HAL open science

Vers une nouvelle génération de modèles d'habitats numériques.

Oriane Prost, Y. Le Coarer, Nicolas Lamouroux, Hervé Capra

To cite this version:

Oriane Prost, Y. Le Coarer, Nicolas Lamouroux, Hervé Capra. Vers une nouvelle génération de modèles d'habitats numériques.. [Rapport de recherche] irstea. 2014, pp.34. hal-02605566

HAL Id: hal-02605566

https://hal.inrae.fr/hal-02605566v1

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thème 7 - Action 4 livrable au titre de l'année 2014

Vers une nouvelle génération de modèles d'habitats numériques.

UR HYAX-MALY

Oriane PROST (Irstea)
Yann LE COARER (Irstea)
Nicolas LAMOUROUX (Irstea)
Hervé CAPRA (Irstea)

Résumé

La méthode des micro-habitats est une méthode de caractérisation de l’état écologique des cours d’eau qui a largement été utilisée depuis le début des années 80. Cette méthodologie composée d’un modèle hydraulique et d’un modèle biologique a fait l'objet de développements logiciels qui ont été largement utilisés. Une nouvelle génération de modèles s'avère nécessaire compte tenu de l'obsolescence de la première génération d'outils.
Des modèles hydrauliques plus complets offrent la possibilité d'une meilleure description de l’habitat selon l’échelle de l’analyse.
Afin d’intégrer les capacités des modèles existants, tant numériques que statistiques, il semble intéressant de développer une interface capable de gérer les différentes entrées hydrauliques et biologiques pour fournir une évaluation de l’habitat potentiel plus réaliste.

Mots clés

Micro-habitats, modèles hydrauliques, débits écologiques, interface.

Sommaire

Résumé 2
Mots clés 2
Sommaire 3
Liste des abréviations 4
I Introduction 5
II Etat de l'Art 7
III Les différents types de modélisation hydraulique numérique 12
IV La modélisation hydraulique numérique pour la méthode des micro-habitats 16
V Les différents scénarios 20
VI Conclusion 29
Liens Internet 30
Références 31
Annexes 35

Titre complet de l'action: Débits écologiques – modèles d'habitat
Définir les régimes hydrologiques compatibles avec le bon fonctionnement des milieux :
Relation hydrologie – biologie, calcul des Débits Minimum Biologiques, des modèles d'habitat.
Objectifs de l'opérateur: Préservation – restauration des milieux aquatiques.
Description de l'action au titre de la convention 2013-2015: Enquête sur les modèles hydrauliques 1,5D et 2D Français ou étrangers qui permettraient d'interfacer une nouvelle génération de modèles d'habitats. Synthèse collective et recommandations opérationnelles pour les orientations futures des outils de recherche et d'aide à la décision. Il s'agit d'orienter le remplacement des modèles numériques actuellement utilisés (EVHA, obsolète), indispensables notamment pour les applications en restauration et gestion des éclusées.

Liste des abréviations

1D : Modèle hydraulique unidimensionnel
1,5D : Modèle hydraulique pseudo bidimensionnel
2D : Modèle hydraulique bidimensionnel
3D : Modèle hydraulique tridimensionnel
CEA : Commissariat à l'Energie Atomique
DCE : Directive Cadre européenne sur l'Eau
DMB : Débit Minimum Biologique
DOM : Département d'Outre-Mer
EDF : Électricité de France
H,V,S : Hauteurs, Vitesses, Substrat
IFIM : Instream Flow Incremental Methodology
MNT : Modèle Numérique de Terrain
Q : Débit
RSS : River System Simulator
SPU : Surface Pondérée Utile
VH : Valeur d'Habitat
VPU : Volume Pondéré Utile

I Introduction

La population mondiale a été multipliée par 4 depuis le début des années 1900. Plus cette population croit, se développe, et plus son impact sur l'environnement dans lequel elle interagit est important. Cette pression est source de fortes perturbations sur la diversité des organismes vivants (profusion d'espèces invasives, disparition d'espèces autochtones, restructuration des communautés), ce qui bouleverse profondément l'équilibre naturel de notre planète.

Ces perturbations touchent particulièrement les espèces aquatiques. En Amérique du Nord, le taux d'extinction des espèces d'eau douce est évalué comme étant cinq fois plus rapide que celui des espèces terrestres (Ricciardi and Rasmussen 1999). En connaissance de causes, de nombreuses nations ont souhaité développer des plans de gestion, des programmes d'action (e.g. restauration), permettant de préserver la qualité des systèmes aquatiques, en particulier l'habitat physique, pour préserver les espèces qui évoluent dans ces systèmes.

A l'échelle nationale, différents objectifs de préservation de la faune aquatique sont poursuivis comme l'atteinte du « bon état » des eaux selon les termes posés par la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) ou la définition de débits "écologiques" pour limiter les altérations sur les communautés à l'aval des ouvrages construits dans le lit des rivières. La réalisation de ces deux objectifs passe entre autres par des travaux de restauration des cours d'eau et par l'étude de l'impact des modifications de régimes sur les communautés aquatiques. Les enjeux opérationnels se situent à l'échelle des tronçons de cours d'eau (e.g. débits réservés à l'aval des ouvrages) et des bassins versants (e.g. définition de débits d'objectifs d'étiage et de volumes prélevables).

Dans la plupart des pays développés, afin d'atteindre les objectifs fixés par les gouvernements pour la préservation de la qualité physique des habitats, des outils d'aide à la décision sont mis en place. Ces outils sont basés sur l'importance des relations entre les débits et les espèces aquatiques. Ils peuvent être classés selon deux approches complémentaires et non exclusives : l'approche hydrologique basée sur le paradigme du régime naturel (Poff *et al*. 1997) et l'approche hydraulique/habitat basée sur la méthode des micro-habitats (Bovee 1982).

