentent une évolution caractéristique. Elles ont une pente relativement importante lorsque le débit augmente à partir de sa valeur minimale, ensuite, la pente devient plus faible. Le point de coupure de pente est utilisé pour déterminer le débit réservé minimum. (Armstrong et al., 2004) En dessous de cette valeur, on observe une dégradation de l'habitat spécifique des poissons (voir figure 2.4).

⁴Zone peu profonde d'un cours d'eau où la vitesse du courant est rapide et où l'eau est agitée par la présence de pierres. Site internet : http://www.duluthstreams.org/understanding/riffle_run_pool.htm (29 juillet 2009)

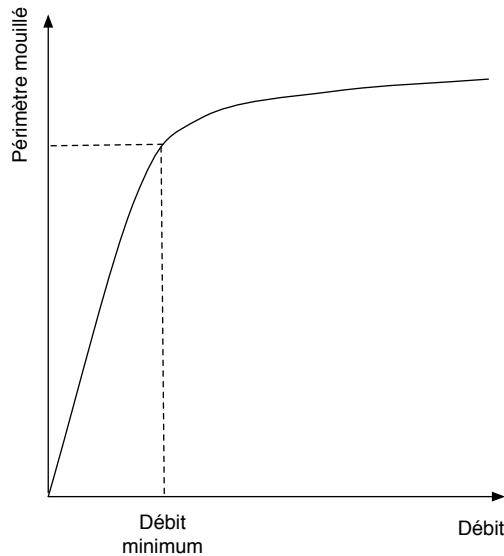


FIG. 2.4: Détermination du débit minimum au moyen de la méthode du périmètre mouillé

Cette méthode de détermination du point de rupture est assez critiquée dans la littérature. (Gippel et Stewardson, 1998) En effet, le fait que ce point soit choisi de manière relativement subjective enlève de la crédibilité à la méthode. D'autres approches sont proposées, par exemple, l'utilisation de modèles mathématiques, soit pour déterminer le point de courbure maximale, soit pour sélectionner le point de la courbe où la pente est égale à une valeur choisie. La seconde possibilité présente une certaine subjectivité étant donné que ce sont les chercheurs ou les gestionnaires qui choisissent la valeur de la pente. Cette subjectivité est un aspect négatif de la méthode mais il est partiellement compensé par l'avantage de permettre la considération des objectifs de gestion. (Mann, 2006)

Les *riffles* et les bas fond sont des lieux importants pour la migration et la reproduction des poissons. De plus, ce sont les premières zones affectées lorsqu'il y a une diminution des débits dans la rivière. C'est pourquoi ces zones sont choisies pour appliquer la méthode des périmètres mouillés. (Kozlowski, 1988) La zone où sont réalisées les mesures est d'une grande importance pour la fiabilité des résultats. La tendance générale des graphiques peut en effet être affectée par un mauvais choix de section du cours d'eau. Les zones les plus adéquates sont les *riffles* ayant un transect rectangulaire ou trapézoïdal et qui présentent une brisure de l'angle entre le lit et la berge de la rivière. (Armstrong et al., 2004)

2.5.3 Principales étapes de mise en œuvre

Lors de la réalisation de cette synthèse bibliographique, aucune information sur la mise en œuvre concrète de la méthode du périmètre mouillé n'a été trouvée dans la littérature. Nous avons donc dû élaborer notre propre méthodologie. Celle-ci sera présentée à la sous-section 3.3.1, page 58 du chapitre consacré à la mise en œuvre des méthodes.

2.5.4 Limites de la méthode

- La méthode ne prend pas en compte la profondeur du cours d'eau. Or, si la hauteur d'eau n'est pas suffisante, le poisson ne peut pas utiliser le tronçon comme lieu de fraie, de nourrissage et de passage.
- La méthode est entachée de subjectivité, particulièrement lorsque l'on doit réaliser la détermination du point de coupure. Celui-ci étant, de plus, fonction de la section choisie. (Kozlowski, 1988)

2.6 Récapitulatif des différentes méthodes

Le tableau 2.1 est un récapitulatif des données principales à avoir ou à acquérir pour mettre en œuvre une méthode de détermination du débit réservé. Pour chacune des méthodes, l'aspect le plus limitant, pour une application spécifique au Crupet, est stipulé. La dernière ligne indique si les données sont disponibles ou non dans le cas du Crupet.

Certaines méthodes nécessitent des séries hydrologiques du cours d'eau naturel (colonne «avant» du tableau 2.1) et les débits du régime modifié (colonne «après»). Ces modifications du régime d'écoulement du cours d'eau peuvent avoir diverses origines telles la présence d'un captage, l'aménagement d'une retenue d'eau, le détournement dans un bief à des fins hydroélectriques, ... Deux cas de figures peuvent se présenter à nous lorsqu'on recherche des séries hydrologiques.

1. Les mesures de débits existent. En Belgique, les réseaux de mesure Aqualim et Sethy permettent de connaître les hauteurs d'eau et les débits d'un grand nombre de cours d'eau. Les réseaux Aqualim compte actuellement 115 stations limnimétriques qui enregistrent des hauteurs d'eau à un pas de temps horaire. Les captages, tels Vivaqua, possèdent également, pour la plupart de leurs sites, des données de débits prélevés.
2. Les mesures de débits ne sont pas disponibles. Dans ce cas, il est possible de se procurer les séries hydrologiques de deux manières différentes :
 - On réalise une modélisation. Dans le cas du Crupet, la modélisation n'est pas envisageable étant donné la difficulté de modéliser le comportement de l'eau sur les bassins versants de milieux karstiques.

- On utilise la méthode de régionalisation. Cette méthode recherche des relations entre le débit et la taille du bassin versant pour ensuite déterminer des zones homogènes en terme de débit caractéristique. Grâce à cette méthode, on espère pouvoir utiliser, lorsque les données de débits ne sont pas disponibles pour un cours d'eau, les données d'un autre cours d'eau ayant les même caractéristiques en termes de superficie et forme du bassin versant, précipitation annuelle, pente, géologie, pédologie, occupation du sol et drainage du bassin versant.

Dans le cas du Crupet, étant donné l'absence de données de débits, c'est l'approche par régionalisation qui sera adoptée. Bien que cette méthode n'est pas encore totalement validée, elle constitue une piste intéressante afin d'obtenir les débits du Crupet à partir des données du Bocq. Avant toute chose, il faut vérifier que les bilans en eau des bassins versants du Crupet et du Bocq soient sensiblement les mêmes. Ceci a été réalisé par modélisation au service d'Hydrologie et d'Hydraulique Agricole de la FUSAGx. Le modèle utilisé est le modèle EPICgrid. C'est un modèle capacitif ⁵ qui utilise des mailles de 1km² pour décrire la région étudiée. A l'intérieur de chacune des cellules, on identifie une réponse hydrologique à partir de quatre informations de départ : la description du sol, la pente, l'utilisation du sol (ce qui inclut les cultures et les opérations culturales) et les données météorologiques. Pour chaque intervalle de temps de la simulation, le modèle prend en compte l'association de ces quatre données. Les sorties de chaque cellule (ruissellement direct, évaporation, percolation, écoulement hypodermique, etc.) sont les sommes pondérées des résultats issus des associations des paramètres de la cellule. La modélisation EPICgrid a permis, dans notre cas, d'obtenir le flux d'eau à l'exutoire du bassin versant. (Sohier et al., 2009)

⁵Modèle dans lequel le sol est représenté comme un ensemble de réservoirs interconnectés

TAB. 2.1: Tableau récapitulatif des méthode de détermination d'un débit réservé

Méthode	Principe	Données biologiques	Séries hydrologiques		Débit réservé		Données hydrauliques				Sectorisation		Avis d'experts	Limitations
			avant	après	mensuel	unique	hauteur d'eau	vitesses	périmètre mouillé	substrat	trons homogènes	zones sensibles		
BBM	Cette méthode permet de mettre en place un débit réservé en se basant sur des avis d'experts.	oui	oui	oui	oui		oui	oui	oui		oui		oui	Nécessite la mobilisation d'un grand nombre d'experts. De plus, la méthode, élaborée en Afrique du Sud, n'est probablement pas transposable.
RVA	Cette méthode permet d'élaborer un débit réservé en se basant sur le régime d'écoulement naturel du cours d'eau. Il utilise des paramètres de statistique descriptive (IHA).		oui	oui	oui									Nécessite un grand nombre de données hydrologiques.
EVHA	Cette méthode permet d'élaborer un débit réservé en se basant sur des courbes de préférence de poissons.	oui				oui	oui	oui		oui	oui		oui ⁶	Courbes de préférence non validées en Belgique.
WPM	Cette méthode permet d'élaborer un débit réservé dans un cours d'eau en fonction du périmètre mouillé.					oui	oui	oui	oui			oui		Méthode subjective. Ne prend pas en compte le régime naturel du cours d'eau.
Données disponibles		Non disponibles	Débits journaliers pompés (14 ans)				<ul style="list-style-type: none"> - Non disponibles - Mesures de terrains facilement réalisables 				Sectorisation Qualphy disponible		Non disponibles	

⁶Un avis d'expert est requis dans le cas où les courbes de préférence des poissons n'existent pas ou doivent être validées pour le cours d'eau étudié

Pour ce qui est de la sectorisation, une méthode de découpage en tronçons puis en segments homogènes (paramètres abiotiques puis anthropiques) est proposée par le modèle Qualphy. Celui-ci est utilisé en vue de réaliser une évaluation globale de la qualité hydromorphologique des masses d'eau. (Guyon et al., 2005) Dans le modèle Qualphy, les cours d'eau sont découpés en tronçons et ensuite en segments. Le premier découpage se fait selon des critères géomorphologiques du cours d'eau et de sa vallée. Le second découpage se fait sur base de critères anthropiques. Il prend en compte la présence de facteurs de perturbations sur les berges, dans le lit majeur et le lit mineur. La sectorisation se fait sur base de données cartographiques et bibliographiques existantes et est ensuite validée et complétée sur le terrain. (Van Brussel, 2005) Cette sectorisation est réalisée à une échelle assez petite, et n'est donc pas utilisable pour la méthode EVHA qui nécessite une subdivision du linéaire en faciès.

Il peut être intéressant d'approcher l'étude des débits réservés sous un angle différent, celui des coûts. Ceux-ci sont présentés dans le tableau 2.2, il s'agit des coûts de main d'oeuvre estimés pour des cours d'eau dont les dimensions sont telles qu'il est possible de réaliser les mesures dans le cours d'eau et de le sectoriser à pied. Dans ce cas, il apparait que la méthode la moins onéreuse est la méthode du périmètre mouillé. En effet, la mise en oeuvre est courte et demande un effectif limité : deux techniciens durant deux jours pour la prise des mesures et un ingénieur durant deux jours maximum pour l'analyse des données. La méthode la plus coûteuse est la méthode BBM. La participation de onze experts ainsi que la supervision des différentes étapes de la méthode par un ingénieur durant toute l'année rend cette méthode particulièrement onéreuse. Les méthodes intermédiaires sont la méthode EVHA et la méthode RVA. La méthode EVHA est d'autant moins coûteuse si les courbes de preferenda existent. Dans ce cas, le coût ne fait plus intervenir d'expert. Si l'on estime la durée de leur travail à trois jours, le coût diminue d'environ 2400 euros. Notons que, ce qui est coûteux dans la méthode RVA, est le suivi en continu du cours d'eau. On estime son coût à 23450 euros.

TAB. 2.2: Estimation des coûts des méthodes de détermination d'un débit réservé

Méthode	Coûts (euros)
BBM	69 550
EVHA	5 000
RVA	26 650
WPM	1 000

2.7 Conclusion

A l'heure actuelle, il n'existe aucune méthode «type» pour élaborer le débit minimum requis dans un cours d'eau. La littérature fournit un grand nombre d'informations à ce sujet. Selon Tharme R.E. (2003) on dénombre environ 207 méthodes, dans 44 pays. L'objectif de ce chapitre n'était pas d'exposer toutes les méthodes existantes mais de présenter celles qui sont les plus abouties et/ou les plus employées.

Les méthodes holistiques et des micro-habitats permettent de déterminer des débits réservés tout en tenant compte de l'aspect écologique du cours d'eau. Bien que moins objective, car basée sur des avis d'experts, la BBM présente l'avantage de proposer un débit pour chaque mois de l'année. Elle est aussi moins sélective que la méthode EVHA car elle prend en compte l'écosystème dans son ensemble et ne se base pas sur des espèces cibles. Elle permet également de tenir compte de toute la variabilité hydrologique du cours d'eau contrairement à la méthode des micro-habitats.

La méthode RVA présente elle aussi l'avantage de déterminer des débits réservés mensuels. Dans la mesure où l'on se base sur les débits naturels du cours d'eau, les paramètres étudiés incluent l'aspect écologique, mais celui-ci n'est pas explicite. Le manque de fondements écologiques est la plus grande lacune de cette méthode. Il pourrait être intéressant de combiner les méthodes RVA et BBM. Cela permettrait de disposer d'une base statistique (RVA) et d'améliorer la prise en compte des aspects écologiques lors de la détermination du débit réservé en se basant sur la méthode BBM.

La méthode du périmètre mouillé n'est pas très aboutie. En effet, la relation entre le périmètre mouillé et la qualité de l'habitat des poissons n'est pas explicite. Malgré tout, elle est très utilisée du fait de la simplicité de sa mise en oeuvre. En comparant le débit réservé ainsi obtenu à ceux des autres méthodes, il est possible d'évaluer dans quelle mesure il est pertinent de s'engager dans des techniques complexes et donc plus longues à mettre en oeuvre.

Quelle que soit la méthode choisie, la non prise en compte de paramètres sur la qualité de l'eau (teneur en oxygène dissout, ...) est une lacune dans la détermination des débits réservés.

Le coût inhérent à la méthode BBM et la difficulté de trouver et de mobiliser les spécialistes qu'elle nécessite nous ont conduit à renoncer à la mettre en oeuvre. Ce sont donc les méthodes RVA, EVHA et du périmètre mouillé qui seront appliquées et comparées dans le cadre de ce travail.

Chapitre 3

Mise en oeuvre des méthodes et résultats

3.1 Méthode du *Range of Variability Approach*

Dans cette section nous présentons la mise en oeuvre de la méthode du *Range of Variability Approach* (RVA). La première étape, qui s'est avérée fort complexe, est l'acquisition des données ainsi que leur traitement. Celui-ci permet de déterminer, d'une part le débit naturel du Crupet et d'autre part son débit réel, après pompage. Ensuite, dans une deuxième étape, un calcul d'erreur permet de calculer l'impact des approximations qu'aura nécessité le traitement des données. La troisième étape consiste à diagnostiquer l'état du cours d'eau, son taux d'altération, en utilisant le logiciel d'*Indicators of Hydrologic Alteration*. Ce logiciel permet de réaliser l'étude statique des données de débits et de produire les paramètres IHA. Enfin, dans une dernière étape, nous avons déterminé un débit réservé qui minimise le taux d'altération pour les paramètres IHA les plus touchés par la modification du régime hydrologique du cours d'eau ¹.

3.1.1 Acquisition des données et traitement

Pour mettre en oeuvre la méthode RVA, il faut idéalement posséder une série de vingt ans de données de débits avant et après modification du régime d'écoulement du cours d'eau. Dans le cas concret du Crupet, nous n'avons à notre disposition aucune information sur les débits. Aucune station de mesure n'est installée sur son cours. Cependant, la société Vivaqua, qui réalise des pompages en amont du Crupet, a mis à notre disposition les données des

¹L'ensemble des programmes réalisés au moyen du logiciel de traitement statistique «R» relatifs aux calculs effectués dans cette section sont disponibles à l'annexe A.1, page i.

prélèvements journaliers à Crupet et Durnal, de 1994 à 2007. Ces deux stations se situent sur le bassin versant du Crupet. Etant donné qu'aucune mesure de débit n'est disponible pour le cours d'eau du Crupet, nous avons élargi notre périmètre d'investigation au bassin versant du Bocq. Une station limnimétrique gérée par Aqualim est située en aval de l'exutoire du Crupet, près d'Yvoir (voir figure 1.3, page 4). Nous avons ainsi pu obtenir des séries de débits du Bocq sur une période s'étendant de 1980 à 2008. Les débits obtenus sont des débits horaires dont nous avons déduit les débits journaliers moyens. Il s'agit cependant de débits modifiés. Il existe en effet, sur le bassin versant du Bocq, dix-sept stations de pompage gérées par Vivaqua (5), l'Association Intercommunale des Eaux du Condroz (6) et la Société Wallonne Des Eaux (6). Toutes sont situées en amont de la station limnimétrique. Pour quatre de ses cinq stations (Lienne, Crupet, Durnal et Spontin), Vivaqua a mis à notre disposition les débits moyens pompés mensuellement entre 1994 et 2007.

Par ailleurs, suite à une modélisation réalisée au service d'hydrologie agricole de la FUSAGx, il ressort que le bassin versant du Bocq et le bassin versant du Crupet ont des bilans en eau très semblables. Cette information permet donc, en première approche, de transposer les débits du Bocq au Crupet moyennant un facteur de correction correspondant au rapport des surfaces des bassins versant. L'équation utilisée pour calculer les débits à Crupet est la suivante :

$$Q_{Crupet} + q_{Crupet} = (Q_{Bocq} + q_{Bocq}) \cdot r \quad (3.1)$$

avec

Q_{Crupet} = le débit journalier modifié à Crupet [m^3/s]

q_{Crupet} = les prélèvements journaliers à Crupet et Durnal [m^3/s]

Q_{Bocq} = le débit journalier mesuré sur le Bocq [m^3/s]

q_{Bocq} = la somme des prélèvements mensuels aux diverses stations situées sur le Bocq [m^3/s]

$$r = \frac{S_{Crupet}}{S_{Bocq}}$$

S_{Crupet} = superficie du bassin versant du Crupet [ha]

S_{Bocq} = superficie du bassin versant du Bocq [ha]

Cette formule permet donc d'estimer les débits naturels journaliers du cours d'eau $Q_{Crupet} + q_{Crupet}$ ainsi que les débits modifiés journaliers Q_{Crupet} sur un même intervalle de temps. De la sorte, les effets du climat ne se font pas ressentir lors de l'étude statistique. Seule l'altération causée par la présence des sites de pompage est mise en évidence.

Lors du calcul des débits naturels journaliers du Crupet, on estime grossièrement les débits pompés sur le Bocq à partir de données mensuelles. Or, il est possible que l'eau prélevée à l'un des captages n'entre pas dans le bilan d'eau du bassin versant du Bocq. Il se pourrait aussi

que les prélèvements moyens journaliers diffèrent sensiblement de la moyenne mensuelle. C'est pourquoi nous effectuons un calcul d'erreur. Celui-ci permet d'établir quel est l'impact d'une variation de q_{Bocq} sur nos résultats. Nous partons de l'équation n° 3.1 qui peut se transformer ainsi :

$$Q_{Crupet} = ((Q_{Bocq} + q_{Bocq}) \cdot r) - q_{Crupet} \quad (3.2)$$

Le but final de nos calculs est de déterminer l'effet des prélèvements sur le débit du Crupet. La mesure dont nous voulons connaître la précision est donc le rapport α entre le débit réel du Crupet et son débit naturel.

$$\alpha = \frac{Q_{Crupet}}{Q_{Crupet} + q_{Crupet}} = 1 - \frac{q_{Crupet}}{(Q_{Bocq} + q_{Bocq}) \cdot r} \quad (3.3)$$

Nous avons calculé la valeur moyenne de α pour les années 1994 à 2007 et avons trouvé un rapport égal à 0,72. Cela signifie que, pour cette période, le débit réel du Crupet était égal, en moyenne, à 72% de son débit naturel.