La méthode des micro-habitats (ou IFIM : Instream Flow Incremental Methodology en anglais) a émergé aux Etats-Unis au début des années 80 pour être ensuite reprise dans de nombreux pays et spécifiée selon les caractéristiques biologiques et géographiques de chacun. Des exemples de logiciels associés sont RYHABSIM développé en Nouvelle-Zélande, PHABSIM aux Etats-Unis, EVHA en France, RSS en Norvège ou encore HydroSIM-H2D2 au Canada.
Cette méthode est basée sur l'association d'un modèle hydraulique, permettant de décrire l'habitat hydraulique d'un tronçon de cours d'eau (vitesses, hauteurs d'eau ou forces de frottement) selon différents scenarios de débits, avec un modèle biologique, définissant les préférences d'habitats de différentes espèces (souvent des poissons) à différents stades de croissance.

Les modèles hydraulique/habitat sont largement utilisés dans le monde (Tharme 2003) mais ils sont aussi souvent critiqués, entre autres, à cause de l'imprécision de leur composante hydraulique.

Quels que soient les poids donnés aux approches hydrologiques et/ou habitat, les modèles d'habitat hydraulique ont l'avantage de traduire l'information débit en variables hydrauliques plus « adaptées » à la description des habitats physiques puis en qualité de l'habitat pour les organismes. C'est pourquoi l'intégration de paramètres hydrauliques est fortement recommandée, jusqu'au sein des approches hydrologiques les plus avancées (Poff *et al*. 2010). Néanmoins, la réflexion sur le degré d'utilisation des modèles d'habitat hydraulique et leur choix est en évolution. Les capacités en termes de mesures de terrain et de puissance informatique sont en continuel progrès et peuvent être utilisées pour améliorer la qualité des résultats fournis par les modèles d'habitat. Par ailleurs la connaissance des espèces aquatiques s'approfondit, révélant toujours plus la grande complexité des hydrosystèmes.

Pour faire face aux besoins opérationnels, les réflexions nationales pour chercher à améliorer les capacités de la méthode des micro-habitats et/ou pour l'intégrer dans une démarche plus générale se poursuivent (Lamouroux et al.,in prep.).

Le présent rapport développe une réflexion sur les possibilités d'interfaçage des modélisations hydrauliques numériques avec une nouvelle génération de modèles d'habitats. Il se divise en quatre parties.
La première partie expose l'état de l'art des méthodes de type micro-habitats et de leurs utilisations en France. La seconde partie introduit les différents types de modélisations hydrauliques numériques et leur utilisation en hydrobiologie. La troisième partie se concentre sur l'utilisation de la modélisation hydraulique pour la méthode des micro-habitats. Et enfin, la quatrième partie présente les scénarios envisagés pour le développement d'une nouvelle génération de modèles d'habitat.

II Etat de l'Art

1) La méthode des micro-habitats

La méthode des micro-habitats tente de prédire la quantité d'habitat potentiellement favorable pour différents taxons aquatiques, sur un ou plusieurs tronçons représentatifs d'un cours d'eau, en fonction de différents paramètres décrivant les valeurs locales des hauteurs d'eau, des vitesses d'écoulement et du substrat (H,V,S)[1]. Pour cela, un modèle hydraulique simulant les conditions hydrodynamiques de la zone d'étude est couplé à un modèle biologique représentant les préférences d'habitat des taxons (Bovee 1982).
Pour une espèce à un stade de développement donné (Adulte, Juvénile, Alevin pour les poissons) et pour chacune des trois variables (H,V,S), un modèle de préférences (le plus fréquemment une « courbe de préférences » à valeur entre 0 et 1) qualifie l'habitat. Les variables (H,V,S) sont considérées comme indépendantes. Pour chaque simulation de débit (Q), les tronçons sont partitionnés en micro-habitats (unité de maille du modèle hydraulique) avec des valeurs associées (H,V,S). Ces surfaces élémentaires sont pondérées par le produit des préférences et qualifient donc une surface pondéré utile (SPU). La SPU de toutes les mailles élémentaires calculée pour un débit donné est ensuite sommée à l'échelle du tronçon (SPU_{tot}) et la valeur d'habitat (VH) est la SPU_{tot} du tronçon divisée par la surface mouillée totale au même débit.

Les résultats finaux de la modélisation fournissent pour chaque stade de développement d'espèce ou de guilde d'espèces une courbe de SPU_{tot} et une courbe de VH en fonction du débit. Reste alors à l'utilisateur à analyser et interpréter ces résultats dans leurs contextes.

Notons que :

- dans la majorité des applications les modèles hydrauliques utilisés génèrent des conditions hydrauliques locales (H,V)=f(Q), mais les caractéristiques substrat (S) sont considérées comme fixes. Le substrat n'est alors pris en compte qu'au sein des "cellules" en eau ;
- les courbes de préférences des espèces peuvent différer d'un cours d'eau à un autre. Leur construction initiale est coûteuse car elle nécessite d'acquérir sur le terrain un grand nombre d'échantillonnages piscicoles de micro-habitats associés à des mesures (H,V,S).

La méthode des micro-habitats fait l'objet de controverses scientifiques depuis son origine jusqu'à nos jours (Lamouroux et al. 2010; Lancaster and Downes 2010; Mathur *et al*. 1985) pour être soit trop simpliste par rapport à la complexité de l'utilisation de l'habitat, soit trop complexe par rapport à une approche purement hydrologique. Elle a été développée à l'origine essentiellement pour les rivières à salmonidés. Son emploi s'est ensuite élargi aux cortèges d'espèces et aux tronçons situés plus à l'aval dans le réseau hydrographique. Elle reste pour

[1] *L'échelle du micro-habitat est de l'ordre du* m^2

l'heure une des méthodes les plus utilisées dans le monde et en France pour la préconisation des débits écologiques dans les cours d'eau (Tharme 2003).