Nous devons maintenant mesurer la variation de ce rapport α , suite à une erreur Δq_{Bocq} sur la mesure des débits prélevés dans le Bocq. Par dérivation, on obtient :

$$\frac{d\alpha}{dq_{Bocq}} = \frac{q_{Crupet} \cdot r}{(Q_{Bocq} + q_{Bocq})^2 \cdot r^2} = \frac{q_{Crupet}}{(Q_{Bocq} + q_{Bocq})^2 \cdot r} \quad (3.4)$$

La variation $\Delta\alpha$ est alors :

$$\Delta\alpha = \frac{d\alpha}{dq_{Bocq}} \cdot \Delta q_{Bocq} = \frac{q_{Crupet}}{(Q_{Bocq} + q_{Bocq})^2 \cdot r} \cdot \Delta q_{Bocq} \quad (3.5)$$

Nous avons calculé l'erreur $\Delta\alpha$ pour chaque jour de l'année et pour trois erreurs relatives $\frac{\Delta q_{Bocq}}{q_{Bocq}}$. Le tableau 3.1 nous donne les valeurs maximales et moyennes de $\Delta\alpha$.

TAB. 3.1: Valeurs de l'erreur $\Delta\alpha$ affectant le rapport des débits réels sur les débit naturels, en fonction de l'erreur relative sur les prélèvements

$\frac{\Delta q_{Bocq}}{q_{Bocq}}$	$\Delta\alpha_{max}$	$\Delta\alpha_{moyen}$
10%	0,03	0,01
20%	0,05	0,03
40%	0,1	0,06
60%	0,15	0,09

Ce tableau signifie, par exemple, qu'une erreur de 20% sur les niveaux de prélèvement du Bocq entraîne un erreur moyenne de 3% et une erreur maximale de 5% sur l'impact des

prélèvements effectués sur le Crupet (mesurés par le rapport α entre son débit réel et son débit naturel).

L'erreur obtenue lors de l'estimation des débits est relativement faible lorsque $\Delta q_{Bocq} = 20\% \cdot q_{Bocq}$. Bien entendu, cette erreur augmente lorsque Δq augmente.

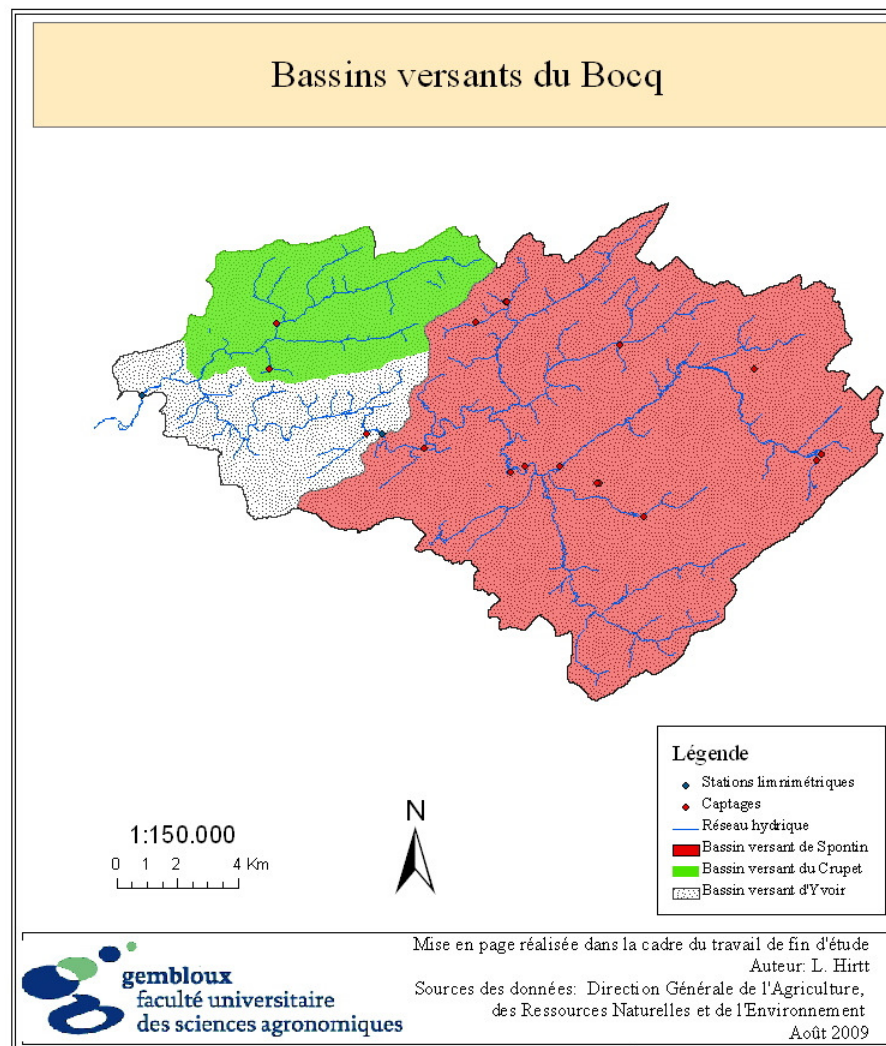


FIG. 3.1: Carte représentant les bassins versants du Bocq utilisés pour les calculs des débits modifiés du Crupet

La difficulté dans l'application de la formule 3.1 est de connaître le volume d'eau prélevé dans le bassin du Bocq. Afin de l'estimer, nous nous sommes basés sur les seules informations à notre disposition, soit les débits mensuels pompés aux stations de Vivaqua. Nous avons fait l'hypothèse que le débit total prélevé sur le Bocq est un multiple m du débit prélevé connu. Pour connaître la valeur de ce facteur multiplicatif, il faut se référer à d'autres mesures. L'avantage du bassin versant du Bocq est la présence de deux stations limnimétriques, l'une

à Yvoir, qui fonctionne depuis 1980, et l'autre à Spontin, un peu plus en amont, qui fonctionne depuis le six avril 2006. Entre ces deux stations se trouvent trois stations de pompage : Crupet, Durnal ainsi que celle du Ry d'Août (voir carte de la figure 3.1). Nous émettons l'hypothèse que les débits prélevés au Ry d'Août sont négligeables par rapport à la différence entre les débits mesurés aux stations limnimétriques d'Yvoir et de Spontin ². Il en découle que :

$$\Delta S = S_{Yvoir} - S_{Spontin} \quad (3.6)$$

$$\Delta Q = Q_{Yvoir} - Q_{Spontin} \quad (3.7)$$

$$\frac{Q_{Crupet}}{S_{Crupet}} = \frac{\Delta Q}{\Delta S} \Rightarrow Q_{Crupet} = \frac{\Delta Q \cdot S_{Crupet}}{\Delta S} \quad (3.8)$$

Grâce à l'équation 3.8, nous pouvons connaître le débit modifié dans le cours d'eau du Crupet, depuis l'installation de la station de Spontin jusqu'au 31 décembre 2007. C'est à partir de ces informations que nous allons ajuster la courbe du débit modifié calculé par la formule 3.1 à la courbe obtenue par l'équation 3.8. Ce travail a été réalisé au moyen du logiciel de traitement statistique «R». La structure du programme utilisé est la suivante :

Calcul des débits journaliers naturels dans le Bocq ($Q_{naturel}$)

1. Multiplicateur constant pour les débits supérieurs au seuil s

$$Q_{naturel} = Q_{Bocq} + m_0 \cdot q_{Bocq}$$

2. Multiplicateur variable en dessous du seuil pour parfaire l'ajustement des débits faibles mesurés sur le Bocq

Si $Q_{Bocq} \leq s$, alors

$$m_1 = m_0 + x \cdot (s - Q_{Bocq})$$

$$\text{Et } Q_{naturel} = Q_{Bocq} + m_1 \cdot q_{Bocq}$$

Avec

$$m_0 = 3,1$$

$$s = 1,51$$

$$x = 4,9$$

La formule d'ajustement a été déterminée de manière empirique. En dessous d'un certain seuil, le facteur multiplicatif croît linéairement avec le débit du Bocq, au dessus du seuil, ce facteur est constant. Plusieurs essais ont été réalisés afin d'ajuster au mieux les deux courbes. Dans un premier temps, nous avons réalisé l'ajustement en considérant toutes les données de débit. Dans ce cas, la valeur du R^2 est de 81 % et le *Root Mean Square Error*³ est de 0,091 m³/s soit 23,6 % de la moyenne des données de débit du Crupet. On remarque cependant qu'à partir du 15 août 2007 la qualité de l'ajustement diminue. Dans un deuxième

²Le débit moyen prélevé dans la galerie du Ry d'Août est de 3000 m³/jour soit 4% de la moyenne de la différence entre les débits des deux stations limnimétriques .

³Racine carrée de la moyenne des erreurs au carré.

temps, nous avons donc effectué un ajustement en négligeant les mesures ultérieures au 15 août 2007. Dans ce cas, le R^2 augmente et est égal à 87,23%. Dans ce cas, le RMSE est de $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela équivaut à environ 16% de la moyenne des données de débit du Crupet. Le graphique que nous avons obtenu en minimisant le RMSE est présenté à la figure 3.2. Dans la suite de ce travail, les données sont le résultat du second ajustement.

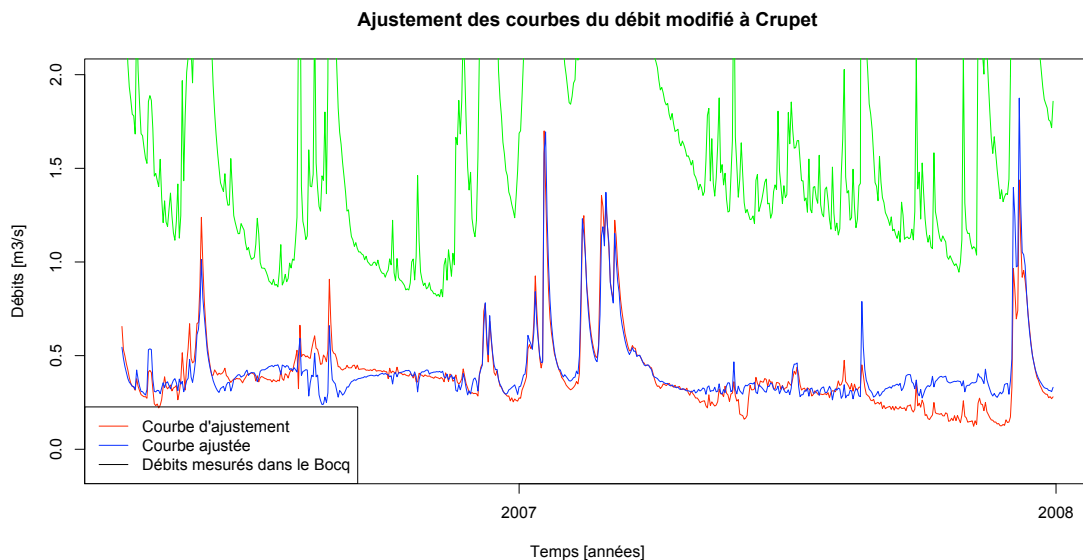


FIG. 3.2: Graphique présentant l'ajustement des courbes des débits modifiés du Crupet

Sur la figure 3.2, la courbe en rouge (équation 3.8) représente les données à partir desquelles la courbe bleu (équation 3.1) a été ajustée. La courbe verte représente les débits mesurés à Yvoir. Au vu de ce graphique, on constate que la courbe ajustée suit assez fidèlement les débits mesurés. Cependant, il est clair que l'ajustement n'est pas parfait. Il diffère essentiellement pour les petits débits du Bocq. Malgré tout, les données obtenues grâce à cette manipulation seront utilisées pour le traitement statistique. Nous verrons par ailleurs (voir page 45) dans quelles mesures une modification des débits prélevés altère les résultats obtenus lors de la détermination d'un débit réservé.

Il est entendu que les données des débits naturels et modifiés ne sont donc pas précises. Elles constituent une première approximation nécessaire à la réalisation de ce mémoire. L'approximation la plus importante est l'estimation des débits prélevés sur le bassin du Bocq. Il serait intéressant de préciser cette mesure à partir des débits réellement prélevés aux différentes stations. Mais, nous n'avons pu avoir accès à ces données. Il serait nécessaire, afin de préciser les données, d'évaluer dans quelle mesure les prélèvements des captages en amont de la station limnimitrique d'Yvoir influent sur les débits mesurés en ce point. Il serait également nécessaire de vérifier l'erreur engendrée par l'extrapolation des débits du Crupet à partir de ceux du Bocq. Si celle-ci est importante, il faudrait envisager une correction. Ces deux dernières tâches sortent du cadre de ce mémoire et n'ont donc pas été effectuées.

3.1.2 Diagnostic du cours d'eau

Avant de déterminer le débit réservé qui convient au Crupet, il faut étudier l'importance de l'altération du régime hydrique due à la présence du captage. A cette fin, nous avons utilisé le logiciel *Indicators of Hydrologic Alteration*. Les informations nécessaires à l'emploi de ce programme sont issues du guide de l'utilisateur ⁴. Ce programme calcule, à partir des séries hydrologiques obtenues au préalable, le degré d'altération de 33 paramètres appelés paramètres IHA ⁵. L'équation utilisée dans le programme est la suivante :

$$x_{alt} = \frac{x_{obs} - x_{esp}}{x_{obs}} \quad (3.9)$$

dans laquelle x_{obs} est le nombre d'années durant lesquelles la valeur observée du paramètre hydrologique tombe dans l'intervalle considéré (catégorie RVA basse, moyenne, haute) ; x_{esp} est le nombre d'années pour lesquelles la valeur devrait se situer dans cet intervalle. La première valeur est calculée à partir des données de débits réels. La seconde est obtenue sur base des données de débits non modifiés. On considère que l'altération est importante quand elle est supérieure à 67%, moyenne lorsqu'on se situe entre 34 et 66% et faible lorsque qu'elle ne dépasse pas 33%.

Nous avons réalisé une étude non-paramétrique. Cette méthode est proposée par défaut par le programme étant donné la non-normalité des données de débits. Les données sont groupées en trois catégories RVA (basse, moyenne et haute) de telle sorte que les débits non modifiés sont répartis équitablement entre elles. Cette méthode, utilisée par défaut, permet une analyse et une interprétation aisée des résultats. L'altération est considérée comme nulle, par exemple pour la catégorie RVA moyenne, si, durant un tiers des années, le débit tombe dans cet intervalle. Ces intervalles peuvent être modifiés selon les objectifs poursuivis (voir à la sous section 2.3.3, page 16). Il est possible de fixer les intervalles RVA pour que les valeurs observées tombent 50% du temps dans la catégorie RVA moyenne. Dans ce cas, en vue de limiter l'altération, il faut imposer un prélèvement très faible au niveau du captage. Pour une première approche, ceci est trop restrictif. L'objectif est de proposer un débit réservé tout en maintenant l'activité du captage. Mais des modifications des intervalles peuvent être envisagées en fonction des observations réalisées dans le cours d'eau après l'application d'un débit réservé. Il est également possible de modifier les valeurs des intervalles dans lesquels se situent les débits de crues et les débits d'étiages. N'ayant aucune expérience préalable du programme, nous avons choisi d'utiliser l'intervalle proposé par défaut. De plus, la définition du débit de crue et du débit d'étiage pour le Crupet sort du cadre de ce travail. Les débits sont considérés comme d'étiage ou de crue s'ils sont, respectivement, inférieurs à la valeur de la médiane moins 25% et supérieurs à la valeur de la médiane plus 25%.

Lors de notre analyse, nous ne nous occupons que de la catégorie RVA moyenne. En effet, la présence d'un captage en amont du cours d'eau entraîne une diminution généralisée des débits. Les catégories RVA hautes et basses sont donc fortement altérées soit par la présence

⁴The Nature Convency, 2007. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7 User's Manual.

⁵Pour rappel, ces paramètres sont présentés au tableau 2.1 de la page 18.

accrue soit par l'absence de valeurs observées. Il n'est donc pas possible, dans la suite du travail, d'élaborer un débit réservé qui puisse empêcher l'altération dans ces catégories. Par contre, il est tout à fait envisageable de minimiser l'altération dans la catégorie RVA moyenne. Les altérations pour les différents paramètres sont présentées dans le tableau 3.2.

Les cases colorées correspondent aux paramètres fortement altérés. L'altération est particulièrement importante pour les débits mensuels ainsi que pour les bas débits. Les débits sont beaucoup plus faibles que les débits qu'on devrait normalement observer sans altération.

TAB. 3.2: Tableau présentant l'altération de chacun des paramètres hydrologiques

Paramètres du groupe 1	
January	-0,3333
February	-0,6667
March	-0,6667
April	-0,5
May	-0,8333
June	-1
July	-1
August	-1
September	-1
October	-1
November	-0,6667
December	-0,5
Paramètres du groupe 2	
1-day minimum	-1
3-day minimum	-1
7-day minimum	-1
30-day minimum	-1
90-day minimum	-1
1-day maximum	0
3-day maximum	-0,1667
7-day maximum	-0,3333
30-day maximum	-0,3333
90-day maximum	-0,5
Number of zero days	0
Base flow index	-0,1667
Paramètres du groupe 3	
Date of minimum	-0,6667
Date of maximum	-0,1667
Paramètres du groupe 4	
Low pulse count	-0,6667
Low pulse duration	-0,8333
High pulse count	-0,1429
High pulse duration	0,1429
Paramètres du groupe 5	
Rise rate	-0,1167
Fall rate	0
Number of reversals	-0,5

Considérons par exemple le graphique de la figure 3.3 qui représente les débits du mois de juin pour chacune des années.

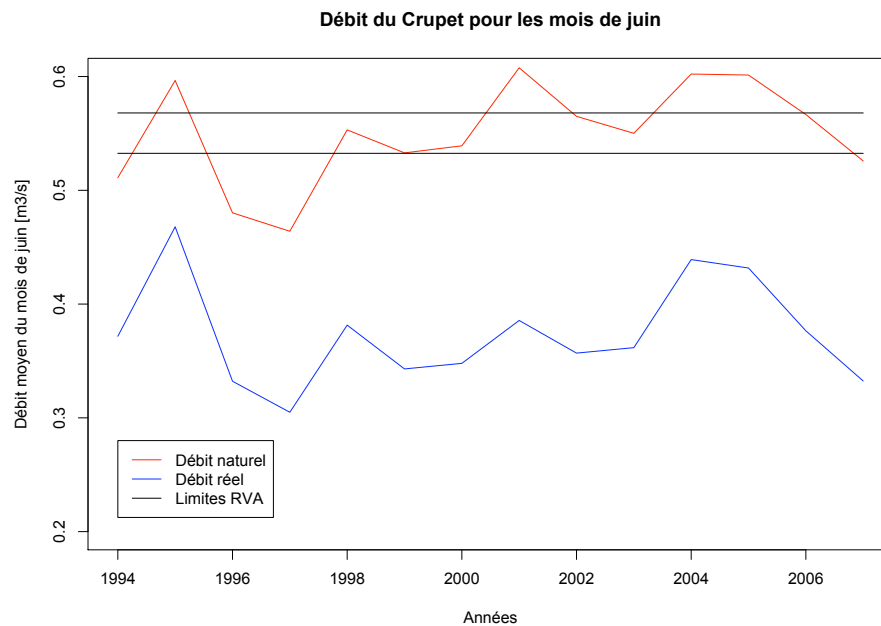


FIG. 3.3: Evolution des débits naturels et réels pour les mois de juin

On observe bien, sur le graphique 3.3, que les débits du mois de juin sont fortement réduits par rapport aux débits non modifiés. Aucune valeur observée ne se situe dans l'intervalle de la catégorie RVA moyenne. Il en résulte une altération de 100%. Rappelons que les limites de l'intervalle sont calculées de telle sorte qu'elles contiennent 33% des points. Les données utilisées pour identifier ces limites sont les débits naturels du Crupet. Dans le cas présent, il y a bien cinq points sur treize de la courbe rouge qui tombent entre les limites RVA.

Les valeurs des moyennes sur sept jours des débits minima de chaque année sont également fortement altérées. Cette altération est observable sur le graphique de la figure 3.4.

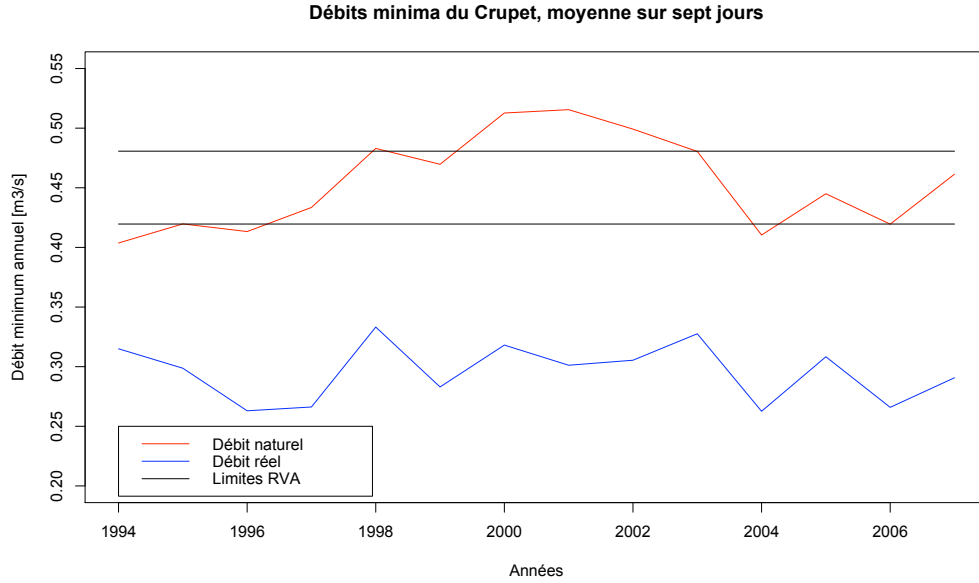


FIG. 3.4: Evolution du débit minimum moyen naturel et réel sur sept jours

Notons que l'on observe le même type de graphique pour les débits minima, que la moyenne soit calculée sur 1, 3, 7, 30 ou 90 jours.

Les altérations sont donc importantes pour les débits les plus faibles.

3.1.3 Détermination d'un débit réservé

Après avoir évalué dans quelle mesure le cours d'eau du Crupet est altéré par la présence d'un captage en amont, il s'agit maintenant de déterminer un débit réservé. Le travail consiste à tester, à l'aide du logiciel IHA, un certain nombre de séries de données pour lesquelles le débit modifié a été recalculé suivant diverses hypothèses.

Dans un premier temps, nous avons fixé deux seuils de débits, s_1 et s_2 , ainsi qu'un taux de prélèvement t maximum. Lorsque la valeur du débit naturel est inférieure à s_1 , le prélèvement est nul. Il augmente ensuite linéairement jusqu'à s_2 . Au delà de s_2 le prélèvement est constant et vaut le taux maximum. Nous avons fait varier ces trois paramètres afin d'obtenir l'altération la plus faible possible. Il ressort de ces tests que certains paramètres IHA restent altérés bien que les débits prélevés soient très faibles. Ce type d'équation est donc trop simple pour engendrer des débits qui minimisent les altérations tout en permettant de prélever suffisamment d'eau.

Une seconde approche a consisté à ajouter au modèle précédent un seuil et un taux intermédiaires. De la sorte, on peut modifier indépendamment les débits faibles et les débits

plus importants. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de prélever plus d'eau que dans le cas précédent. En jouant sur les différents paramètres (seuils et taux), il a été possible d'approcher un débit réservé. Mais, il n'a pas été possible d'obtenir un débit réservé qui garantisse une altération nulle ou faible pour tous les paramètres hydrologiques. En effet, l'altération reste élevée au niveau de deux paramètres : le débit du mois d'août et de septembre. Pour ces deux mois, les prélèvements doivent encore être plus fortement limités. Le système d'équations que nous obtenons et qui mène à une altération inférieure à 67% pour tous les paramètres hydrologiques est le suivant :

Si $Q_{naturel} < s_1$, alors

$$Q_{prel} = 0$$

Si $Q_{naturel} \geq s_1$ et $Q_{naturel} < s_2$, alors

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{(s_2 - s_1)} \cdot (Q_{naturel} - s_1)$$

Si $Q_{naturel} \geq s_2$ et $Q_{naturel} < s_3$, alors

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot \frac{(t_3 - t_2)}{(s_3 - s_2)} \cdot (Q_{naturel} - s_2)$$

Si les débits sont ceux du mois d'août ou de septembre, alors

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot t_4$$

sinon

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot t_3$$

Avec :

$$s_1 = 0,5$$

$$s_2 = 0,95$$

$$s_3 = 1,5$$

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = 0,33$$

$$t_3 = 0,55$$

$$t_4 = 0,05$$

Suite à toutes ces opérations, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 3.3

TAB. 3.3: Tableau présentant les altérations pour les différents paramètres hydrologiques après modification des débits prélevés

Paramètres du groupe 1	
January	0,1667
February	-0,5
March	-0,3333
April	0
May	0,3333
June	0
July	0,1667
August	0,1667
September	0,1667
October	0,5
November	0,1667
December	0,3333
Paramètres du groupe 2	
1-day minimum	0
3-day minimum	0
7-day minimum	-0,1667
30-day minimum	-0,3333
90-day minimum	0,3333
1-day maximum	-0,3333
3-day maximum	-0,5
7-day maximum	-0,5
30-day maximum	-0,1667
90-day maximum	0,1667
Number of zero days	0
Base flow index	-0,3333
Paramètres du groupe 3	
Date of minimum	0,5
Date of maximum	-0,3333
Paramètres du groupe 4	
Low pulse count	-0,5
Low pulse duration	0,3333
High pulse count	-0,4286
High pulse duration	0,4286
Paramètres du groupe 5	
Rise rate	-0,5
Fall rate	-1
Number of reversals	0,5

Si l'on reprend l'exemple du mois de juin, le résultat obtenu est présenté au graphique de la figure 3.5.

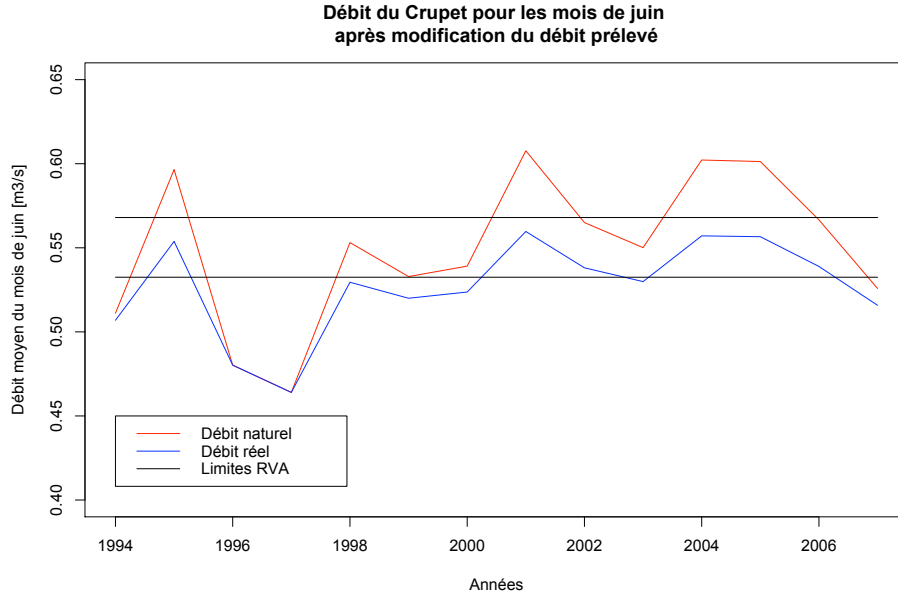


FIG. 3.5: Evolution du débit naturel et réel pour les mois de juin après correction des débits prélevés

Lorsqu'on applique ce système d'équations, le débit qui peut-être prélevé sur le bassin versant du Crupet s'élève à $2\,056\,000\text{ m}^3/\text{an}$. Actuellement, un peu plus de 5 millions de m^3 sont prélevés en moyenne chaque année, soit 2,5 fois plus. Rappelons que notre résultat est basé sur un grand nombre d'hypothèses simplificatrices, nécessaires en raison de l'absence de données de débits.

Selon le système d'équations que nous avons établi, si l'on veut connaître le débit qui peut être prélevé à Crupet, il faut d'abord savoir quel est le débit naturel le jour du prélèvement. Il y a deux possibilités pour y parvenir. Soit la société de pompage installe un système de jaugeage dans ses galeries, soit la société se base sur les débits mesurés à la station limnimétrique d'Yvoir. Dans le premier cas, il faut établir une corrélation entre les débits aux stations de pompage (Crupet et Durnal) et les débits à l'exutoire ⁶. Dans le second cas, la difficulté réside dans l'estimation du débit naturel du Crupet à partir des données relatives au bassin versant du Bocq. Une piste pourrait être d'évaluer le débit naturel du Bocq au jour j sur base des débits prélevés aux différentes stations de son bassin versant durant un nombre x de jours précédents. Pour cela, il serait nécessaire d'évaluer empiriquement l'influence des prélèvements sur les mesures de la station limnimétrique d'Yvoir. Malgré tout, le second cas reste moins précis étant donnée le passage des débits du Bocq aux débits du Crupet par un simple rapport de surfaces.

La formule proposée pour déterminer le débit réservé néglige la présence d'erreurs dans l'estimation des débits prélevés sur le Bocq. Afin de savoir quels sont les paramètres les

⁶Ce sont les débits à l'exutoire qui ont permis d'établir le débit réservé.

plus sensibles à une erreur sur les débits prélevés sur le Bocq, nous leur avons ajouté un pourcentage aléatoire selon une loi normale centrée en zéro. Il ressort de ce travail que les paramètres les plus sensibles sont :

- Les paramètres hydrologiques du groupe 1, c'est-à-dire les débits moyens des mois de l'année.
- Les paramètres hydrologiques du groupe 4, et plus précisément le nombre de crues ainsi que leur durée.

Lorsque l'écart type de la loi normale est compris entre 0,06 et 0,1, trois paramètres en moyenne voient leur altération augmenter de manière significative. Quand il est inférieur ou égal à 0,05, un seul ou aucun paramètre ne voit son altération dépasser 66%. Le problème majeur de l'équation est donc qu'elle reste sensible à une erreur, même faible, sur notre connaissance des débits prélevés sur le Bocq. Pour minimiser cette sensibilité, il faudrait, soit modifier l'équation qui corrige les débits prélevés, soit calculer cette équation avec des limites plus étendues pour la catégorie RVA moyenne. Dans les deux cas, cela engendrera une diminution des débits prélevés, ce qui pose des problèmes d'approvisionnement en eau et également d'ordre économique pour la société qui réalise les prélèvements. Si les taux et les seuils sont les suivant :

$s_1 = 0,5$
$s_2 = 1,5$
$s_3 = 2$
$t_1 = 0$
$t_2 = 0,15$
$t_3 = 0,25$

toutes autres choses restant inchangées, le débit prélevé s'élève à 766 000 m^3/an . Cela représente environ sept fois moins d'eau que ce qui est prélevé actuellement. Ces paramètres ont l'avantage qu'aucune altération n'est présente, même lorsqu'on modifie les débits prélevés en utilisant des nombres aléatoires dont l'écart-type est de 0,3.

Nous préconisons donc de se baser sur le système d'équation de la page 68 pour déterminer quels sont les débits qui peuvent être prélevés à Crupet et Durnal. Les seuils et les taux doivent être adaptés au mieux aux objectifs de gestion. Nous proposons deux possibilités aux pages 68 et 45. Les paramètres de la page 68 sont à utiliser si les débits réels et naturels à Crupet sont connus avec précision. Les débits prélevés restent alors relativement important. Rappelons que pour établir les séries hydrologiques à Crupet, nous avons dû estimer grossièrement les débits prélevés sur le bassin versant du Bocq. Ensuite, nous avons calculé les débits naturels du Bocq connaissant ses débits réels ⁷. Enfin, la méthode de régionalisation nous a permis d'établir les valeurs des débits réels et naturels du Crupet, sur base des débits du Bocq. Les taux et seuils de la page 45 permettent, quant à eux, d'éviter l'altération des paramètres IHA même si les débits calculés sont inexacts, ce qui est le plus probable au vu des hypothèses que nous venons de rappeler. Par contre, les débits prélevés sont alors plus faibles.

⁷Les débits réels du Bocq sont mesurés à la station limnimétrique d'Yvoir gérée par Aqualim.

3.2 Méthode des microhabitats - EVHA

Dans la section suivante, nous utilisons la méthode des microhabitats afin de déterminer un débit réservé dans le cours d'eau du Crupet. Nous exploitons à cette fin le logiciel EVHA⁸ élaboré au Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative du Cemagref. Le cheminement suivi reprend celui présenté dans le Guide de l'Utilisateur d'EVHA. (Ginot, 1998)

3.2.1 Travail de terrain

La première étape de ce travail consiste à réaliser une sectorisation du cours d'eau (voir paragraphe 2.4.3, page 23) afin de trouver une station d'étude représentative du linéaire du Crupet. Celui-ci est essentiellement composé de séquences plat lentique - radier et mouille de concavité - plat courant⁹. On trouve également des faciès en escalier. Notre choix s'est arrêté sur une station présentant deux séquences rapide-lent. La première est constituée d'un plat lentique (photo 3.6a) et d'un radier (photo 3.6b), la seconde d'une mouille de concavité (photo 3.6c) et d'un plat courant (photo 3.6d). Cette station a été choisie pour diverses raisons. Tout d'abord, parce qu'elle semblait représentative de la majeure partie du linéaire. Ensuite, parce qu'elle était relativement facile d'accès (proche de la route, pas de barbelés, orties d'une hauteur raisonnable, ...). Enfin parce que les mesures au théodolite y étaient possibles : l'espace est relativement dégagé, ce qui permet de réaliser des visées sans trop de difficultés.

Chaque faciès est décrit par trois transects. Afin de faciliter le travail de l'équipe lors de la prise des mesures, un fil a été tendu sur chacune des limites de représentativité de chaque faciès. Les transects ont, quant à eux, été marqués à la peinture de chantier pour n'avoir plus qu'à tendre le décamètre entre deux points prédéfinis. Ensuite, grâce à une équipe de cinq personnes, nous avons mis en oeuvre les prises de mesures topographiques et hydrologiques. Il s'agissait de décrire le profil en travers des transects grâce à un théodolite, de mesurer, pour chaque transect, la vitesse du courant et la profondeur du cours d'eau et d'évaluer le type le substrat.

⁸EVHA pour évaluation de l'habitat (des poissons).

⁹Radier : faciès peu profond, à fortes vitesses, de granulométrie pouvant varier.

Plat lentique : faciès peu profond, à faibles vitesses, transect symétrique, souvent en amont d'un obstacle ou d'un faciès de type radier ou rapide.

Plat courant : faciès peu profond, à grande vitesse, transect symétrique, pente douce, écoulement uniforme, vaguelettes à la surface libre liées à la présence du substrat à proximité de la surface libre.

Mouille de concavité : faciès situé dans les coudes des cours d'eau, la hauteur d'eau diminue vers l'intérieur de la courbe.



(a) Plat lentique



(b) Radier



(c) Mouille de concavité



(d) Plat courant

FIG. 3.6: Faciès de la station d'étude pour la mise en oeuvre de la méthode EVHA

3.2.2 Traitement des données

Lorsque le travail de terrain est terminé, les différentes informations recueillies sont encodées manuellement dans l'ordinateur en vue d'un traitement par le logiciel EVHA. Deux fichiers sont alors créés :

- Un fichier contenant les informations hydrologiques, soit le substrat, les vitesses et les hauteurs d'eau.
- Un fichier contenant les informations topographiques, soit les coordonnées des points décrivant chaque transect et celles des points délimitant les limites de représentativité, trois hauteurs d'eau par transect et les informations concernant le substrat des berges permettant de compléter le fichier hydraulique.

3.2.3 Dépouillement topographique

L'étape du dépouillement des données de terrain permet d'obtenir une vision d'ensemble de la zone d'étude et de mettre en évidence les éventuelles erreurs présentes dans les fichiers de données. Les informations disponibles sont les graphiques du profil en long de la zone étudiée du cours d'eau, les sections en travers des transects ainsi qu'une vue en plan de la station.

Lors de la première manipulation, le profil en long ne s'est pas affiché pour une raison inconnue. Après plusieurs essais, il s'est avéré qu'il ne peut être visualisé que si on supprime les trois premiers transects. Comme le profil en long est nécessaire pour le calage hydraulique, nous n'avons pas pris en compte les trois premiers transects. Cela entraîne l'élimination de tout un faciès. Il n'y a plus deux mais une seule séquence rapide-lent ainsi qu'un faciès de type radier en amont de la séquence. Cela sera à prendre en considération lors de l'interprétation des résultats.

Le schéma de la figure 3.7 donne une aperçu de la station étudiée.

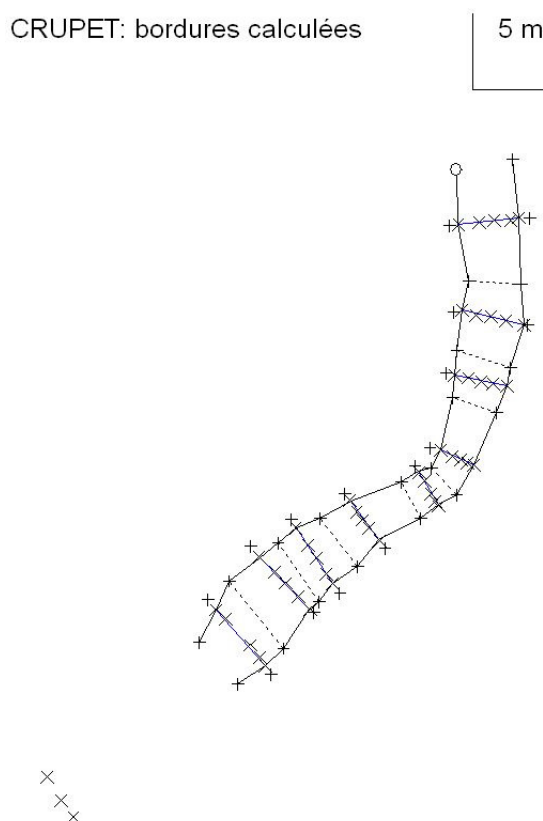


FIG. 3.7: Vue en plan de la station d'étude

On observe neuf transects qui permettent de décrire trois faciès. Les limites de représentativité sont délimitées par deux croix sur les rives, les transects sont identifiables grâce aux trois

croix supplémentaires dans le lit du cours d'eau. La limite aval est représentée par trois croix. Signalons que l'image observée sur base des seules données topographiques et l'image calculée ¹⁰ par EVHA sont identiques. Cela indique une bonne qualité des relevés de terrain.

EVHA nous fournit également des informations topographiques intéressantes sur la station étudiée. On sait par exemple que la station mesure 41,1 mètres de long, distance comptée à partir de la limite amont et jusqu'à la limite aval en sommant les segments joignant le milieu des transects au milieu des limites de représentativité. La pente moyenne est de 1,4%, les extrêmes allant de 0% à 2,8%. La largeur mouillée varie entre 2,4 et 5 mètres. Le nombre de points d'observation par transect est de 11 en moyenne.

3.2.4 Calage hydraulique

Le programme EVHA a été conçu de sorte à n'avoir à réaliser qu'une seule campagne de mesures. Le modèle hydraulique est calé à partir de ces mesures. C'est ce modèle qui fournira l'information physique pour les débits autres que le débit observé. (Ginot et al., 1998) Pour effectuer le calage, il faut déterminer :

- Le débit observé : il est calculé automatiquement par le logiciel mais peut-être modifié manuellement par l'opérateur. Dans notre cas, le débit de calage est évalué à 0,092 m³/s, ce débit est obtenu en éliminant les débits qui s'écartent de plus ou moins 15% des débits moyens calculés.
- La pente moyenne : elle est calculée automatiquement par le programme. Nous ne la modifions pas.
- Le D84¹¹ du dernier transect de la station : cette valeur peut-être calculée automatiquement par le programme ou complétée manuellement par l'opérateur. Dans un premier temps nous nous contenterons du résultat fournis par EVHA.
- Les débits maximum et minimum à simuler : respectivement 0,05 et 0,5 m³/s. Ces débits sont proches de la valeur du débit observé, condition *sine qua non* pour que les résultats d'EVHA soient fiables.