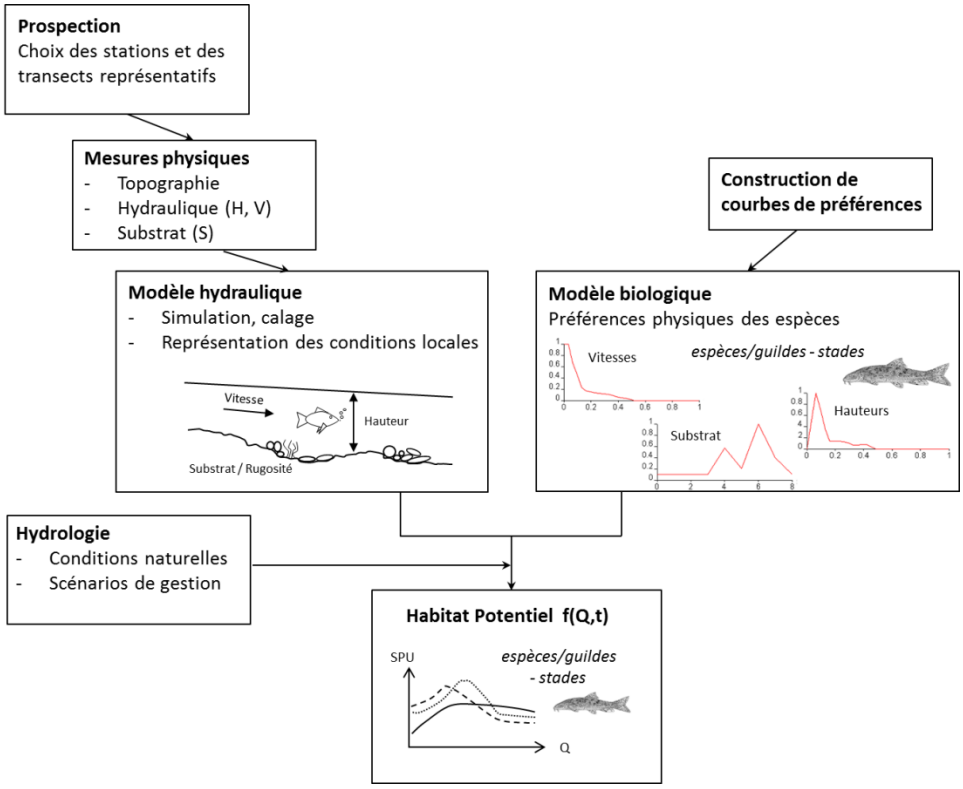


Figure 1: Principe général de la méthode des micro-habitats.

Comme énoncé précédemment, cette méthodologie des micro-habitats a été reprise pour développer des modèles adaptés aux spécificités géographiques, hydrologiques et biologiques nationales. Trois modèles développés au sein de l'Irstea et un modèle conçu par la Direction des Etudes et Recherches d'EDF sont aujourd'hui utilisés en France.

- Le modèle EVHA (Irstea et Ministère de l'Environnement) : Son protocole d'utilisation nécessite de réaliser des mesures (H,V,S) le long de transects et de topographier leur emprise de représentativité à un débit donné. Un calage de ligne d'eau est recommandé à d'autres débits, mais cela n'est jamais fait en pratique. Un calage de modèle hydraulique 1D de type fluvial s'effectue à partir de relevés de lignes d'eau de façon automatique ou manuelle. Aux débits modélisés, une redistribution transversale (le long de chaque transect) de la vitesse moyenne de chaque section est réalisée, ce qui permet de considérer le modèle hydraulique comme du type 1,5D. Pour "s'adapter" aux fortes rugosités des rivières à truites et pour les calculs de perte de charge linéaire, la formule de Limerinos est utilisée pour faire varier les coefficients de rugosité avec le débit. Le modèle biologique est à base de courbes de préférences.

- Le modèle ESTIMHAB (Irstea) : C'est un modèle statistique réalisé en 2002 à partir de différentes études de cas conduites avec le logiciel EVHA (Lamouroux, 2008). Pour obtenir les résultats globaux du logiciel EVHA (courbes de SPU_{tot} et VH en fonction du débit, à l'échelle du tronçon), le protocole ESTIMHAB permet de réduire significativement les mesures de terrain. L'utilisation d'ESTIMHAB ne nécessite pas de levé topographique mais se base essentiellement sur des mesures régulièrement espacées de largeurs et de profondeurs moyennes à deux débits différents. Le modèle biologique est à base d'équations par espèces/stades ou guildes d'espèces, mais uniquement celles "apprises" grâce à des simulations de type EVHA.

- Le modèle LAMMI (EDF) : Il a été développé en collaboration avec l'Irstea, l'ENSAT, l'Onema et le bureau d'étude ECOGEA. Son protocole met en œuvre des mesures (H,V,S) le long de transects à plusieurs débits. Ces opérations sont d'autant plus réalisables que le débit peut être contrôlé à l'aval d'ouvrages existants. Entre les débits ayant fait l'objet de mesures, les conditions hydrauliques locales sont redistribuées sur chaque transect à partir de leurs valeurs moyennes ($\bar{H}$, $\bar{V}$). Celles-ci sont interpolées pour chaque transect à partir de lois générales avec le débit (Q) : $\bar{H} = a_h Q^{b_h}$ $\bar{V} = a_v Q^{b_v}$ (avec a_v,b_v,a_h,b_h paramètres de calage).
  Le modèle biologique est à base de courbes de préférences.