La figure 3.8 représente les lignes d'eau observées et résultant du calage hydraulique.

Les résultats pour le D84 du calage hydraulique sont présentés au tableau 3.4.

¹⁰Pour l'image calculée, on recherche l'intersection entre la surface considérée horizontale et le profil en travers.

¹¹La définition est que 84% du substrat présentent un diamètre inférieur ou égal à D84.

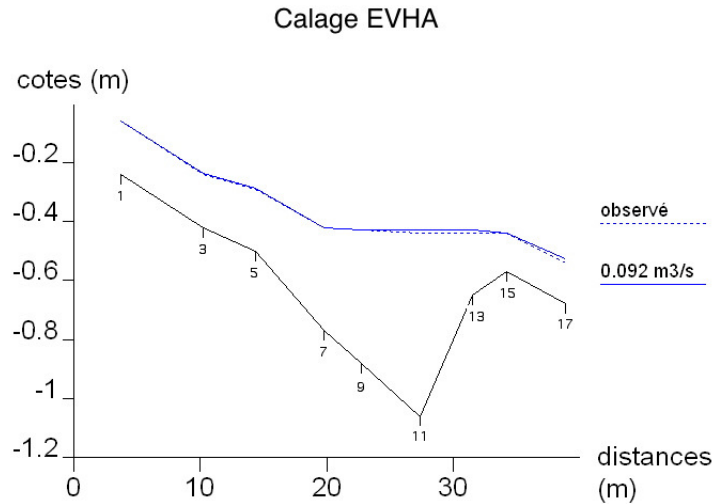


FIG. 3.8: Profil en long de la station d'étude - calage EVHA

TAB. 3.4: D84 pour chaque transect - calage EVHA

Numéro du transect	D84
1	0,11
3	0,07
5	0,16
7	0,20
9	0,20
11	0,01
13	0,01
15	0,16
17	0,02

Les résultats du calage méritent une petite discussion. En effet, si l'on compare les informations de terrain avec les résultats obtenus, on remarque qu'il y a une discordance entre les D84. Par exemple, les transects n° 9 et 11 ont le même substrat, dominance limoneuse nette, or pour l'un le D84 est très élevé (0,2 mètre) tandis qu'il est très faible pour le second (0,01 mètre). Le résultat du calage ne correspond donc pas à la réalité. Cela est valable pour les D84 de quatre transects, ils sont colorés en rouge dans le tableau 3.4. Notons également que sur le terrain, lors de l'identification du substrat, on n'en relève jamais l'épaisseur. Pourtant, si on considère le transect n° 9, la couche de limon était moins importante qu'au niveau du transect n° 11. Cette information précieuse quant au comportement morphodynamique du cours d'eau n'est pas exploitée.

Comme les résultats du calage ne sont pas satisfaisants, nous avons ajusté manuellement les D84 des cases colorées. Les D84 utilisés sont présentés au tableau 3.5. Nous avons modifié le diamètre du substrat de façon à nous rapprocher au mieux de la réalité. Mais, par manque

d'expérience, les nouvelles valeurs ne peuvent être considérées comme exactes. C'est une première approximation. Nous discuterons plus loin l'impact de ces modifications sur le résultat du débit réservé. Le résultat du calage est présenté sur le graphique du profil en long de la figure 3.9.

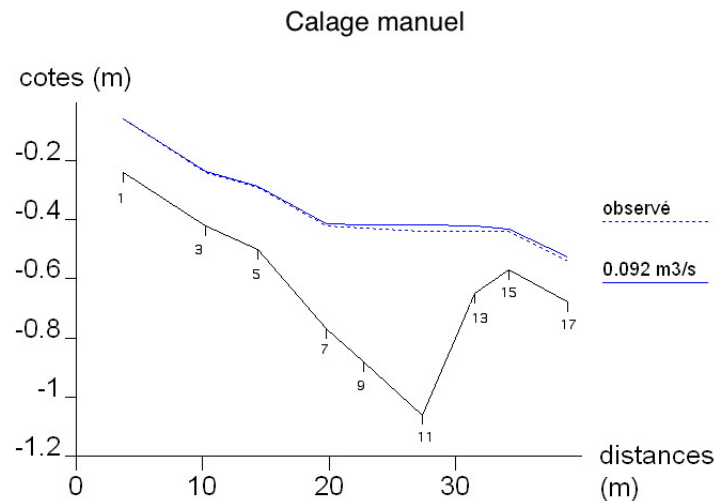


FIG. 3.9: Profil en long de la station d'étude - calage manuel

TAB. 3.5: D84 pour chaque transect - calage manuel

Numéro du transect	D84
1	0,11
3	0,07
5	0,16
7	0,20
9	0,1
11	0,13
13	0,13
15	0,16
17	0,15

3.2.5 Courbes de preferenda

Les courbes de preferenda utilisées pour cette étude sont des courbes de la truite fario (*Salmo trutta*, L. 1758) ainsi que les courbes du chabot (*Cottus Gobio*, L. 1758). Les premières sont

issues des courbes dérivées de courbes globales de Bovee et testées sur 12 rivières du Jura, Massif Central et Alpes. Ce sont des rivières à fond caillouteux, sans végétation susceptible d'influencer l'hydraulique ou l'habitat, dont la pente est comprise entre 0,6 et 4%, le module entre 0,3 et 0,5 m³/s, et où la truite est l'espèce dominante. On peut considérer que ces courbes ont un spectre d'application assez large. Elles sont applicables à tous les cours d'eau de montagne ou de pré-montagne à fond caillouteux dès lors que la pente n'excède pas 5% et le module environ 20 m³/s. On peut par contre émettre quelques réserves quant à leur utilisation sur des rivières à fond sableux. (Ginot et al., 1998) Les secondes sont le résultat d'un traitement de données récoltées sur le Rhône, l'Ain, l'Ardèche, la Drôme, la Loire et la Garonne. Les courbes du chabot ne sont disponibles que pour le stade adulte tandis que pour la truite les informations sont disponibles pour les stades adulte, juvénile, alvin et fraie. Nous ne disposons d'aucune information sur le domaine de validité des courbes du chabot.

Les courbes de la truite fario ne sont pas idéales pour le cours d'eau que nous étudions. En effet, le Crupet est non seulement caillouteux mais présente, surtout au niveau des faciès à faible vitesse, des zones plus sableuses. Par contre, la pente moyenne du cours d'eau (0,7%) est bien inférieure à la valeur maximale admissible de 5%. Le module ¹² du Crupet à l'exutoire est de 0,65 m³/s, ce qui est inférieur aux 20 m³/s autorisés. En ce qui concerne les courbes de preferenda du chabot, nous devons être prudent quant aux conclusions qui en découlent car nous ne connaissons pas les limites de validité de ces courbes.

3.2.6 Analyse des résultats

Analyse des courbes SPU

L'analyse des résultats se fait sur base des graphiques obtenus suite au calage manuel. Ce sont les graphiques des Surfaces Pondérées Utiles qui permettent d'identifier le débit minimum qu'il convient de garantir au cours d'eau. Pour rappel, la Surface Pondérée Utile est le résultat du couplage du modèle hydrologique et du modèle biologique. Celui-ci est réalisé en multipliant la surface de chaque cellule par un indice global issu des courbes de preferenda (voir sous-section 2.4.2, page 20). Deux types de raisonnements peuvent être suivis pour trouver le débit réservé, un raisonnement qualitatif et un raisonnement quantitatif.

Par un raisonnement qualitatif, on recherche le seuil d'accroissement rapide du risque. Le guide méthodologique d'EVHA traduit ce raisonnement comme ceci : « L'idée est de définir, en regardant la courbe, une limite en dessous de laquelle la courbe de SPU s'écroule très vite. La valeur absolue de la SPU n'a alors qu'une importance relative. » (Ginot et al., 1998)

¹²Le module est défini comme le débit (moyen) inter-annuel soit la moyenne arithmétique des débits (moyens) annuels calculée sur une période de temps au moins égale à 30 années consécutives (Hubert, 2003). Dans notre cas, il a été calculé sur base de quatorze années de données, les débits ayant servis au calcul sont ceux calculés pour la méthode RVA. La valeur du module n'est donc pas exacte mais donne une assez bonne estimation.

Comme la définition est assez vague et qu'il est difficile d'identifier un seuil unique, nous avons choisi de travailler avec des intervalles dans lesquels doit se situer le débit réservé. Le tableau 3.6 présente les débits minima et maxima convenant pour chaque espèce et stade étudié. Ces valeurs ont été estimées sur base des graphiques des figures 3.10a, 3.10b et 3.10c.

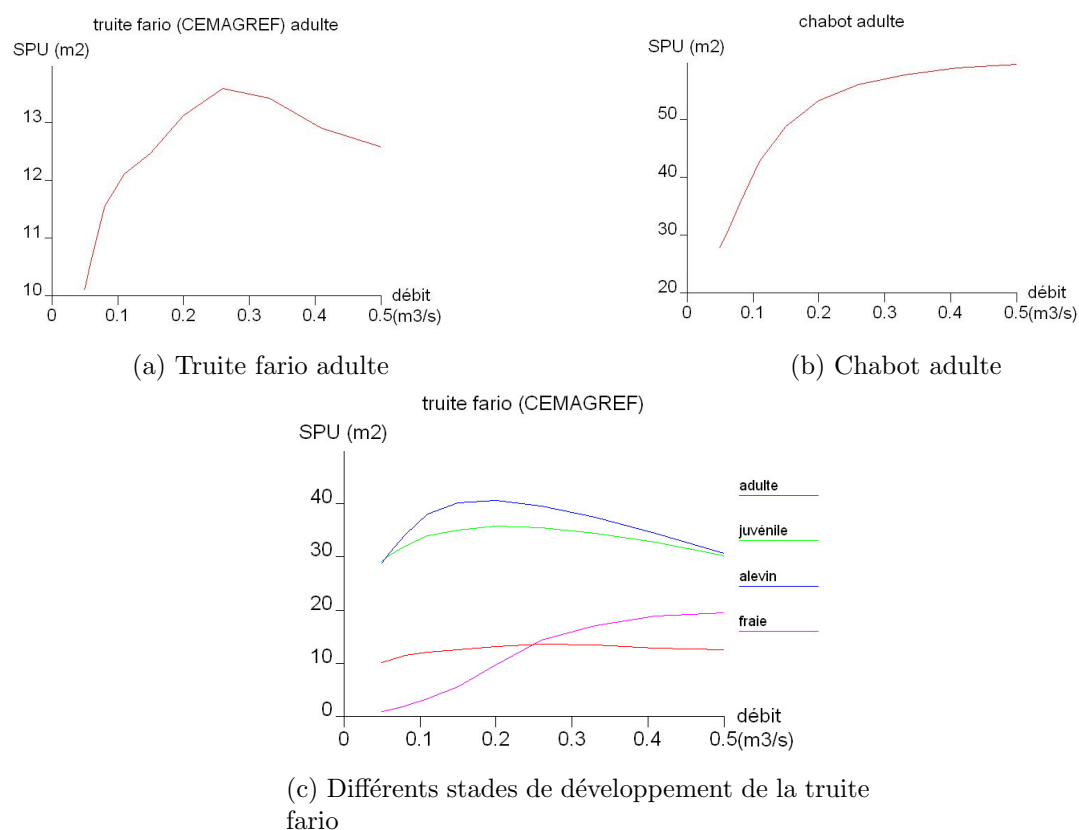


FIG. 3.10: Valeur de la SPU pour la truite fario et le chabot, produites par le logiciel EVHA

TAB. 3.6: Tableau présentant les limites des intervalles dans lesquels doit se situer le débit réservé en fonction de l'espèce et du stade de développement

Espèce	Stade de développement	Valeur minimale du débit	Valeur maximale du débit
chabot	Adulte	0,11	0,15
truite fario	Adulte	0,10	
truite fario	Juvénile	0,11	0,15
truite fario	Alvin	0,11	0,15
truite fario	Fraie		

Le graphique de la figure 3.10a semble très contrasté mais en fait, les SPU varient très peu. Il en résulte que le choix des seuils est difficile. On ne définira qu'un seul point de rupture, en 0,1.

Signalons qu'il n'est pas possible, avec la courbe SPU du stade fraie de la figure 3.10c, d'identifier clairement un intervalle dans lequel devrait se situer le débit réservé. La méthode n'est pas adaptée à l'étude de ce stade. Les frayères sont des zones de petites dimensions et en nombre souvent réduit. Raisonner en termes de surfaces rapportées à l'ensemble de la station paraît donc assez peu pertinent. De plus, on peut considérer que le niveau d'une population de truites est régulé, en ce qui concerne l'habitat, par la situation du mois le plus sec pour l'adulte. (Ginot et al., 1998) Pour le chabot nous n'avons à notre disposition que les informations concernant le stade adulte. Aucune information biologique ne nous permet d'affirmer que le stade adulte du chabot est le plus limitant pour cette espèce. En conclusion, qu'il s'agisse du chabot ou de la truite fario, l'intervalle dans lequel doit se situer le débit réservé est déterminé par le stade adulte uniquement.

Le raisonnement quantitatif pour déterminer le débit réservé se base, quant à lui, sur le principe de précaution. On peut procéder de deux manières. Premièrement, on peut définir la SPU la plus limitante pour le cours d'eau en situation hydrologique aussi naturelle que possible et se fixer une marge de tolérance garantissant les enjeux écologiques. Suite au raisonnement du paragraphe ci-dessus, nous choisissons de nous baser sur les courbes du stade adulte de la truite fario et du chabot. Il est dès lors proposé de prendre comme principe de précaution une valeur minimale et temporaire (ne pas l'autoriser tout au long de l'année) correspondant à 80% de la SPU prise au mois le plus sec pour l'adulte. (Ginot et al., 1998) Dans notre cas, la moyenne des débits des quatorze mois les plus secs des années 1994 à 2007 est de $0,44 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur est supérieure à celles des limites maximales des intervalles des stades adultes ($0,15 \text{ m}^3/\text{s}$). La SPU correspondante, pour la truite fario, est de $11,8 \text{ m}^2$. Le débit pour 80% de cette SPU est de $0,067 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce débit est inférieur à la gamme de débits du tableau 3.6. Dans ce cas, la solution pour un débit réservé est celle de la méthode qualitative. Dans le cas du chabot, le débit de la méthode quantitative est de $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur se situe dans l'intervalle trouvé par la première méthode. Les limites de l'intervalle satisfont donc les exigences du principe de précaution. La deuxième façon de procéder est de définir la SPU minimale garantissant la pérennité d'un peuplement de poissons. Les études de dynamiques des populations ne permettent pas encore de trouver de valeur de SPU satisfaisant ce critère.

Nous avons donc identifié, par ces raisonnements quantitatif et qualitatif, la gamme de débits en dessous de laquelle il ne faut pas descendre sous peine de mettre en danger la survie autonome de l'espèce pour cause de manque d'habitat. Le débit réservé doit se situer dans l'intervalle $[0, 10; 0, 15] \text{ m}^3/\text{s}$.

Les résultats sont issus des courbes SPU obtenues suite au calage manuel présenté au paragraphe 3.2.4. Si l'on avait utilisé les courbes du calage automatique d'EVHA, les résultats auraient été sensiblement les mêmes. En effet, nous avons testé cinq calages manuels. Pour trois d'entre eux, la ligne d'eau simulée restait proche de la ligne d'eau observée. Pour les deux autres, la ligne d'eau observée était tantôt surestimée (D84 grands), tantôt sous estimée (D84 petits). Dans les trois premières simulations, les courbes SPU restent identiques, on n'observe aucun changement. Pour les deux derniers tests, la courbe subit une translation vers le haut ou vers le bas. En d'autres termes, tant que la ligne d'eau calée estime cor-

rectement la ligne d'eau observée les résultats obtenus par l'interprétation des courbes SPU restent sensiblement les mêmes. Sinon, les valeurs des SPU augmentent ou diminuent pour un même débit. Les débits des seuils d'accroissement restent donc inchangés. On pourrait, suite à cette translation, avoir des modifications des résultats issus du raisonnement quantitatif. Les graphiques ayant servi à cette analyse sont présentés à l'annexe B de ce travail.

Ressources trophiques

Le radier est un faciès important pour assurer le bon fonctionnement d'un cours d'eau. Il remplit trois fonctions principales. C'est d'abord un réservoir de nourriture, ensuite une zone de circulation permettant les migrations ou les déplacements entre deux zones profondes et enfin une zone d'oxygénation de l'eau. La production benthique est, selon Ginot et al. (1998), fortement corrélée à la surface mouillée des radiers. On considère que la surface mouillée au débit médian est la base de surface de production potentielle pour les invertébrés. Le débit médian du cours d'eau à l'exutoire est de $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$. Le tableau 3.7 présente les pourcentages des surfaces mouillées, pour chacun des débits délimitant les intervalles, par rapport à la surface mouillée correspondant au débit médian. On observe bien sur ce tableau et sur le graphique de la figure 3.11 que les débits proposés comme limites des intervalles permettent d'avoir un certain confort trophique. Les limites inférieures des intervalles se situent effectivement avant la rupture de pente de la courbe surface mouillée - débit. Les surfaces mouillées varient donc dans de faibles mesures (maximum 6%) par rapport à la surface mouillée du débit médian.

TAB. 3.7: Tableau des pourcentages des surfaces mouillées par rapport à la valeur du débit médian pour les débits constituant les limites des intervalles

Débit [m^3/s]	Radier de tête - [%] surface mouillée
0,56	100
0,10	94
0,11	96
0,15	97

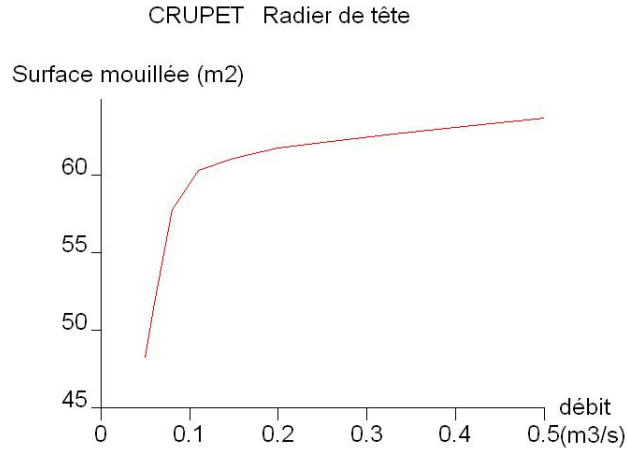


FIG. 3.11: Evolution de la surface mouillée du radier en fonction du débit

Franchissabilité

Pour que les poissons puissent remonter au descendre le cours d'eau, il faut garantir la présence d'une veine d'eau plus ou moins profonde et plus ou moins large selon l'espèce étudiée. Dans le cas de la truite, il est conseillé d'avoir une veine de hauteur minimale de 10 à 15 centimètres. Pour le chabot, une hauteur d'eau de 10 centimètres est suffisante étant donné la petite taille (longueur de 10 à 15 cm) du poisson.

Cette veine de circulation est présente au débit observé ($0,09 \text{ m}^3/\text{s}$). Elle a une hauteur minimale de 10 cm. Le premier transect est le plus critique du point de vue de la franchissabilité. Il présente un passage dont la hauteur est d'environ quatorze centimètres et la largeur approximativement trente centimètres. Les transects n° 5 et 17 présentent également des veines relativement peu profondes (entre 12 et 20 centimètres) sur des largeurs assez faibles (respectivement 36 et 50 centimètres) mais ne sont théoriquement pas critiques. Pour les autres transects, les veines sont relativement profondes sur des largeurs suffisantes (dans certains cas toute la largeur du cours d'eau). Comme le débit réservé doit être supérieur à $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$, le critère de franchissabilité n'est pas un problème au niveau de la station. Les différents transects peuvent être observés sur les schémas de la figure 3.12. Sur cette figure, sont représentées en bleu la ligne d'eau observée et en rouge les lignes d'eau pour des débits de $0,1$ et $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les vitesses maximales pour les débits réservés sont de 1 à $1,2 \text{ m/s}$, ce qui permet à la truite de se déplacer sur une dizaine de mètres sans problème et au chabot de parcourir quelques mètres. Notons que la chabot est un très mauvais nageur et se déplace très peu. Les pentes des faciès n'excèdent jamais 3%, ce qui permet, tout autres critères remplis, une circulation aisée des espèces migratrices.