- Le modèle STATHAB (Irstea) : Il est composé d'un modèle hydraulique statistique qui peut être couplé à des modèles de préférences uni- ou multivariés (Lamouroux *et al*. 1999). Il a été développé sur des cours d'eau tempérés et une version existe pour les rivières à fortes pentes et fortes granulométries telles les rivières alpines ou les rivières tropicales des DOM [STATHAB2 ; Girard *et al*. (2013)], ou encore pour des cas s'articulant hors du champ opérationnel des méthodes classiques de micro-habitats. Une limite des modèles STATHAB est qu'ils prédisent les distributions de variables hydrauliques de façon indépendantes. Jusqu'ici, ces modèles ont été librement mis à disposition mais ne font pas l'objet de diffusion/formation. Le modèle FSTRESS est un équivalent de STATHAB pour les macro-invertébrés, basé sur une modélisation statistique des contraintes de cisaillement exercées sur le lit du cours d'eau.

Ces quatre logiciels constituent des applications de la méthode des micro-habitats. Leurs manuels d'utilisation comportent de nombreuses mises en garde aux utilisateurs requérant de leur part des connaissances sur les dynamiques de fonctionnement physique et écologique des cours d'eau et une expertise notamment:

- dans le choix des emplacements des mesures hydrauliques aux fins de représentativité,
- dans la prise en compte des autres paramètres biotiques et abiotiques du milieu,
- dans l'analyse critique des sorties du logiciel qu'il faut replacer dans leur contexte hydrologique.

Seuls les logiciels EVHA et, de façon sommaire, LAMMI fournissent une cartographie simulée de l'habitat.

Ces logiciels présentent certaines limites d'utilisation. Par exemple, le domaine d'application d'EVHA concerne de petits cours d'eau ayant une pente comprise entre 0,2 et 5 %, un module inférieur à 30 m3/s avec une largeur au miroir inférieure à 20 m.
Précisons aussi que pour l'heure les courbes de préférences ne sont pas disponibles pour toutes les espèces présentes en France et que d'après les tests existants la question de la transférabilité de ces courbes d'un bassin versant à l'autre reste variable suivant les taxons (Bain, 1995; Guay *et al*., 2003; Lamouroux *et al*., 1999; Lamouroux *et al*., 2013).
De plus, il n'y a plus de mise à jour disponible pour le modèle EVHA qui ne peut désormais fonctionner sous les versions 7 et 8 de Windows qu'avec une machine virtuelle Windows XP.

Malgré cela ESTIMHAB pourrait être adaptable à de nouvelles courbes de préférences. Pour ce faire il faudrait :

- constituer une base de données à partir de simulations hydrauliques EVHA,
- écrire un programme pour générer, à partir de nouvelles courbes et de la base de données, les sorties EVHA pour en déduire instantanément les équations de préférences ESTIMHAB.

De tels développements sont à peser avec une possible utilisation de STATHAB/FSTRESS, qui est utilisable avec différentes courbes de préférences.

La méthode des micro-habitats est un outil largement utilisé et les modèles développés pour l'appliquer sont constament enrichis afin d'améliorer leurs simulations et renforcer la justesse de leurs résultats. Très tôt le principal artisan de la méthodologie des micro-habitats Bovee (1996) imaginait que des progrès pourraient être faits par un apport de nouvelles métriques d'habitat et par l'utilisation de la modélisation hydraulique bidimensionnelle (2D).
Nos collègues européens et outre-Atlantique étudient ainsi, depuis plusieurs années, l'intérêt du passage à la modélisation hydraulique 2D. Les exemples d'utilisations du 2D pour des projets de réhabilitation de cours d'eau (Brown and Pasternack 2009; Dørge and Windolf 2003; Jay Lacey and Millar 2004; Pasternack *et al*. 2004) ou pour des études d'impact de gestion des éclusées (Boavida *et al*. 2013; Hauer *et al*. 2013b) sont nombreux.
Cette utilisation du 2D se fait soit par l'intermédiaire de modèles classiques d'hydraulique (RMA2 [USA], SRH-2D [USA], Mike 21 [Danemark]), soit par l'emploi de modèles « complets » combinant une modélisation hydraulique et une modélisation biologique (River2D [Canada]).

Les plus grosses attentes pour l'amélioration des simulations des modèles d'habitat se portent sur les modèles biologiques qui s'enrichissent et se diversifient depuis plusieurs années. Au-delà des modèles standards définis par des courbes de préférences tout un panel de méthodes statistiques multivariées se développe (Ahmadi-Nedushan *et al*. 2006). Parmi ces modèles multivariés, les modèles « flous » (Boavida *et al*. 2014; Lane *et al*. 2006) sont utilisés dans les cas où l'information disponible est incomplète et apparaissent plus aptes à gérer les incertitudes. Les régressions linéaires multiples (Vadas Jr and Orth 2001), les régressions logistiques (Filipe *et al*. 2002) ou encore les réseaux de neurones (Muñoz-Mas *et al*. 2014) sont aussi des alternatives pour modéliser les préférences d'habitat.

2) L'emploi de la méthode des micro-habitats en France

En France, la méthode des micro-habitats a été définie à l'origine pour fournir un outil d'aide à la décision dans deux cas distincts:

- pour le choix des débits minimums à définir à l'aval des ouvrages hydrauliques de rétention nécessaires au bon développement de la vie aquatique (réf. : loi de 1919 sur l'énergie hydraulique et son complément l'article L214-18 du code de l'Environnement),
- pour la gestion quantitative de la ressource avec la définition des volumes prélevables nécessaires pour concilier les besoins en eau des hommes et des communautés aquatiques (réf. : loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006).

Les bureaux d'études sont les premiers utilisateurs de la méthode des micro-habitats. Ils doivent être intégrés au processus de réflexion développé ici. Une enquête a donc été réalisée pour récolter les avis et les attentes de ces utilisateurs sur les différents modèles qui permettent d'implémenter la méthode des micro-habitats.
Environ la moitié de la trentaine de bureaux contactés sont des utilisateurs d'une des méthodes d'habitat. Pour la grande majorité, ils utilisent le modèle statistique ESTIMHAB. Quelques utilisations du modèle EVHA sont recensées dans des cas où le contexte spatial est particulier ou lorsque les gestionnaires le réclament spécifiquement. Par contre, les modèles LAMMI et STATHAB sont peu utilisés.

ESTIMHAB est le modèle le plus répandu pour 2 raisons principales :

- tout d'abord, c'est un modèle plus facile et moins coûteux à utiliser. En effet, il n'y a pas de topographie à réaliser donc pas besoin de compétences particulières en géomatique, et il n'y a pas non plus de calage et de validation du modèle à faire donc pas besoin de compétences poussées en hydraulique,
- ensuite, le modèle EVHA n'est plus développé et les problèmes, qui découlent en majorité de cet arrêt, sont de plus en plus difficiles à gérer.

Les bureaux d'études accueillent favorablement la réflexion entreprise pour définir le nouvel outil qui permettra de mettre en œuvre la méthode des micro-habitats. Ils désirent disposer d'un outil moderne et intuitif.
Quelques-uns ressentent les limites des modèles d'habitats tels qu'actuellement construits et souhaiteraient avoir un outil plus performant qui pourrait prendre en compte plus de paramètres de l'environnement aquatique comme la chimie de l'eau, la température ou encore le transport sédimentaire. Mais dans l'ensemble, ils veulent un outil facile qui ne demande pas d'acquérir des compétences supplémentaires pour l'utiliser. C'est pourquoi ils sont dans l'ensemble peu favorables à l'utilisation de la modélisation bidimensionnelle dans les modèles d'habitats. En effet, pour une bonne utilisation du 2D il faut des compétences accrues en hydraulique et des moyens logistiques importants. A priori les grosses structures semblent

avantagées dans cet exercice. Reste aux petits bureaux d'études les alternatives d'augmenter leurs compétences et leurs moyens ou de s'associer à des hydrauliciens.
Il apparait dans notre démarche, la nécessité de prendre en compte la culture française en hydraulique fluviale.

La problématique de la continuité écologique, notamment celle des passes à poissons aux niveaux des ouvrages hydrauliques, devient importante en France. C'est un domaine d'étude qui demande des compétences en hydrobiologie et en hydraulique et qui nécessite des modèles capables d'intégrer cette double compétence dans leurs simulations.

La modélisation fluviale par les bureaux d'études spécialisés est bien plus généralisée que celle des micro-habitats, car utilisable sur de nombreuses thématiques (inondations, aménagement de cours d'eau, …). Les logiciels permettant de faire de la modélisation hydraulique 1D ou 2D sont nombreux mais Telemac2D semble être le plus utilisé en modélisation bidimensionnelle et HEC-RAS en unidimensionnelle. Dans la suite de ce rapport nous allons nous intéresser plus particulièrement à la modélisation hydraulique numérique des modèles d'habitat et il est important de tenir compte du fait que ces deux logiciels sont les plus utilisés actuellement en France.

III Les différents types de modélisation hydraulique numérique

Les modèles hydrauliques numériques peuvent être classés selon qu'ils permettent de décrire les écoulements dans une, deux ou trois dimensions de l'espace. Les caractéristiques générales de chaque classe de modèle sont présentées ici afin de permettre une comparaison des atouts et inconvénients des uns par rapport aux autres en restant dans le contexte de la description de l'habitat pour les modèles biologiques.

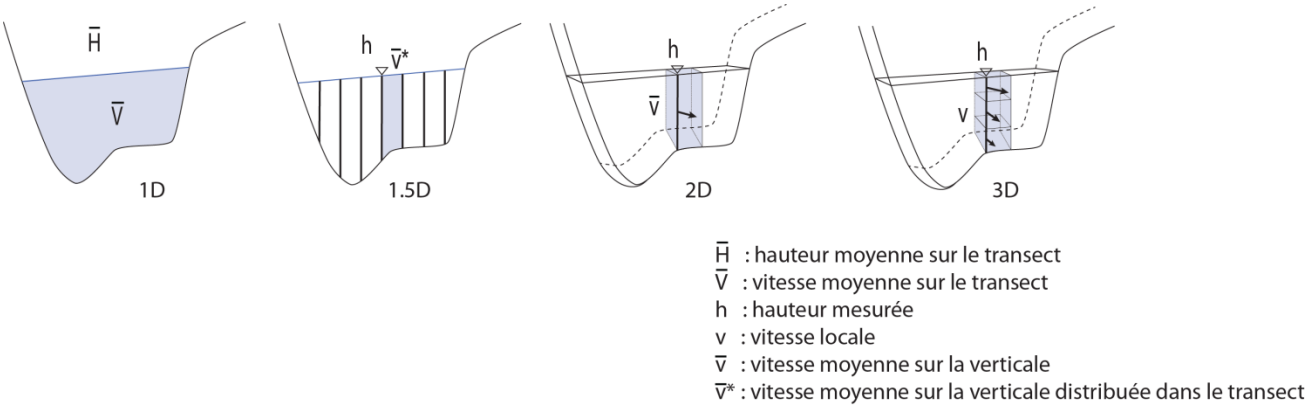


Figure 2 : Schéma de comparaison entre modèles 1D, 1,5D, 2D et 3D (inspiré de Maddock *et al.* (2013))

1) La modélisation unidimensionnelle

C'est un type de modélisation qui ne considère que les écoulements unidirectionnels. Des sections de mesures en travers de l'écoulement sont définies sur le linéaire de la zone d'étude où les mesures hydrauliques sont réalisées. Les modèles 1D permettent de résoudre de façon itérative les équations de conservation de l'énergie en régime permanent, pour des écoulements fluviaux ou transitoires, d'une section en travers à la suivante, pour obtenir les profils des niveaux d'eau.