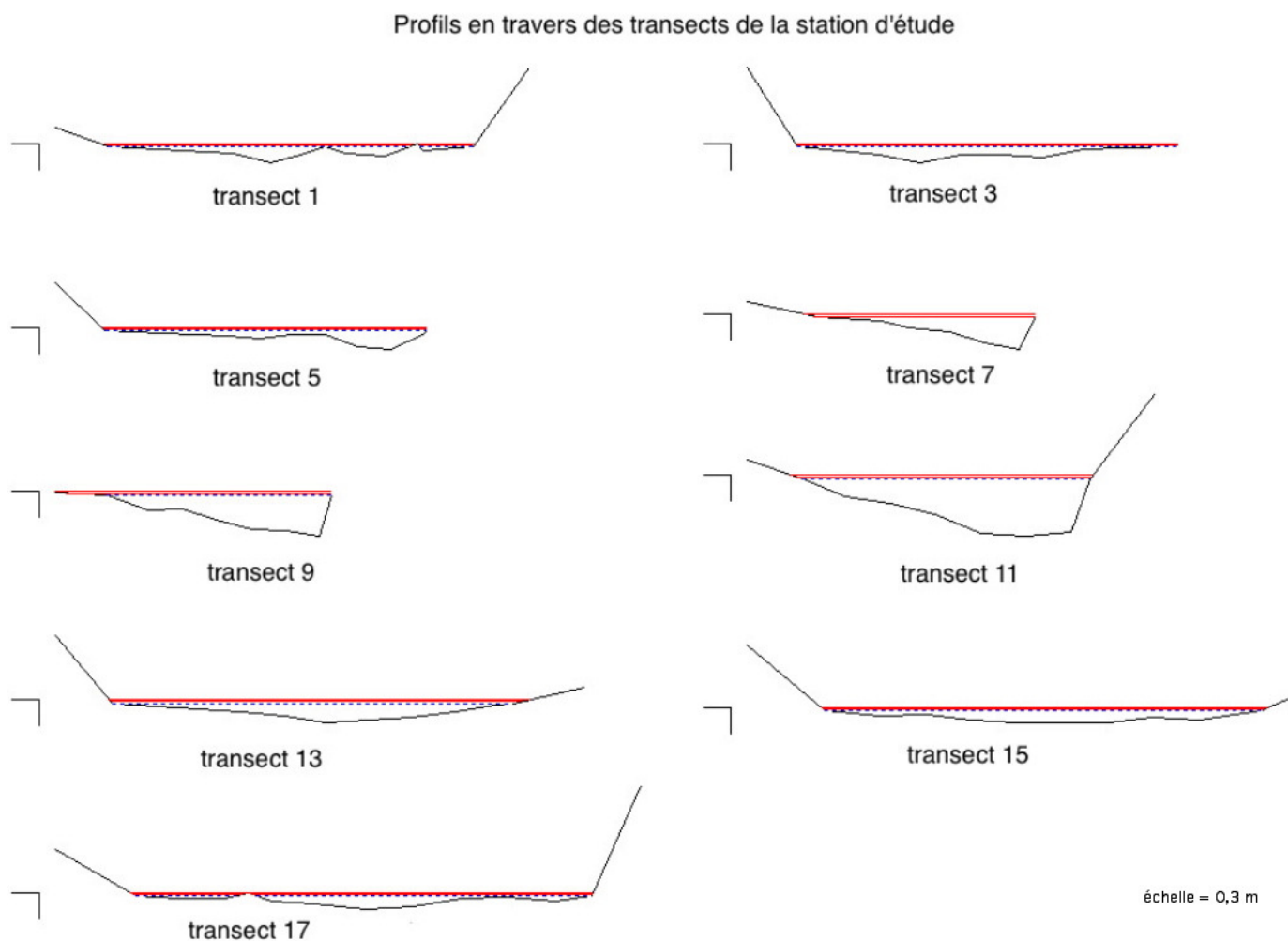


FIG. 3.12: Représentation des hauteurs d'eau observées et simulées pour les neuf transects de la station

Conclusion

Au terme de l'analyse des données de la méthode EVHA, nous pouvons conclure que le débit minimum qui convient à la station étudiée se situe entre 0,1 et 0,15 m³/s.

3.3 Méthode du périmètre mouillé

3.3.1 Principe de la mise en oeuvre

Rappelons que l'objectif de la méthode est d'identifier quel est le périmètre mouillé minimum pour maintenir un bon état du cours d'eau et d'associer à ce périmètre mouillé le débit correspondant. La première étape consiste à identifier le ou les points où seront réalisées les mesures. Les zones de mesures sont des tronçons qui, en période d'étiage, sont les plus sensibles en terme de modifications de hauteur d'eau, de vitesse du courant et de largeur du cours d'eau. Lorsque le où les points de mesures sont choisis, il s'agit de réaliser un jaugeage en chacun d'eux. Celui-ci, effectué à l'aide d'un courantomètre, nous fournit deux informations essentielles :

- La vitesse du courant en différents points de la largeur du cours d'eau et pour différentes hauteurs. Ces informations permettent de déterminer le débit Q_1 .
- La hauteur d'eau du cours d'eau en différents points de la section. Ces données permettent de calculer le périmètre mouillé P_1 pour une hauteur d'eau donnée (et donc un débit donné).

Notons qu'il est important de réaliser le jaugeage lorsque les hauteurs d'eau sont importantes afin d'avoir une vision la plus complète possible du profil en travers du cours d'eau.

Pour connaître le périmètre mouillé en fonction de la hauteur d'eau, nous procédons comme suit :

- Par extrapolation à partir des mesures, on définit une fonction $y = f(x)$ avec x la distance à la berge et y la hauteur d'eau mesurée en chacun des x .
- Chaque segment ds constituant le périmètre mouillé est alors donné par :

$$ds = dx \sqrt{1 + f'(x)^2} \quad (3.10)$$

avec $f'(x)$ la pente de la courbe :

$$f'(x) = \frac{f(x + dx) - f(x)}{dx} \quad (3.11)$$

- On intègre la fonction ds de $x = 0$ à $x = x_{max}$ qui sont les extrémités du transect (berges).

$$P = \int_{x=0}^{x_{max}} ds = \int_{x=0}^{x_{max}} \sqrt{1 + f'(x)^2} \cdot dx \quad (3.12)$$

Lorsque ces calculs ont été effectués, nous obtenons, pour une hauteur d'eau donnée h_1 , le périmètre mouillé P_1 ainsi que le débit Q_1 s'y rapportant. A partir de ces informations, il est possible de calculer la valeur du coefficient de Manning n . Cela permet ensuite, grâce à

la formule de Manning, d'identifier le débit correspondant à différentes hauteurs d'eau.

$$n = \frac{S_1^{\frac{3}{5}} \cdot i^{\frac{1}{2}}}{Q_1 \cdot P_1^{\frac{2}{3}}} \longrightarrow Q = \frac{S^{\frac{3}{5}} \cdot i^{\frac{1}{2}}}{n \cdot P^{\frac{2}{3}}} \quad (3.13)$$

avec

n = le coefficient de Manning

i = la pente du radier

P = le périmètre mouillé $[m]$

S = la surface mouillée $[m^2]$

Q = le débit $[m^3/s]$

La surface mouillée S est obtenue en intégrant $f(x)$ sur la largeur du cours d'eau.

$$S = \int_{x=0}^{x_{max}} f(x) \cdot dx \quad (3.14)$$

Il est dès lors possible de connaître le périmètre mouillé pour différentes hauteurs d'eau en intégrant à nouveau ds . Le débit correspondant est obtenu par l'équation de Manning 3.13.

Connaissant le périmètre mouillé ainsi que le débit pour différentes hauteurs d'eau, on établit un graphique du débit en fonction du périmètre mouillé. Le point correspondant à un changement de pente indique quel est le débit minimum requis dans le cours d'eau.

Concrètement, la première étape consistera en un jaugeage du cours d'eau. Rappelons qu'afin de connaître au mieux le profil en travers de la section du ruisseau, il est nécessaire que le niveau de l'eau soit le plus haut possible. Il est également possible, si le jaugeage n'est pas effectué en période de hautes eaux, de prendre des mesures au théodolite sur les berges. Ces données compléteront alors celles du jaugeage. L'acquisition des données a été effectuée, dans un premier temps, lors de la mise en décharge du captage, le premier jour du mois d'octobre 2008. Elle n'a pas été réalisée initialement en vue d'une utilisation de la méthode du périmètre mouillé. Trois transects ont été jaugés.

La première mise en oeuvre de la méthode du périmètre mouillé, ci-dessous, se base sur les données issues du jaugeage de celui des trois transects situé dans la zone correspondant le mieux à la définition de *riffle*. La présence de cascades, les faibles hauteurs d'eau et la largeur importante du cours d'eau semblent montrer que la zone est sensible aux modifications de débits (voir la photographie de la figure 3.13). La deuxième mise en oeuvre est basée sur les

données de terrains obtenues lors la réalisation de la méthode EVHA ¹³.



FIG. 3.13: Photographie du point de jaugeage pour la méthode du périmètre mouillé

3.3.2 Première mise en oeuvre

Le traitement des données est effectué grâce à un petit programme réalisé au moyen du logiciel de traitement statistique «R». Voici les principales étapes de ce calcul.

Les données du problème sont les suivantes :

$x_0=0, 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25, 2.75, 3.25, 3.75, 4.25, 4.75, 5$ [m]

$y_0=0, 0.33, 0.38, 0.44, 0.5, 0.5, 0.54, 0.63, 0.65, 0.63, 0.45, 0$ [m]

$Q=0.31$ m³/s (débit à la date du 01/10/08)

Où x_0 est la distance entre le point de mesure de la vitesse du courant et la berge et y_0 la profondeur du cours d'eau en ce point.

Les calculs effectués par le programme sont les suivants :

x_{max} = la plus grande valeur de x_0

$y_0 = f(x_0)$ (fonction calculée par le programme par extrapolation des données : x_0, y_0)

Le transect de la rivière correspond au graphique de y en fonction de x (voir le graphique de la figure 3.14).

¹³L'ensemble des programmes réalisés au moyen du logiciel de traitement statistique «R» relatifs aux calculs effectués dans cette section sont disponibles à l'annexe A.2, page viii.

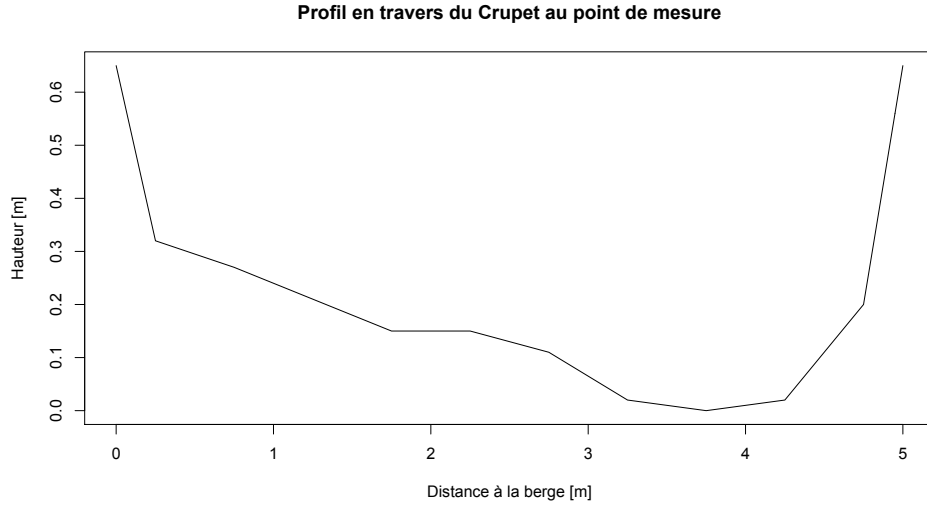


FIG. 3.14: Profil en travers du cours d'eau au point de mesure pour la méthode du périmètre mouillé

Au moyen de cette fonction, on calcule 101 couples de valeurs x, y afin de pouvoir réaliser l'intégration sur un nombre suffisant de points.

$$u = \{0, 1, 2, \dots, 100\}$$

$$x = \frac{u \cdot x_{max}}{100}$$

Les valeurs de y sont calculées par : $y = f(x)$

La surface mouillée S et le périmètre mouillé P sont alors obtenus par les équations 3.14 et 3.12 établies au point précédent.

A partir des données de hauteur d'eau et de la valeur du débit, il est possible d'estimer le coefficient de Manning n qui se calcule comme suit :

$$n = \frac{S^{\frac{3}{5}} \cdot i^{\frac{1}{2}}}{Q \cdot P^{\frac{2}{3}}} = 0,12$$

La pente du radier i a été calculée sur base d'une carte topographique. Elle est égale à 1,5%.

La formule de Manning est établie pour des écoulements uniformes ¹⁴. Or, nous nous trouvons dans un écoulement varié. L'utilisation de cette formule constitue donc une première

¹⁴Un écoulement uniforme est un écoulement pour lequel la hauteur d'eau est la même pour toutes les sections, la ligne d'eau est donc parallèle au radier.

approximation. Les conclusions de la méthode doivent donc être prises avec précautions, en toute connaissance de cause.

Connaissant le coefficient de Manning, il est dès lors possible de calculer le débit correspondant à diverses hauteurs d'eau. Et pour chacune de ces hauteurs, de calculer le périmètre mouillé. Nous avons procédé comme suit :

y_{prof} = la profondeur maximale du cours d'eau

x_{prof} = la valeur de x correspondant à la profondeur maximale

Le nombre de hauteurs d'eau pour lesquelles on détermine un débit est égal à vingt et une.

$$h = \frac{r \cdot y_{prof}}{20} \quad \text{avec } r = \{0, 1, 2, \dots, 20\}$$

La première étape consiste à déterminer une nouvelle fonction $g(x)$ qui permet de calculer les nouveaux y lorsque la hauteur d'eau $f(x) - h$ est modifiée (on réalise ce calcul pour 21 hauteurs d'eau différentes). Lorsque $g(x)$ est connue, on recherche les racines de la fonction de part et d'autre de x_{prof} (le x correspondant à la profondeur maximale). Il suffit ensuite d'intégrer $g(x)$ et ds entre ces deux racines pour connaître la surface mouillée et le périmètre mouillé. La formule de Manning calcule le débit correspondant.

$$g(x) = f(x) - h$$

On recherche les deux racines r_1 et r_2 de la fonction $y = g(x)$ et on calcule :

$$S = \int_{r_1}^{r_2} g(x).dx \quad P = \int_{r_1}^{r_2} ds \quad Q = \frac{S^{5/3}}{n \cdot P^{2/3}} \cdot i^{1/2}$$

Connaissant le débit et le périmètre mouillé correspondant à différentes hauteurs d'eau, nous obtenons le graphique de la figure 3.15.

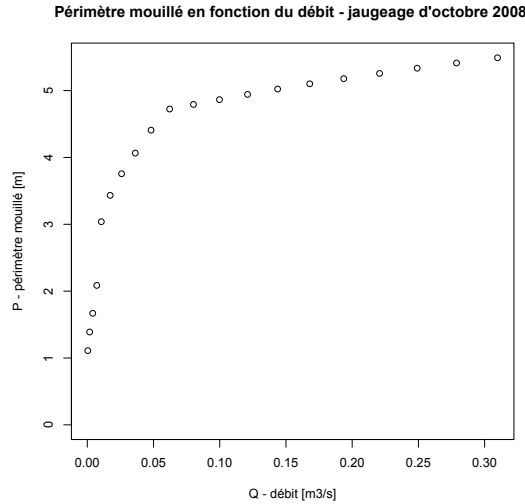


FIG. 3.15: Evolution de périmètre mouillé en fonction du débit du cours d'eau - jaugeage du mois d'octobre 2008

Celui-ci présente un changement de pente net pour un débit équivalent à environ $0,053 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela signifie que, selon cette méthode, le débit minimum requis dans la cours d'eau au niveau de ce transect ne devrait pas être inférieur à cette valeur.

3.3.3 Deuxième mise en oeuvre

Lors de la réalisation de la méthode EVHA, nous avons récolté les données nécessaires à la description de différents transects en termes de topographie, hauteur d'eau et débit. Les données qui sont utilisées pour la méthode du périmètre mouillé sont celles des trois transects situés dans le faciès de type radier. Lorsque nous avons effectué les mesures de terrain, nous avons tendu un décimètre entre les deux berges de chaque transect. Lors des jaugeages, nous avons relevé les vitesses et les hauteurs d'eau en prenant soin de noter quelle est la position de chaque point sur le décimètre. Nous avons également identifié la position des points de hauteur d'eau nulle sur le décimètre. Ensuite, au moyen d'un théodolite, nous avons mesuré les coordonnées de deux points supplémentaires sur les berges, de trois points dans l'eau et des deux points pour lesquels la hauteur d'eau est nulle. Comme nous connaissons la position de ces deux derniers points sur le décimètre, il est possible d'établir rapidement la correspondance entre les données des jaugeages et les données obtenues avec le théodolite. Dans ce cas ci, il est important de connaître les coordonnées de points des berges. En effet, le débit de jaugeage est faible, or pour évaluer le débit réservé il faut que le débit soit relativement important. Les points supplémentaires des berges permettent d'avoir une vision plus complète du transect et donc d'évaluer les périmètres mouillés correspondants à des débits supérieurs au débit de jaugeage. Ces informations permettent de tracer les graphiques de l'évolution du périmètre mouillé en fonction du débit.

Dans un premier temps, à partir des données du jaugeage, nous avons évalué le coefficient de Manning. En effet, grâce au programme «R» nous avons calculé le périmètre mouillé et la surface mouillée. Cela permet d'obtenir ensuite le coefficient de Manning pour le débit de jaugeage. Pour ce faire, nous avons à disposition pour chaque x la profondeur du cours d'eau, le débit de jaugeage et la pente du radier ¹⁵.

Dans un second temps, il a fallu compléter les données du jaugeage avec les données du théodolite c'est-à-dire que nous avons ajouté aux coordonnées connues du jaugeage les coordonnées des points des berges. Cette étape réalisée, nous pouvons calculer les nouveaux périmètre mouillé et surface mouillée. Nous sommes alors à même d'évaluer quel débit correspond à ces nouvelles valeurs. Pour cela, on utilise la formule de Manning. Comme nous connaissons le débit correspondant à des hauteurs d'eau considérées comme maximales, il est alors possible de tracer, pour chaque transect, le graphique de l'évolution du périmètre mouillé en fonction du débit par le même cheminement que celui de la sous-section 3.3.2. Les différents graphiques obtenus sont présentés aux figures 3.16a, 3.16b, 3.16c.

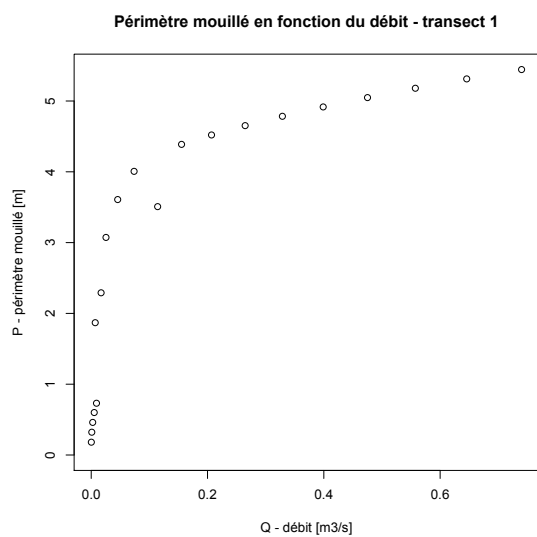
Les débits correspondants au changement de pente des courbes périmètre mouillé - débit sont présentés au tableau 3.8.