Le principe du 1,5D :

La méthode des micro-habitats, nécessite des descriptions hydrauliques locales. Un modèle 1D fixe pour chaque débit simulé la surface de l'eau dans chaque géométrie de transect et donc les valeurs (H) locales. Si une distribution de vitesses est approximée dans le transect modélisé sous la contrainte de "retrouver" le débit simulé alors un modèle que certains nomment 1,5D (un faux 2D) est obtenu. C'est cette approche qui a globalement été mise en œuvre lors de l'avènement de la méthode des micro-habitats avec le logiciel EVHA notamment[2].

Les limites du 1D :

L'utilisation de modèles 1D / 1,5D pour décrire des écoulements qui s'effectuent dans les trois dimensions est une méthode simple d'utilisation mais qui aboutit à de grosses approximations.
Tout d'abord, ce type de modèle ne permet pas de décrire des phénomènes hydrauliques tels que les écoulements transverses, les zones de décollement et de recirculation (Crowder and Diplas 2000), les régions à forts gradients de vitesse ou encore les changements rapides de régime. De plus ces modèles ont une faible résolution spatiale et temporelle (Jowett and Duncan 2012), ils sont peu fiables pour les prédictions en dehors des plages de débits mesurés et gèrent très difficilement la ligne de rive ainsi que le transport de sédiments (Rathburn and Wohl 2003).

Pour certains auteurs les modèles 1D / 1,5D sont peu adaptés à la description des habitats à une échelle appropriée pour l'étude des populations aquatiques (Crowder and Diplas 2000; Ghanem *et al*. 1996; Lacey and Millar 2004; Macwilliams *et al*. 2006), d'où une utilisation croissante depuis une vingtaine d'années de la modélisation hydraulique bidimensionnelle dans le contexte d'études d'habitat.

[2] *Attention à la polysémie des termes 1D, 1,5D et 2D employés ici. Pour certains " ecohydrauliciens" anglo-saxons la terminologie 1D correspond à notre terminologie 1,5D. Et dans la culture de certains hydrauliciens le 1,5D correspond à du 1D avec débordement (casiers). Enfin, pour les hydrauliciens le terme 2D que nous utilisons correspond en fait à du 2DH (modèle horizontal), à ne pas confondre avec du 2DV (modèle vertical).*

2) La modélisation bidimensionnelle

C'est à partir du milieu des années 90 que des études d'évaluation de la qualité de l'habitat utilisant des protocoles 2D pour la modélisation hydraulique des cours d'eau commencent à apparaitre (Ghanem *et al*. 1996; Leclerc *et al*. 1995; Waddle *et al*. 1996).

La modélisation bidimensionnelle consiste à résoudre numériquement les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans les 2 dimensions de l'espace car on considère les composantes longitudinales et latérales des écoulements. Les vitesses d'écoulement sont alors moyennées sur la verticale. D'après G. Pasternack (comm. pers.), d'un point-de-vue purement hydraulique, les modèles 2D sont performants pour des pentes globales allant jusqu'à 3% car au-delà, la composante verticale de la vitesse devient trop importante pour être négligée.
La modélisation 2D s'appuie sur une topographie détaillée de la zone d'étude qui est combinée aux paramètres de frottement, aux conditions initiales et aux conditions aux limites pour un ou plusieurs débits donnés afin de simuler les écoulements sur une section de rivière.

En annexe 1 sont présentées les différentes étapes nécessaires à l'obtention d'une représentation hydraulique bidimensionnelle d'un cours d'eau. Selon le logiciel hydraulique 2D utilisé, toutes ou partie de ces étapes sont réalisées. En effet, il existe des logiciels de simulations hydrauliques qui peuvent être combinés à des logiciels de SIG (ArcGIS, autoCAD Map 3D, Surfer) pour permettre la définition du modèle numérique de terrain (MNT) ou pour l'exploitation des résultats. D'autres modèles nécessitent des apports plus complets fournis par des logiciels tels que SMS, Fudaa PrePro et Blue Kenue qui permettent de préparer, traiter, analyser et visualiser les données hydrauliques.

- SMS est une interface graphique, non Open Source (code source fermé), développée par Aquaveo qui permet aux modélisateurs de visualiser le projet, de modifier facilement les paramètres de simulation et de voir les solutions produites par le modèle. Il est dédié à différents systèmes de modélisations hydrauliques et côtières tels SRH-2D, HYDRO As 2D, RMA2 ou encore FESWMS.

- Fudaa PrePro est un logiciel, Open Source, développé par le CEREMA qui englobe toutes les tâches de prétraitement liées à la réalisation d'une étude hydraulique numérique. Il est dédié aux systèmes de modélisation des milieux aquatiques Fudaa Reflux (CEREMA), Rubar 20 (Irstea) et Telemac2D (EDF). Son objectif est de donner un cadre unificateur à des codes de calcul en les intégrant dans un environnement graphique et communicant. Pour exécuter Fudaa-Prepro, il faut disposer d'une machine virtuelle Java en version 6.0.22.