TAB. 3.8: Valeurs des débits réservés évalués pour chaque transect

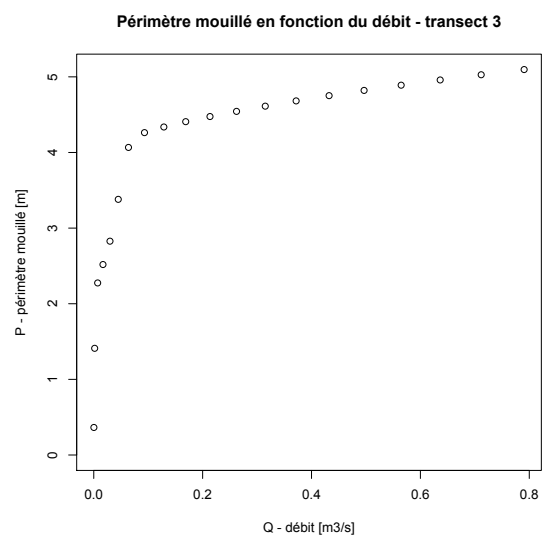
n° du transect	Débit réservé [m ³ /s]
1	0,15
3	0,1
5	0,06

On peut conclure que le débit réservé conseillé pour cette station s'élève à 0,15 m³/s, soit le plus élevé des débits réservés obtenus pour l'ensemble des transects.

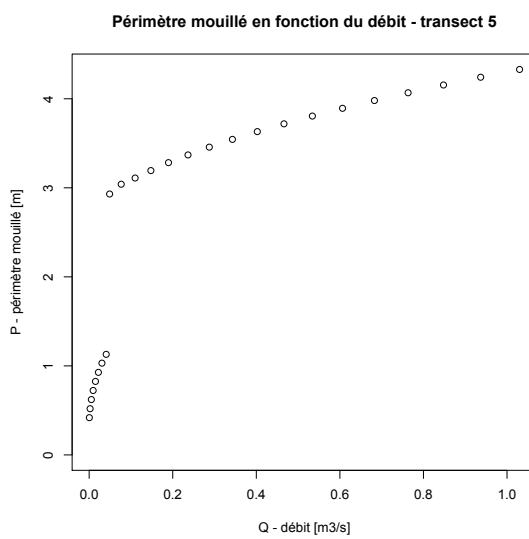
¹⁵Lors de traitement topographique dans EVHA, le programme calcule la pente de chaque transect.



(a) Transect 1



(b) Transect 3



(c) Transect 5

FIG. 3.16: Evolution de périmètre mouillé en fonction du débit du cours d'eau

Chapitre 4

Analyse des résultats

Dans ce travail, nous avons mis en oeuvre trois méthodes de détermination du débit réservé : la méthode RVA, la méthode du périmètre mouillé et la méthode des micro-habitats (EVHA). Rappelons que la première méthode permet d'identifier le débit pouvant être pompé quotidiennement dans le cours d'eau afin que celui-ci conserve un comportement proche de son comportement naturel. Pour les deux autres méthodes, l'objectif est de trouver le débit minimum qui doit toujours être présent en période d'étiage pour ne pas perturber l'écosystème du cours d'eau.

4.1 Séries hydrologiques

La première observation qui mérite réflexion concerne la valeur du débit minimum du Crupet lorsqu'il y a des pompages. Selon la méthode RVA, elle est de $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur supposée minimale pour le cours d'eau est pourtant supérieure à la mesure de débit effectuée dans le Crupet lors du travail de terrain pour la méthode EVHA et qui est de $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette différence pourrait s'expliquer de diverses manières.

Il faut tout d'abord savoir que les débits des séries hydrologiques utilisées dans la méthode RVA sont les débits à l'exutoire tandis que la station de mesures EVHA se situe davantage en amont. Le débit est donc forcément plus élevé à l'aval.

Une partie de l'écart peut également provenir des approximations nécessaires à l'obtention des débits réels et naturels du Crupet (voir sous section 3.1.1, page 32). Pour rappel, nous avons calculé les débits réels à partir de deux sources de données. D'une part, les débits mesurés à la station limnimétrique d'Yvoir et les débits pompés dans les différentes stations du bassin versant du Bocq et d'autre part les données des stations limnimétriques d'Yvoir et de Spontin. Une première approximation provient du fait qu'on a utilisé la moyenne men-

suelle des débits pompés sur le Bocq pour évaluer le débit naturel du Bocq. Des données journalières auraient probablement permis de gagner en précision. D'autre part, nous avons ajusté la courbe obtenue par les premières données à la courbe obtenue grâce aux deuxièmes. Le résultat de ce calage est présenté sur le graphique de la figure 4.1. Rappelons que le calage a été effectué en éliminant les données ultérieures au 15 août 2007. On observe, après cette date, que l'ajustement perd de sa qualité. A partir de cet instant, la courbe bleue (courbe à ajuster) est systématiquement plus haute que la courbe rouge (courbe d'ajustement). L'installation d'une station de pompage supplémentaire sur le bassin du Bocq pourrait expliquer cette observation. Les débits réels dans le Crupet à partir du 15 août 2007 sont donc systématiquement plus petits que les débits calculés. De plus, quand on néglige les dates suivant le 15 août 2007, le RMSE des débits calculés est de $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela signifie qu'en moyenne l'erreur entre les deux courbes est de $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$, mais cette erreur peut être plus importante à certaines dates. L'écart maximum est de $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$. Notons également que si l'on considère toutes les données de débit, le RMSE est plus élevé ($0,094 \text{ m}^3/\text{s}$) et l'écart maximum entre les deux courbes est alors de $0,44 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela pourrait également expliquer en partie pourquoi on a mesuré un débit inférieur au débit calculé minimal.

Enfin, bien que l'on ait vérifié que le bilan en eau des bassins versants du Bocq et du Crupet concordaient, le passage du débit du Bocq au débit du Crupet peut conduire, pour les deux méthodes d'ajustement utilisées, à des débits calculés (avant et après captage) qui sont systématiquement supérieurs ou inférieurs aux débits effectifs. Ceci ne modifie cependant pas la conclusion pour la méthode RVA (voir section 4.2). En effet, ce qui importe dans cette méthode est la différence entre le débit naturel et le débit après captage.

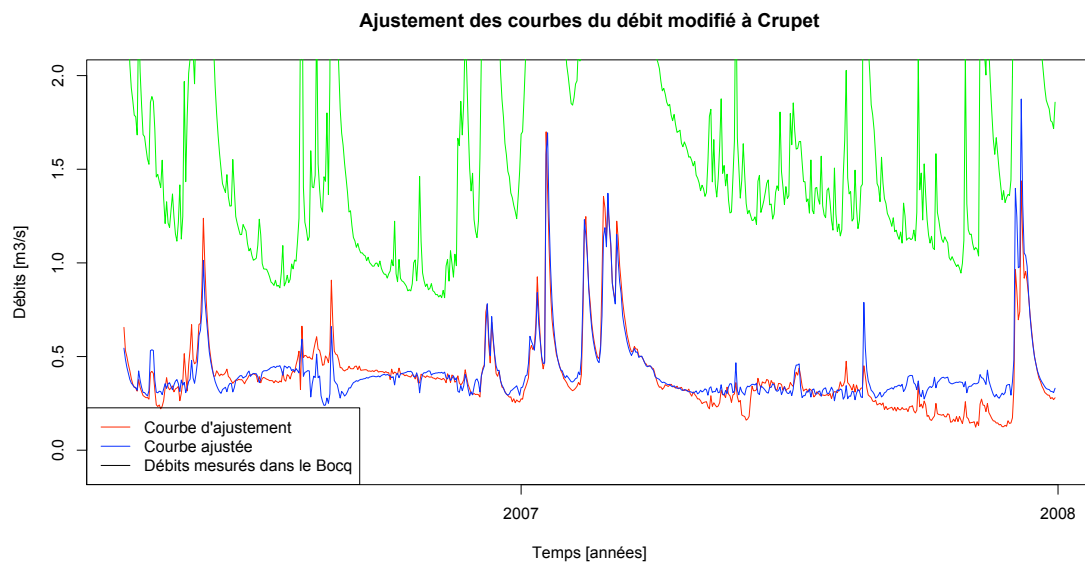


FIG. 4.1: Graphique présentant l'ajustement des courbes des débits modifiés du Crupet

4.2 Méthode RVA

L'objectif de la méthode RVA était de déterminer, non pas une valeur seuil, mais plutôt une équation qui fournit le débit pouvant être prélevé dans le Crupet. L'hypothèse de départ était que pour s'approcher d'un comportement naturel du cours d'eau, il fallait que durant un tiers du temps les débits réels du Crupet se situent entre les limites RVA (voir sous section 3.1.2, page 38). Pour respecter au mieux cette condition (altération inférieure à 67%), il fallait que les prélèvements soient calculés suivant le système d'équation suivant :

Si $Q_{naturel} < s_1$, alors

$$Q_{prel} = 0$$

Si $Q_{naturel} \geq s_1$ et $Q_{naturel} < s_2$, alors

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{(s_2 - s_1)} \cdot (Q_{naturel} - s_1)$$

Si $Q_{naturel} \geq s_2$ et $Q_{naturel} < s_3$, alors

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot \frac{(t_3 - t_2)}{(s_3 - s_2)} \cdot (Q_{naturel} - s_2)$$

Si les débits sont ceux du mois d'août ou de septembre, alors

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot t_4$$

sinon

$$Q_{prel} = Q_{naturel} \cdot t_3$$

Avec :

$$s_1 = 0,5$$

$$s_2 = 0,95$$

$$s_3 = 1,5$$

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = 0,33$$

$$t_3 = 0,55$$

$$t_4 = 0,05$$

Sur le graphique de la figure 4.2, on peut comparer l'évolution au cours du temps des débits effectivement prélevés et des débits que l'on conseille de prélever. On observe que les oscillations de la courbe rouge (débit que l'on conseille de prélever) sont beaucoup plus importantes que celles de la courbe bleue (débit qui est prélevé actuellement). La courbe rouge suit en fait le même comportement que la courbe verte, qui est la courbe des débits naturels. Cela

semble logique étant donné que la méthode RVA calcule un débit réservé qui approche le débit naturel. La courbe bleue évolue en fonction de la demande en eau des consommateurs et des débits prélevés dans les autres stations de pompage (présence d'un dispatcheur central). Elle est beaucoup plus régulière. Dès lors, si l'on veut être à même de distribuer l'eau en temps et en heure en respectant le comportement naturel du cours d'eau, il devient nécessaire de créer des zones de stockage. Notons que malgré la présence d'une zone de stockage, il ne sera pas possible de satisfaire la consommation actuelle en eau. En effet, nous suggérons de pomper environ 2,5 fois moins qu'actuellement en base annuelle. Au moyen d'une simulation portant sur les données des années 1994 à 2007, nous avons pu calculer que pour garantir un transfert journalier constant vers Bruxelles en respectant les débits prélevés recommandés par cette méthode, il faut disposer pour le seul Crupet d'un volume de stockage d'environ 6,9 millions de m³.

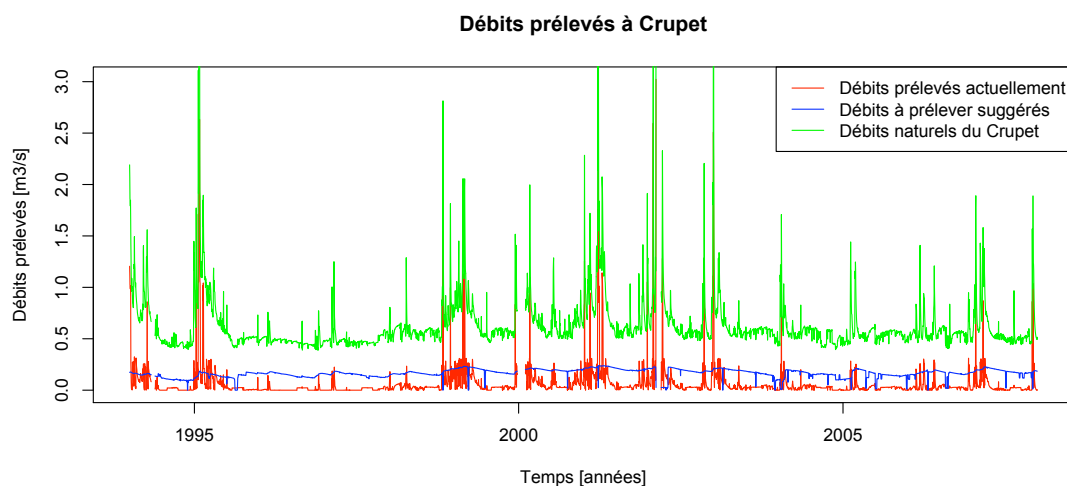


FIG. 4.2: Graphiques des prélèvements à Crupet

Pour cette étude, nous avons imposé que le débit naturel se situe pendant 33% du temps entre les limites RVA. Nous pouvons bien entendu modifier cette valeur. On pourrait choisir un pourcentage plus élevé. Dans ce cas, on se rapproche du comportement naturel du cours d'eau mais des problèmes d'approvisionnement deviendraient encore plus aigus. Cela impose en effet une diminution des pompages dans le cours d'eau.

La méthode RVA nécessitait des séries hydrologiques de vingt ans pour le débit naturel et également pour le débit modifié. En réalisant un certain nombre d'hypothèses, rappelées à la section 4.1, nous avons pu établir des séries hydrologiques sur quatorze années. Les résultats devraient donc être revus sur base de séries chronologiques plus étendues. De plus, au vu des hypothèses, il est probable que les débits calculés soient entachés d'erreurs. Or, une modification même faible des débits entraîne quasiment systématiquement une altération trop élevée pour un des paramètres IHA étudié. L'équation que nous avons trouvée est donc très sensible aux modifications des débits. En modifiant les seuils et les taux, nous avons obtenu une équation moins sensible. Voici ce qui est proposé comme modification :

$s_1 = 0,5$
$s_2 = 1,5$
$s_3 = 2$
$t_1 = 0$
$t_2 = 0,15$
$t_3 = 0,25$

Les débits prélevés calculés avec ces nouveaux paramètres sont très faibles. Nous passons en effet de 2 056 000 m³/an à 766 000 m³/an. Dans ce cas, le volume de stockage pour assurer un approvisionnement constant diminue également. Il ne doit plus être que de 2,25 millions de m³.

Une piste intéressante à suivre serait de re-programmer le programme IHA mais en le modifiant de sorte qu'il calcule l'équation qui maximise le prélèvement mais sous deux conditions :

- Il faut que l'altération soit inférieure à 67%
- Il faut que le résultat ne soit pas sensible à une modification des débits prélevés de plus de x%.

On peut conclure que les résultats obtenus au moyen de la méthode RVA doivent être pris avec beaucoup de précautions particulièrement dans le cas du Crupet. Tout d'abord, parce que l'utilisation de la méthode de régionalisation ne nous permet pas de considérer tous les paramètres hydrologiques. Nous avons notamment négligé les paramètres du groupes cinq. Ensuite, parce que les calculs ont été effectués sur base d'approximations. Or, nous venons de montrer que les paramètres hydrologiques sont sensibles à celles-ci et peuvent être rapidement affectés. Enfin, parce que les calculs ont été effectués sur base de séries hydrologiques de quatorze années. Or, il est conseillé d'utiliser au minimum vingt ans de données. Malgré tout, cette méthode semble très intéressante pour la mise en place d'un débit réservé. L'équation permet, sur base des modifications observées dans le cours d'eau suite à la diminution des prélèvements et grâce à l'amélioration des données de débits, de construire un débit réservé qui semble adapté à l'écologie du cours d'eau.

4.3 Méthode des micro-habitats (EVHA)

La méthode EVHA nous a permis de déterminer les intervalles dans lesquels devrait se situer le débit réservé pour deux espèces (chabot et truite) et différents stades de développement. Le stade limitant est le stade adulte. A partir des valeurs minimales et maximales des débits pour ce stade là, nous pouvons dire que le débit réservé de la station doit se situer entre 0,1 et 0,15 m³/s. Cet intervalle contient les intervalles relatifs aux autres stades de développement de la truite (excepté le stade fraie qui n'a pas été traité). Nous sommes donc, théoriquement, à même de fournir un débit réservé qui convienne tant au chabot adulte qu'aux différents

stades de développement de la truite. Notons que les limites des intervalles pour le chabot et la truite fario sont très proches. Cela n'est pas toujours le cas quand on étudie différentes espèces de poissons. Dans notre cas, cela permet d'augmenter la fiabilité du résultat.

Au vu des graphiques des figures 3.10a et 3.10b (voir page 53), on remarque que les Surfaces Pondérées Utiles du chabot sont nettement plus élevées que celles de la truite. La station est donc plus favorable au chabot.

Afin d'améliorer la qualité de la détermination du débit réservé, il faudrait étudier plusieurs stations sur le Crupet. Une ou deux stations supplémentaires auraient donné un résultat plus sûr. En effet, notre station ne prend, par exemple, pas en compte la présence de faciès en marches d'escalier. Trois stations sont, semble-t-il, un maximum étant donnée la longueur du Crupet. La prise de mesure nécessite en effet beaucoup de temps et mobilise au minimum une équipe de cinq personnes durant une journée. Il n'est donc pas pertinent d'augmenter trop le nombre de stations pour des raisons de temps et de budget. Signalons, d'autre part, que nous avons dû négliger tout un faciès. La station n'est dès lors plus aussi représentative du linéaire du cours d'eau que ce qu'on espérait lors de la prise des mesures. Il serait également appréciable d'établir des courbes de *preferenda* pour les cours d'eau belges afin d'améliorer la qualité des résultats.

4.4 Méthode du périmètre mouillé

La méthode du périmètre mouillé permet d'identifier un débit réservé qui devrait être de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur est le débit le plus élevé pour lequel on observe un changement de pente sur l'un des graphiques de l'évolution du périmètre mouillé en fonction du débit (voir le graphique de la figure 3.15 de la page 63 et les graphiques de la figure 3.16 de la page 65). Le changement de pente correspond à une rupture de pente de la partie inférieure de la berge. A partir de ce point, lorsque la hauteur d'eau augmente, le périmètre mouillé va augmenter moins vite. Il en découle que pour une même variation du débit, l'augmentation du périmètre mouillé sera moindre à partir du point de rupture de pente de la berge.

Le débit réservé peut être différent d'un tronçon à l'autre du même cours d'eau ($0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ dans un premier tronçon, $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ dans un second). C'est pourquoi il est indispensable de réaliser plusieurs jaugeages à divers endroits du cours d'eau afin d'avoir une idée correcte du débit réservé qu'il faut recommander. Le débit réservé correspond alors à la valeur la plus élevée qui a été trouvée.

4.5 Comparaison entre les trois méthodes de détermination d'un débit réservé

Lors de l'application des méthodes du périmètre mouillé et EVHA, nous avons déterminé une seule valeur seuil en dessous de laquelle le débit ne peut descendre. Pour la méthode du périmètre mouillé, la valeur critique est, selon le transect étudié, située entre de 0,053 et 0,15 m³/s. Dans le cas de la méthode EVHA, le débit minimum requis dans le cours d'eau est situé entre 0,1 et 0,15 m³/s. Que ce soit par l'une ou par l'autre méthode, la conclusion est donc identique : le débit du Crupet ne devrait pas être inférieur à 0,15 m³/s au risque de voir une dégradation de son état écologique. Comme les résultats obtenus sont identiques, il semble que le débit minimum est fortement corrélé au profil en travers des transects du cours d'eau. En conclusion, comme nous obtenons les mêmes résultats par les deux méthodes, il semble plus avantageux de mettre en oeuvre la méthode du périmètre mouillé. En effet, EVHA demande beaucoup plus de temps sur le terrain et pour le traitement des données. Cela en fait une méthode fastidieuse.

Il est intéressant de comparer le débit réservé trouvé par ces deux méthodes à la valeur du débit minimum établie dans la méthode RVA. Celui-ci est de 0,37 m³/s. Il est donc 2,5 fois plus élevé. Malgré les différentes hypothèses posées pour calculer les séries de débits, il y a très peu de chance que l'erreur qui en résulte entraîne une multiplication des débits par 2,5. Nous avons donc de bonnes raisons de penser que le débit minimum conseillé par la méthode RVA est effectivement supérieur au débit préconisé par les deux autres méthodes. Pour confirmer ce diagnostic, il faudrait que les séries hydrologiques soient plus précises. Pour affiner la qualité des données, il faudrait approfondir les investigations sur la méthode de régionalisation afin de savoir dans quelle mesure les débits peuvent être transposés et si il faut éventuellement les corriger. Il faudrait également savoir dans quelle mesure les données de débits de la station limnimétrique d'Yvoir sont affectées par les pompages sur le bassin versant du Bocq. Enfin, il faudrait avoir à disposition, pour calculer les débits naturels du Bocq, les débits journaliers pompés sur son bassin versant et non les débits mensuels.