- Blue Kenue est un logiciel, non Open Source, développé par le Conseil National de Recherches Canada qui permet aux modélisateurs hydrauliques de préparer, analyser et visualiser leurs données. Il s'agit d'une interface graphique intégrant des bases de données environnementales et des données géo-référencées aux données de modèle

(entrées et sorties). Il est dédié aux systèmes de modélisation Telemac2D (EDF) et ADCIRC.

Les apports du 2D :

L'intérêt principal de l'utilisation du 2D dans les modèles d'habitat est qu'il permet de passer outre les limites du 1D énoncées précédemment. Les exemples comparatifs entre modèles 1D et 2D sont nombreux et permettent de mettre en avant les capacités du 2D, notamment pour la précision de la description de l'environnement hydraulique (Cook 2008; Gard 2009; Gezahegn 2008). Mais il sera expliqué par la suite que l'utilisation du 2D n'est pas toujours un atout, que cela dépend surtout du secteur modélisé.
Par contre, il est important de souligner l'intérêt du 2D pour décrire les paramètres d'habitat à une échelle plus proche des processus biologiques (Crowder and Diplas 2000; Ghanem *et al*. 1996; Parasiewicz and Dunbar 2001).

3) La modélisation tridimensionnelle

La modélisation tridimensionnelle consiste à résoudre les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans les 3 dimensions de l'espace car les composantes longitudinales, latérales et verticales des écoulements sont considérées. C'est une modélisation qui ne demande pas plus de temps que le 2D pour les campagnes de terrain et pour les étapes de calage et de validation des simulations. Elle peut aussi utiliser le même maillage que le 2D.

La modélisation hydraulique 3D a été utilisée pour des études d'évaluation de l'habitat (Shen and Diplas 2008) mais c'est un protocole encore peu répandu pour différentes raisons. Tout d'abord, en France, les modèles de préférences d'habitat sont souvent définis pour des vitesses moyennées sur la verticale, et il y a peu de gradient vertical de la température dans nos rivières (Capra *et al*. 2011). Mais des outils permettant le calcul de Volumes Pondérés Utiles (VPU), ou Weighted Usable Volume en anglais, sont en développement et permettent d'utiliser des modèles hydrauliques 3D pour des études d'évaluation de l'habitat (Mouton *et al*. 2007).
Ensuite, le 3D peut réduire les incertitudes dues aux vitesses moyennées sur la verticale mais son échelle de prédiction est plus fine que la taille des organismes (poissons) auxquels ces prédictions sont liées, donc cette modélisation n'apporte pas particulièrement plus d'informations qui soient pertinentes d'un point de vue de la biologie (Lane *et al*. 2006).

Dans certains cas spécifiques la modélisation 3D en lien avec les franchissements d'ouvrages (Goodwin *et al*. 2006) peut être préférable à une modélisation bi- ou unidimensionnelle. Il faut alors disposer de modèles biomécaniques simulant les comportements de nage des poissons.

Les différents procédés de modélisation hydraulique ont été présentés, reste à évaluer leurs intérêts dans la mise en œuvre de la méthodologie des micro-habitats.

IV La modélisation hydraulique numérique pour la méthode des micro-habitats

1) Un modèle hydraulique uni- ou bidimensionnel ?

A l'international, l'utilisation de modèles hydrauliques bidimensionnels dans la méthodologie des micro-habitats s'est démocratisée depuis une vingtaine d'années. Leur principal atout réside dans une meilleure définition de l'espace hydraulique, qui procure par la suite des cartographies de qualité de l'habitat plus détaillées. De plus, des études ont montré que la modélisation 2D serait plus appropriée que le 1D pour prédire l'hydraulique d'un cours d'eau à l'échelle spatiale nécessaire à la représentation des habitats physiques et du transport de sédiments (Ghanem *et al*. 1996; Jay Lacey and Millar 2004; Macwilliams *et al*. 2006). En Espagne par exemple, une utilisation d'un modèle 1,5D à la place d'un 2D pour une étude hydrobiologique doit être justifiée au commanditaire.
Mais il faut garder à l'esprit qu'un modèle 2D n'est plus précis qu'un 1D que si celui-ci est utilisé correctement. Pour cela il nécessite une topographie précise, un maillage approprié et un calage rigoureux. A défaut, les résultats de la simulation peuvent être très accrocheurs, avec de belles représentations des écoulements, mais loin d'exprimer la réalité.
A l'échelle française, les cas d'utilisation de la modélisation 2D appliqués aux études d'habitats sont encore rares. Une étude réalisée par l'Irstea de Lyon, où le modèle hydraulique Telemac2D a été utilisé, démontre l'intérêt du 2D pour évaluer le comportement des poissons dans un milieu complexe comme le Rhône (Capra *et al*. 2011). Le Pichon *et al*. (2006) présentent une nouvelle approche pour l'évaluation du choix de l'habitat en fonction des activités du poisson selon un protocole qui combine l'utilisation d'une modélisation hydraulique bidimensionnelle et d'un système SIG. Citons aussi l'utilisation couplée du modèle hydraulique Telemac2D avec le modèle biologique du barbeau dans un projet pour la restauration de la Loire au passage d'Orléans réalisé par des étudiants de l'ENSEEIHT à Toulouse[3].