Chapitre 5

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons comparé les résultats obtenus suite à la mise en oeuvre de trois méthodes de détermination du débit réservé. Il en ressort que la détermination du débit réservé n'est pas une chose aisée. Il faut d'abord s'attarder sur la définition qu'on en fait. Est-ce le débit minimum à préconiser en période d'étiage ou est-ce un débit qui doit durant x % du temps se situer dans une gamme de débits proche des débits naturels du cours d'eau ? Que l'on prenne l'une ou l'autre définition les méthodes sont différentes. Les méthodes du périmètre mouillé et des micro-habitats (EVHA) répondent à la première définition. Le débit réservé doit alors être tel qu'il n'y a pas de perturbation de l'état écologique du cours d'eau en période de basses eaux. La méthode RVA répond à la seconde définition. Dans ce cas, on s'attarde non seulement à l'état écologique du cours d'eau mais également au respect de l'équilibre morphodynamique.

Dans notre travail et pour le cas particulier du Crupet, nous avons montré que les résultats de la méthode du périmètre mouillé et la méthode EVHA conduisent à la même conclusion. Il serait dès lors intéressant de réaliser le même travail sur d'autres cours d'eau afin de vérifier si cela se reproduit. En effet, la méthode EVHA est une méthode lourde à mettre en oeuvre et qui prend beaucoup de temps. Il n'est donc pas indiqué de la préconiser si elle fournit systématiquement les mêmes résultats que la méthode du périmètre mouillé qui est très simple à mettre en oeuvre. Il serait également intéressant de voir si les résultats de la méthode RVA sont toujours supérieurs à ceux des deux autres méthodes. Notons que la méthode RVA est une méthode très intéressante car elle se base sur le comportement naturel du cours d'eau. En effectuant une petite programmation, cette méthode permettrait de maximiser les prélèvements sur un cours d'eau tout en s'attachant à ne pas trop affecter son fonctionnement naturel.

Cela étant, il n'est pas aisé de commenter les résultats étant donné que nous n'avons pas à notre disposition les séries chronologiques des débits du Crupet avec et sans pompage. Nous en avons seulement une estimation grossière. Or, pour étudier un cours d'eau, les premières informations dont on a besoin sont les débits. L'idéal pour mener des recherches

sur les débits réservés serait de connaître, sur tout cours d'eau subissant des prélèvements, les débits du cours d'eau et les débits prélevés au jour le jour. Ces données serviraient de base de comparaison pour les résultats issus des méthodes du périmètre mouillé et EVHA mais permettraient également d'améliorer la qualité des résultats de la méthode RVA. Il est entendu que ces données ne sont pas toujours disponibles. C'est pourquoi l'utilisation des méthodes de régionalisation, l'évaluation de l'impact des prélèvements sur les débits mesurés aux stations limnimétriques sont autant de points à approfondir lors de la création de données de débits.

Pour conclure sur le cas du Crupet, il semble que le débit en dessous duquel il ne faut jamais descendre est de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce débit permet d'assurer la survie de l'écosystème durant les périodes d'étiage. Notons que lors de nos mesures sur le terrain, nous avons observé un débit de $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ seulement. Par contre, si on désire prendre en compte le fonctionnement naturel du cours d'eau et éviter qu'il ne soit trop altéré, nous conseillons de calculer les débits à pomper au moyen de l'équation présentée dans la section 4.2. Le débit minimum est alors 2,5 fois plus élevé. Notons que, dans ce cas, les prélèvements doivent également être revus durant toute l'année. Ces conclusions sont évidemment à prendre avec précaution au vu des différentes hypothèses et remarques signalées tout au long de ce travail. Nos résultats constituent pourtant une base de travail intéressante. Nous conseillons, quelle que soit la méthode utilisée, un suivi régulier de l'évolution des caractéristiques du cours d'eau. Ainsi, il sera possible d'ajuster le débit réservé en fonction des observations.

En conclusion, avant de se lancer dans l'étude des débits réservés, il faut tout d'abord s'accorder sur la définition qu'on en fait. Il est également important d'avoir à disposition des données hydrologiques qui servent soit de base de comparaison pour les résultats soit de base de données pour la mise en œuvre d'une méthode. Ces données doivent être les plus précises possible. Enfin, il est primordial de ne pas se contenter de trouver le débit réservé, il est également nécessaire de réaliser un suivi régulier de l'évolution des caractéristiques du cours d'eau.

Bibliographie

- ARMSTRONG D.S., PARKER G.W. et RICHARDS T.A. (2004). Evaluation of Streamflow Requirements for Habitat Protection by Comparaison to Streamflow Characteristics at Index Streamflow - Gaging Stations in Southern New England. Rapport technique 03-4332, Massachusetts Division of Fisheries and Wildlife.
- DEMARCIN P., DEGRÉ A., SMOOS A. et DAUTREBANDE S. (2009). Projet ERRUISSOL. Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en Région Wallonne. Rapport final de Convention. Rapport technique, DGO3, FUSAGx Unité d'hydrologie et hydraulique agricole.
- GINOT V. (1998). *EVHA : Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière Guide de l'Utilisateur Version 2.0*. Cemagref Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative.
- GINOT V., SOUCHON Y., CAPRA H., BREIL P. et VALENTIN S. (1998). *EVHA : Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière Guide méthodologique Version 2.0*. Cemagref Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative.
- GIPPEL C.J. et STEWARDSON M.J. (1998). Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated Rivers : Reserach and Management*, (14), p. 53 – 67.
- GUYON F., MOY J., COGELS X. et CANDER BORGHT P. (2005). Evaluation globale de la qualité hydromorphologique des masses d'eau définies en Région wallonne : adaptation de la méthodologie Qualphy et mise au point d'un système d'évaluation de la qualité physique des masses d'eau de surface en région wallonne. Rapport technique, RW-DGRNE-DES AQUAPOLE Ulg.
- HUBERT P. (2003). Dictionnaire français d'hydrologie : [http ://www.cig.ensmp.fr/ hubert/glu/indexdic.htm](http://www.cig.ensmp.fr/hubert/glu/indexdic.htm) (14 juillet 2009).
- HUGUES D. (2001). Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers. *Journal of Hydrology*, (241), p. 140 – 151.
- IRM (2009). Site internet de la Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques, Accès aux données archivées et aux statistiques : [http ://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/index.html](http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/index.html) (20-07-2009).

- KING J. et LOUW D. (1998). Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 1(2), p. 109–124.
- KING J., THARME R. et DE VILLIERS M. (2008). Environmental flow assessments for rivers : Manual for the building block methodology. Rapport technique TT 354/08, Water Research Commission.
- KOZLOWSKI S.J. (1988). Instream Flow Study Phase II : Determination of Minimum Flow Standards to Protect Instream Uses in Priority Stream Segments. Rapport technique 163, South Carolina General Assembly.
- MALAVOI J. et SOUCHON Y. (2002). Note technique. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin français de Pêche Piscicole*, (365/366), p. 357–372.
- MANN J.L. (2006). *Instream flow methodologies : an evaluation of the Tennant method for higher gradient stream in the national forest system land in the Western U.S.* Thèse de doctorat, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- POUILLY M., VALENTIN S., CAPRA H., GINOT V. et SOUCHON Y. (1995). Méthode des microhabitats : Principes et protocoles d'application. *Bulletin français de Pêche Piscicole*, (336), p. 41–54.
- REBILLARD V. (2006). Détermination et mise en place de régimes réservés pour les cours d'eau. Site internet : www.agroparistech.fr (20 février 2009). Rapport technique, ENGREF CEMAGREF.
- RICHTER B., BAUMGARTNER J., WIGINGTON R. et BRAUN D. (1997). How much water does a river need? *Freshwater biology*, 37(1), p. 231–249.
- RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P. et POWELL J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers : Research and Management*, 14(4), p. 329–340.
- SABATON C. et MIQUEL J. (1993). La méthode des micro-habitats : un outil d'aide au choix d'un débit réservé à l'aval des ouvrages hydroélectriques. Expérience d'électricité en France. *Hydroécologie appliquée*, 1(5), p. 127–163.
- SOHIER C., DEGRÉ A. et DAUTREBANDE S. (2009). From root zone modelling to regional forecasting of nitrate concentration in recharge flows - The case of the Walloon Region (Belgium). *Journal of Hydrology*, 369(3-4), p. 350–359.
- SOUCHON Y., VALENTIN S. et CAPRA H. (1998). Peut-on rendre plus objective la détermination des débits réservés par une approche scientifique? *La Houille blanche*, 53(8), p. 41–45.

- THARME R. (2003). A global perspective on environmental flow assessment : emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5-6), p. 397 – 441.
- VAN BRUSSEL S. (2005). *Evaluation de la qualité physique des cours d'eau à l'aide de l'outil Qualphy, étude de cas appliquée au Bocq*. Rapport de stage, Université Catholique de Louvain.

Annexe A

Programmes réalisés au moyen du logiciel «R»

La plupart des calculs effectués dans le cadre de ce travail ont été réalisés au moyen du logiciel statistique «R» (<http://www.r-project.org/>).

A.1 Programmes «R» - RVA

Dans cette section sont présentés la plus part des programmes «R» qui ont été utilisés pour générer les séries hydrologiques nécessaires à la mise en oeuvre de la méthode RVA.

A.1.1 Transformation des débits horaires du Bocq en débits journaliers

Au moyen du programme présenté ci-dessous, nous avons transformé les débit horaires mesurés à la station limnimétrique d'Yvoir en débits journaliers. Le classement a été effectué en fonction des dates.

```
# On lit le fichier de données
# On extrait les dates, les heures et les débits respectivement des colonnes 1, 2 et 3
donnees = read.table(file("/users/Laura/Desktop/Crupet_R/Bocq/Bocq_80-08.txt"))
dates_brut=donnees[,1]
heures_brut=donnees[,2]
debits_brut=donnees[,3]

# On restreint aux données où le debit > 0
```

```

date=dates_brut[debits_brut>0]
debits=debits_brut[debits_brut>0]

#Calcul des moyennes sur 24 heures ==> débit journalier
# On applique la fonction 'mean' (moyenne) aux
# données de 'debits' en classant par 'dates' (= nom de la moyenne)

moyennes = tapply(debits,date,mean)

#Transformation des dates et classement des moyennes selon les dates:

#On transforme la date en un format lisible par R
datesf=as.Date(names(moyennes),format="%d/%m/%Y")

#Le nom des moyennes = la date formatée
names(moyennes)=datesf

#On classe les moyennes en fonctions de la date formatée
moyennes = moyennes[as.character(sort(datesf))]

#On retransforme la date pour qu'elle soit lisible par IHA
dates=format(sort(datesf),"%d/%m/%Y")

#Les données de sortie se trouvent dans deux colonnes (dates + débit)
sortie=cbind(dates,as.numeric(moyennes))

#On écrit le résultat dans un fichier
write.table(sortie,file="/users/Laura/Desktop/Crupet_R/Bocq/moyenne_80_08.txt",
,quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)

```

A.1.2 Débits naturels du Crupet

Les débits naturels du Crupet sont obtenus en additionnant aux débits réels du Bocq (données journalières) les débits prélevés sur le bassin versant du Bocq (moyennes mensuelles) et en utilisant des facteurs de corrections. Ceux-ci sont obtenus suite à l'ajustement de deux courbes comme expliqué à la sous section 3.1.1 de la page 32. On passe du débit du Bocq au débit du Crupet par un rapport des surfaces des bassins versant respectifs.

```

# PREMIER JEU DE DONNEES
# On lit les fichiers de données des stations limnimétriques d'aqualim
donnees1 = read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Spontin/moyenne_Spontin.txt",sep="/"))
donnees2 = read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Spontin/moyenne_Bocq.txt",sep="/"))

dates1=as.Date(donnees1[,1], "%d/%m/%Y")
debit1=donnees1[,2]
dates2=donnees2[,1]
debit2=donnees2[,2]
S_Spontin=16617.22 #superficie du bassin versant à partir de la station limnimétrique de Spontin

```

```

S_Crupet=3625.23 #superficie du bassin versant du Crupet
S_Bocq=23227.09 #superficie du bassin versant à partir de la station limnimétrique d'Yvoir
S_Naturel=S_Bocq-S_Spontin

#Calcul du débit naturel du Crupet
debit_total=debit2-debit1
debit_Crupet=debit_total*S_Crupet/S_Naturel

#DEUXIEME JEU DE DONNEES
# Lecture des fichiers contenant les débits pompés
table1= read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Bocq_naturel/moyenne_94-07.txt",sep="/"))
table2= read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Bocq_naturel/captages2.txt",sep="/"))

# Extraction des dates et mise au format de "R"
dates1=as.Date(table1[,1],format="%d/%m/%Y")
dates2=as.Date(table2[,1],format="%d/%m/%y")

# Extraction des données
donnees1=table1[,2]
donnees2=table2[,6]
donnee1=donnees1[!is.na(donnees1)]
donnee2=donnees2[!is.na(donnees2)]

# On définit le nom des données 2 (mensuelles) comme étant le nom du mois et l'année
names(donnees2)=format(dates2,"%m/%Y")

# On ajoute aux donnees1 (journalières) les valeurs de donnees2 du mois et de l'année correspondants
#Les facteurs de corrections sont trouvés en ajustant à la courbe issue du premier jeu de données
# la courbe du deuxième jeux de données .
mult0=3.1
resultat = donnees1 + mult0*donnees2[format(dates1,"%m/%Y")]
seuil=1.51
C1=donnees1>=0.5 & donnees1<=seuil & !is.na(donnees1)
multiplic=mult0+4.9*(seuil-donnees1[C1])
resultat[C1] = donnees1[C1] + multiplic*donnees2[format(dates1,"%m/%Y")][C1]

# On définit le nom du résultat comme étant la date à notre mode (j/m/a)...
names(resultat)=format(dates1,"%d/%m/%Y")

# et on écrit le débit naturel dans un fichier .txt
write.table(resultat,file=paste(chemin,"Crupet_R/Bocq_naturel/naturel_bocq.txt",sep="/"),
quote=FALSE,row.names=TRUE,col.names=FALSE)

#On multiplie le résultat par le rapport des surfaces...
Sbocq=232.2709
Scrupet=36.2523
r=Scrupet/Sbocq
print(r)

resultat2=resultat*r
names(resultat2)=format(dates1,"%d/%m/%Y")

# et on écrit le résultat final dans un fichier
write.table(resultat2,file=paste(chemin,"Crupet_R/Bocq_naturel/naturel_Crupet.txt",sep="/"),

```

```
quote=FALSE,row.names=TRUE,col.names=FALSE)
```

A.1.3 Corrélation entre les deux séries de données

Le programme ci-dessous permet de réaliser le graphique de l'évolution du débit modifié du Crupet au cours du temps pour les deux jeux de données. C'est à partir de ce graphique qu'est réalisé l'ajustement des courbes et que sont trouvés les facteurs de correction du programme de la sous section A.1.2.

```
#PREMIER JEU DE DONNEES
#Lecture des fichiers de données
donnees1 = read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Spontin/moyenne_Spontin.txt",sep="/"))
donnees2 = read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Spontin/moyenne_Bocq.txt",sep="/"))

dates1=as.Date(donnees1[,1], "%d/%m/%Y")
debit1=donnees1[,2]
dates2=donnees2[,1]
debit2=donnees2[,2]

#Calcul du débit réel du Crupet avec les données des stations limnimétriques d'Aqualim
S_Spontin=16617.22
S_Crupet=3625.23
S_Bocq=23227.09
S_Naturel=S_Bocq-S_Spontin

debit_total=debit2-debit1
debit_Crupet=debit_total*S_Crupet/S_Naturel

#DEUXIEME JEU DE DONNEES
#Lecture du fichier contenant les données calculées à partir du second jeux de données
donnees3 = read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Calcul_M/debits_final.txt",sep="/"))

dates3=as.Date(donnees3[,1],format="%d/%m/%Y")
data2=donnees3[,2]
names(data2)=dates3
data3=donnees3[,3]
names(data3)=dates3

#Deux dates si on veut faire l'ajustement avec toutes les données ou jusqu'à une certaine date
#datelim="2007-8-15"
datelim="2007-12-31"
Cdat2=(dates3>"2006-04-05" & dates3<datelim)
Cdat=(dates1>"2006-04-05" & dates1<datelim)

debit_mod3=data3[Cdat2]
debit_Crupet2=debit_Crupet[Cdat]

#Graphique
test2=debit2[Cdat2]-debit_Crupet2
```

```

plot(dates1[Cdat],debit_Crupet2,col="red",type="l",cex=0.1, xlab="Temps [années]",ylab="Débits [m3/s]
main="Ajustement des courbes du débit modifié à Crupet")
points(dates1[Cdat],debit_mod3,cex=0.5,type="l",col="blue")
points(dates1[Cdat],debit2[Cdat], cex=0.5,type="l",col="green")
legend(2004,0.5,legend=c("Courbe d'ajustement","Courbe ajustée",
"Débit mesuré dans le Bocq"),lwd=c(1,1),col=c("red","blue","black"))

# Calcul de corrélation linéaire entre l'approximation et les données réelles
corr=lm(debit_Crupet2~debit_mod3)
print(summary.lm(corr)["coefficients"])
print(summary.lm(corr)["r.squared"])
RMSE=sqrt(mean((debit_Crupet2-debit_mod3)^2))
compa=RMSE/(mean(debit_Crupet2))*100
print(RMSE)
print(compa)

```

A.1.4 Débits modifiés du Crupet

Le programme suivant permet de calculer le débit modifié du Crupet en soustrayant les débits naturels les débits prélevés sur le bassin versant du Crupet.

```

#Lecture du fichier de données
donnees= read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/calcul_M/crupet_1994-2007.txt",sep="/"))

dates_brut=donnees[,1]
debits_brut=donnees[,2] #m3/jour

#Calcul des débit prélevés
debits_prel=debits_brut/(24*60^2) # idem en m3/sec
names(debits_prel)=dates_brut

#On écrit le résultat dans un fichier
write.table(debits_prel,file=paste(chemin,"Crupet_R/calcul_M/debit_prel.txt",sep="/"),
quote=FALSE,row.names=TRUE,col.names=FALSE)

#Il faut associer à chaque débit prélevé le débit naturel (N) du Crupet pour chacune des dates

#On lit les données du fichier contenant les débits naturels
debits_naturels=read.table(file=paste(chemin,"Crupet_R/Bocq_naturel/naturel_Crupet.txt",sep="/"))

#On extrait du fichier les débits naturels
date_nat=debits_naturels[,1]
debits_nat=debits_naturels[,2]
names(debits_nat)=date_nat

names(debits_nat)=as.Date(names(debits_nat),format="%d/%m/%Y")
dates=as.Date(names(debits_prel),format="%d/%m/%y")
names(debits_prel)=dates

```

```

#On calcule le débit réel (diff)
debits_nat=debits_nat[names(debits_prel)]
diff=debits_nat-debits_prel
diff[(diff<0)]=0 # pas de débit négatif, on le considère comme nulle

#Fichier de sortie date, debit naturel, débit modifié
date=format(dates,"%d/%m/%Y")
resultat1=cbind(date,debits_nat,diff)
write.table(resultat1,file=paste(chemin,"Crupet_R/calcul_M/debits_final.txt",sep="/"),
quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)

# Création du fichier de sortie

debits_nat[is.na(debits_nat)]=-1
diff[is.na(diff)]=-1

dates2=dates+length(dates)

vecteurdates=c(dates,dates2)
vecteurdeb=c(debits_nat,diff)
resultat=cbind(format(vecteurdates,"%d/%m/%Y"),format(vecteurdeb,decimal.mark = ",",digits=8))

write.table(resultat,file=paste(chemin,"Crupet_R/calcul_M/Crupet_final.txt",sep="/"),sep="\t",
quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)

```

A.1.5 Elaboration du système d'équations

Le programme suivant permet de créer des fichiers de débits modifiés à tester dans le programme RVA. On peut modifier les taux et les seuils. Un nouveau fichier est ensuite construit tel qu'il soit lisible par le logiciel RVA. Il faut donc que les dates soient dans le bon format et que les données manquantes soient signalées par la valeur -1.

```

# Lecture du fichier
table= read.table(file("/users/laura/Desktop/Crupet_R/calcul_M/debits_final.txt"))

# Extraction des dates et mise au format de "R"
dates=as.Date(table[,1],format="%d/%m/%Y")

# Extraction des données (débit naturel et débit modifié)
debnat=table[,2]
debmod=table[,3]
debnat[is.na(debnat)]=-1

# On définit le nom des données 2 (mensuelles) comme étant le nom du mois et l'année
names(debnat)=dates
names(debmod)=dates
names(dates)=dates

```

```

# Calcul du débit prélevé
debprel=debnat-debmod

#Différentes condition qui interviennent dans le système d'équations
Cond=(months(dates)=="août")
Cond2=(months(dates)=="septembre")
seuil1=0.5
seuil2=1.5
seuil3=2.0
taux1=0
taux2=0.15
taux3=0.25
C1=debnat<seuil1
C2=debnat>=seuil1 & debnat<seuil2
C3=debnat>=seuil2 & debnat<seuil3

#Système d'équation pour lequel les conditions ont été adaptées
# et qui calcule les débits que l'on peut prélever tel que l'altération
#soit inférieure à 67% pour tous les paramètres IHA

debprelbis=debnat
debprelbis[C1]=0
debprelbis[C2]=debnat[C2]*(taux2-taux1)/(seuil2-seuil1)*(debnat[C2]-seuil1)

debprelbis[C3]=debnat[C3]*(taux3-taux2)/(seuil3-seuil2)*(debnat[C3]-seuil2)

debprelbis[debnat>seuil3]=debnat[debnat>seuil3]*(taux3)
debprelbis[Cond]=debnat[Cond]*0.05
debprelbis[Cond2]=debnat[Cond2]*0.05
debprelbis[debnat==--1]==-1

#Quantité totale d'eau captée par an
captotann=sum(debprelbis[debnat!=-1])*60*60*24/length(debnat[!is.na(debnat)])*365

#Nouveaux débits modifiés du Crupet quand on modifie les prélèvements
debmod2=debnat-debprelbis
debmod2[debnat==--1]==-1

#Nouveau vecteur dates
dates2=dates+length(dates)

vecteurdates=c(dates,dates2)
vecteurdeb=c(debnat,debmod2)

#Vecteur résultat
resultat=cbind(format(vecteurdates,"%d/%m/%Y"),format(vecteurdeb,decimal.mark = ",",digits=8))

print(captotann)

# Et on écrit le résultat dans un fichier bidon3.txt
write.table(resultat,file="/users/laura/Desktop/bidouillage/fichier.txt",sep="\t",
quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)

```

```

#Taux de prélèvement moyen de Vivaqua
taux=debpriel/debnat
mean(taux[!is.na(taux)])

#Graphique
Condition1= debprelbis<=-1
debprielbis[Condition1]=NA
Condition2= debnat<=-1
debnat[Condition2]=NA

plot(dates, debprelbis,col="red",type="l",cex=0.1, xlab="Temps [années]",
ylab="Débits prélevés [m3/s]",main="Débits prélevés sur le Crupet")
points(dates,debpriel,cex=0.5,type="l",col="blue")
points(dates,debnat,cex=0.5,type="l",col="green")

legend(2004,0.5,legend=c("Débits prélevés actuellement","Débits prélevés suggérés"),
lwd=c(3,3),col=c("red","blue"))

```

A.2 Programmes «R» - Méthode du périmètre mouillé

Le programme présenté ci-dessous a été utilisé afin de construire les graphiques du périmètre mouillé en fonction du débit. Ce sont en effet ces graphiques qui permettent de déterminer le débit réservé qui convient à un cours d'eau quand on utilise la méthode du périmètre mouillé.

```

#Coordonnées (x,y) du transect où est effectué le jaugeage
# Octobre point 3
x310=c(0,0.25,0.75,1.25,1.75,2.25,2.75,3.25,3.75,4.25,4.75,5)
y310=c(0,0.33,0.38,0.44,0.5,0.5,0.54,0.63,0.65,0.63,0.45,0)
#Débit mesuré lors du jaugeage
D310=0.309628

# Pente du radier
ir=0.015

x0=x310
y0=y310
Q=D310

#Paramètres utiles aux calculs de la surface mouillée et du périmètre mouillé
N=length(y0)

xmax=max(x0)
f=approxfun(x0,y0)

dx=0.01
x=c(0:100)*xmax/100
y=f(x)

```

```

quartz()
plot(x,y,type="l")
prof=max(y)
xprof=x[which.max(y)]

df=(f(x+dx)-f(x))/dx
ds=splinefun(x,sqrt(1+df^2))

#Graphique du profil en travers du transect
plot(x,prof-f(x),cex=0.8,type="l",xlab="Distance à la berge [m]",ylab="Hauteur [m]",
main="Profil en travers du Crupet au point de mesure")

#Calcul du périmètre mouillé et de la surface mouillée (intégrations)
S0=integrate(f,0,xmax)[[1]]
print(c("Surface",S0))
P0=integrate(ds,0,xmax)[[1]]
print(c("Périmètre mouillé",P0))
print(c("Débit",D))
n=S0^(5/3)*ir^(1/2)/Q/P0^(2/3)
print(c("Coefficient de Manning",n))

#Calcul des racines et intégration entre les racines
S=c()
P=c()
nbp=20
for (h in c(0:nbp)*prof/nbp) {
f2=splinefun(x,f(x)-h)
x1=uniroot(f2,c(0,xprof))[[1]]
x2=uniroot(f2,c(xprof,xmax))[[1]]
S1=integrate(f2,x1,x2)[[1]]
P1=integrate(ds,x1,x2)[[1]]
S=c(S,S1)
P=c(P,P1)
}

#Calcul du débit par la formule de Manning
Q=S^(5/3)/n/P^(2/3)*ir^(1/2)

#Graphique de l'évolution du périmètre mouillé en fonction du débit
quartz()
plot(Q,P,xlab="Q - débit [m3/s]",ylab="P - périmètre mouillé [m]",
main="Périmètre mouillé en fonction du débit")

```

Annexe B

EVHA - tests de l'impact d'une modification des D84 sur les courbes SPU

L'objectif est de montrer quel est l'impact d'une modification du D84 sur les courbes SPU et donc sur l'estimation du débit réservé à appliquer au cours d'eau.

B.1 Tableau des D84

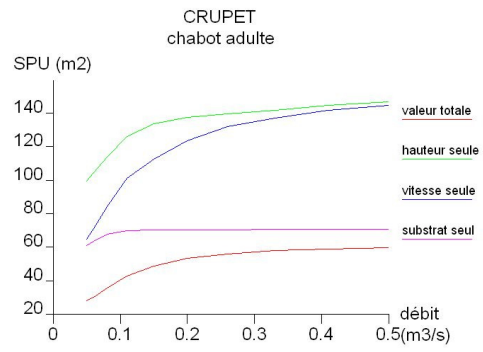
Le tableau B.1 présente les D84 qui ont été testés dans EVHA lors du calage hydraulique. Signalons que le calage hydraulique résultant des trois premiers test est assez correct. On observe juste un léger surhaussement de la ligne d'eau. Ce n'est pas le cas des deux derniers tests. Pour le test n°4, les D84 sont nettement surestimer ce qui entraîne une élévation de la ligne d'eau par rapport au débit observé. Pour le test n°5, la ligne d'eau est trop basse, les D84 sont sous-estimés.

TAB. B.1: Tableau présentant les D84 testés dans EVHA

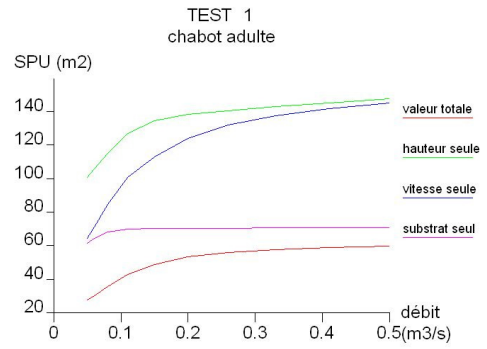
Calage EVHA	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
0,11	0,11	0,11	0,11	0,17	0,08
0,07	0,07	0,07	0,08	0,15	0,08
0,16	0,16	0,16	0,16	0,18	0,08
0,20	0,20	0,15	0,17	0,20	0,10
0,20	0,10	0,15	0,13	0,20	0,10
0,01	0,13	0,12	0,11	0,15	0,11
0,01	0,13	0,12	0,10	0,15	0,09
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,10
0,02	0,15	0,16	0,15	0,19	0,11

B.2 Graphiques des SPU du chabot adulte

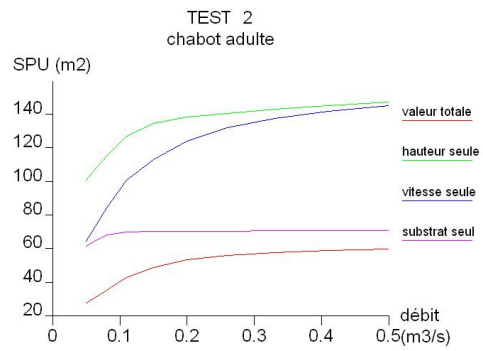
Pour les trois premiers tests, nous avons essayé d’approcher au mieux la réalité du terrain lors de la modification des D84. Le résultat est que les graphiques des figures B.1a, B.1b, B.1c, B.1d sont très semblables. Les modifications des D84 influent donc très peu sur les courbes SPU. Les graphiques des figures B.1e, B.1f subissent des translations selon l’axe y . Comme les D84 sont fortement éloignés de la réalité, les calages de la ligne d’eau ne sont plus corrects. En conclusion lors d’une modification des D84, tant que la ligne d’eau calée reste proche de la ligne d’eau observée, il n’y a pas de modification visible de courbes SPU. Si on s’éloigne de la réalité du terrain, la ligne d’eau ne sera plus bien calée et les valeurs des SPU ne seront plus fiables.



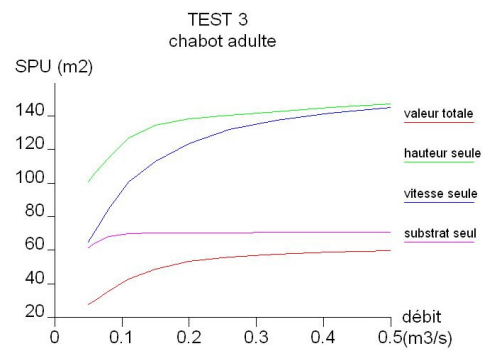
(a) D84 Calage EVHA



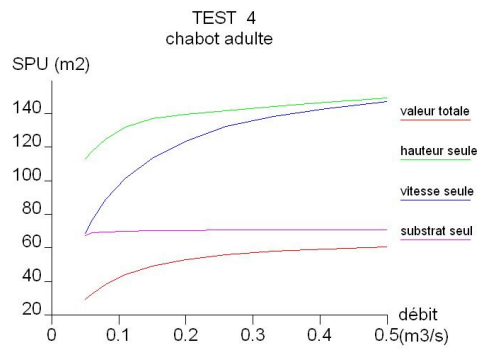
(b) D84 test 1



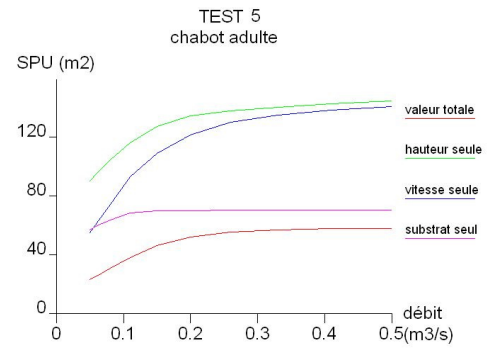
(c) D84 test 2



(d) D84 test 3



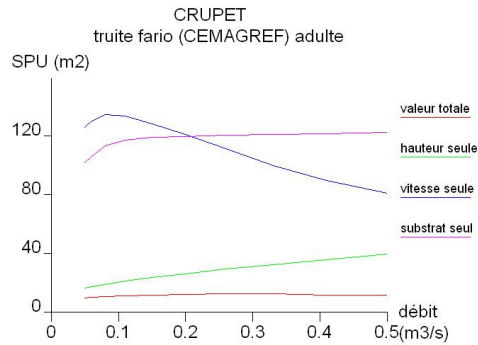
(e) D84 test 4



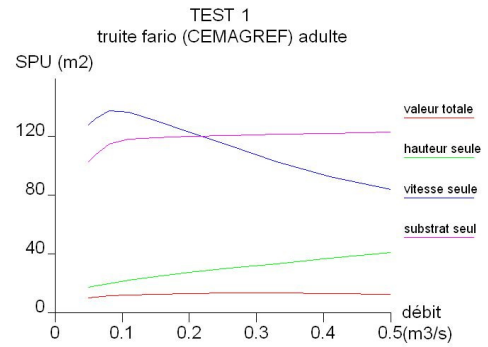
(f) D84 test 5

FIG. B.1: Valeur de la SPU pour le chabot adulte

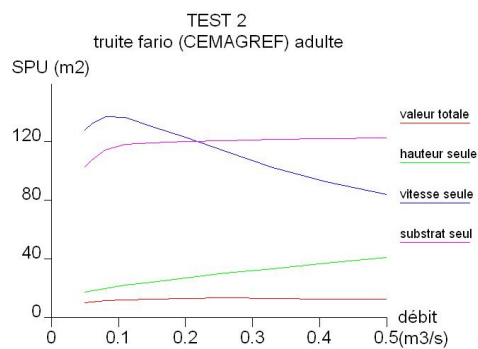
B.3 Graphiques des SPU de la truite fario adulte



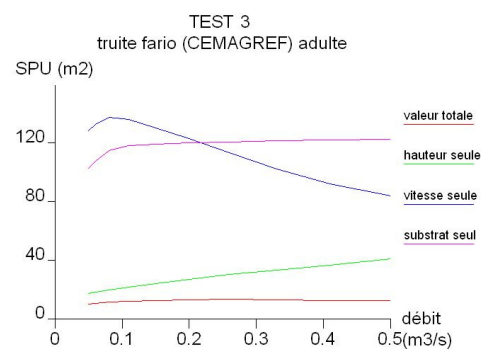
(a) D84 Calage EVHA



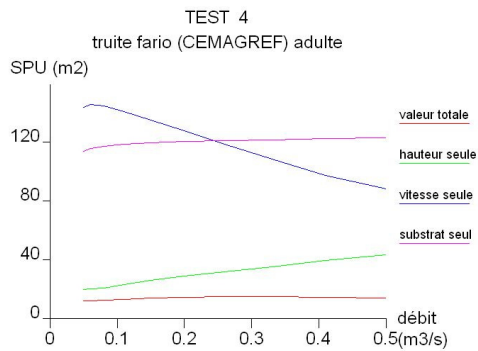
(b) D84 test 1



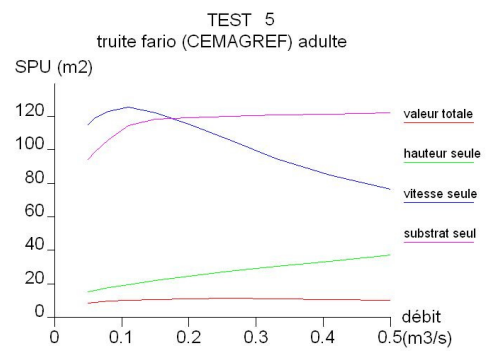
(c) D84 test 2



(d) D84 test 3



(e) D84 test 4



(f) D84 test 5

FIG. B.2: Valeur de la SPU pour la truite fario adulte

La conclusion est la même que pour la section B.2.

B.4 Graphiques des SPU de la truite fario aux différents stades de développement

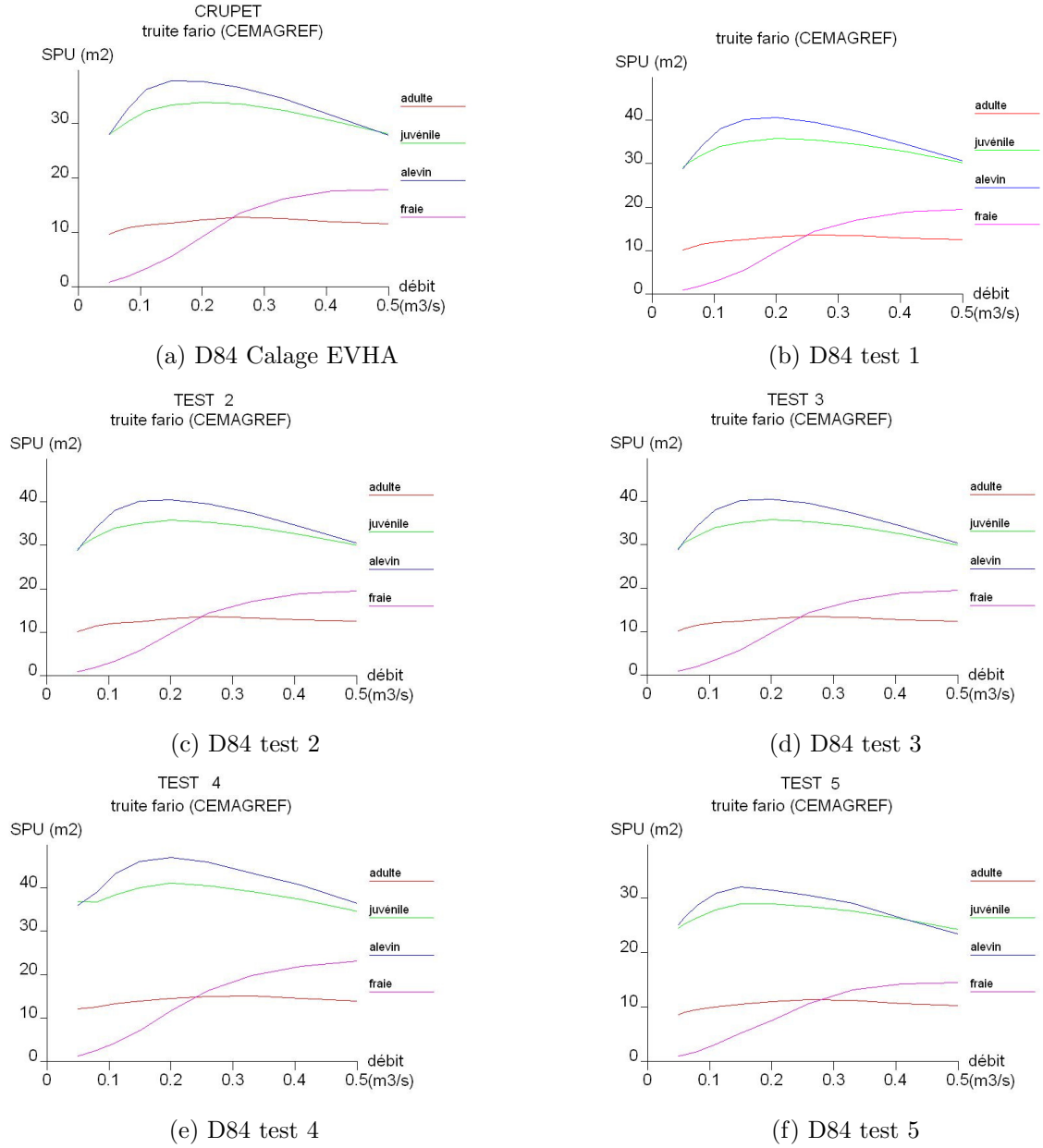


FIG. B.3: Valeur de la SPU pour la truite fario aux différents stades de développement

La conclusion est la même que pour la section B.2.