L'effort consacré au levé topographique et aux mesures hydrauliques est très variable selon le choix de l'implémentation d'un modèle 1D ou 2D. La bathymétrie pour un modèle 2D doit être très dense pour permettre une bonne simulation des spécificités de l'écoulement. Elle est donc longue à collecter, d'où une tendance à préférer un modèle 1D sur de longs linéaires de cours d'eau.
Cependant, avec l'arrivée de nouveaux outils de mesure, plus performants (LIDAR, ADCP, sondeurs multifaisceaux, échosondeurs), les efforts nécessaires à la simulation bidimensionnelle continueront d'être considérablement réduits (Hardy and Addley 2003; Leclerc *et al*. 1995).
Pour des cours d'eau à morphologie plus complexe, générés par une topographie irrégulière, due entre autres à une forte proportion de roches émergées ou encore à la présence de

[3] *http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD1011/bei/beiere/groupe2/node/3*

nombreux embâcles, la modélisation bidimensionnelle peine à décrire correctement les écoulements (Shen and Diplas 2008). L'utilisation d'EVHA et de son modèle hydraulique 1,5D est alors recommandée dans ce cas particulier où la hauteur d'eau avoisine la rugosité. C'est en effet un modèle spécialement construit pour des cours d'eau en amont du réseau hydrographique appelés cours d'eau « à truites » qui sont peu larges (< 20 m), avec des pentes importantes (mais < 5%) et qui présentent de nombreux obstacles émergés.
Néanmoins, il faut souligner que les hypothèses de base des modèles numériques ne sont plus valides dans les cours d'eau où l'écoulement devient trop complexe (nombreux passages en torrentiels). L'approche statistique est alors particulièrement utile dans ces conditions (Girard *et al*. 2013).

En France, les utilisateurs de modèles d'habitat n'ont pas toujours les compétences nécessaires en topographie pour réaliser un protocole de mesures de terrain approprié. C'est une des raisons du succès du modèle statistique ESTIMHAB qui permet en effet de s'abstenir de levés topographiques au profit d'un protocole simplifié de mesures de hauteurs d'eau et de largeurs au miroir. L'inconvénient principal des modèles statistiques est dû aux paramètres hydrauliques (largeur et hauteur moyenne du tronçon) qui sont interpolés entre les débits de mesures à l'aide de lois "puissances", hypothèse discutable dans des situations comme les cours d'eau à morphologie fortement altérée, les rivières en tresses ou à méandres.

L'utilisation d'une modélisation bidimensionnelle nécessite un savoir-faire important en hydraulique afin d'exécuter correctement les étapes de la modélisation et obtenir des résultats représentatifs de la réalité. Actuellement, ces étapes ne peuvent se faire automatiquement. Aucune technique dite « de presse-bouton » ne semble exister afin d'alléger la charge de travail de l'utilisateur. Néanmoins, entre les mains d'un utilisateur aguerri, un modèle 2D peut fournir des résultats correctement calés et validés en des temps très courts. A dire de certains experts, 2 jours sont suffisants pour le calage d'un tronçon de 2 km. De plus, des travaux sont menés afin de simplifier les modèles 2D et ainsi alléger la masse de travail, sans pour autant augmenter fortement les incertitudes dues aux simplifications apportées (Leopardi *et al*. 2002).
Précisons aussi que les technologies évoluent rapidement. Le calage automatique pour les modèles 1D est déjà possible et des pistes sont en cours pour pouvoir faire de même avec la modélisation bidimensionnelle. La perspective dans un proche avenir d'une plus grande utilisation du 2D par les hydrobiologistes français semble réaliste.

En s'intéressant maintenant aux résultats apportés par les modélisations, Gard (2009); ou encore Jowett and Duncan (2012); Waddle *et al*. (1996), ont cherché à comparer les valeurs d'habitats obtenues à partir de modélisations hydrauliques uni- ou bidimensionnelles et sont arrivés aux mêmes conclusions. Dans l'ensemble les résultats obtenus pour les deux types de modèles sont comparables mais les modèles 2D simulent des situations d'écoulement bien plus complexes et fournissent des résultats globalement plus précis.
Certains comme Hauer *et al*. (2013b) font le choix de coupler les capacités d'un modèle 1D et d'un modèle 2D, afin d'évaluer l'impact des fortes variations de débits sur les habitats aquatiques.

2) Les modèles d'habitat numériques, un enjeu pour les régimes d'éclusées

Connaitre l'impact écologique des ouvrages de rétention sur les écosystèmes aquatiques est un sujet d'importance dans le domaine des sciences de l'eau. D'autant plus que les ouvrages de rétention, dont l'un des buts est de fournir de l'électricité, se sont très vite et très largement développés sur les cours d'eau français. Ce développement accéléré s'est accompagné d'un réel besoin de connaissances sur les impacts de ces ouvrages et de leur fonctionnement sur les communautés aquatiques.

Très tôt, avec le concept de débit réservé apparu pour la première fois dans la loi de 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique, les acteurs de l'eau ont commencé à s'intéresser au débit minimal nécessaire à l'aval direct de ces ouvrages pour permettre à la vie de prospérer. Mais le débit minimal n'est pas le seul paramètre quantitatif influençant les communautés aquatiques. Les fortes variations de débits sur de courtes périodes effectuées pour les besoins épisodiques en électricité peuvent aussi avoir de lourdes conséquences sur les organismes et il faut pourvoir évaluer ces impacts. Ces régimes de fonctionnement sont qualifiés « d'éclusées ». Dans la littérature, de nombreux cas attachés à l'étude de ces fonctionnements sont observés et les approches mises en place pour caractériser les écoulements varient.

Dans le cadre de leur étude, Courret et J.M. Lascaux (2009) montrent que le modèle EVHA n'est pas suffisant pour décrire l'impact des éclusées, car le calage du modèle hydraulique ne se fait que pour un seul débit. Les auteurs utilisent alors un modèle hydraulique 1D classique (HEC-RAS) plus adapté aux simulations sur l'ensemble de la gamme de turbinage et capable d'effectuer des simulations en régime transitoire. Hauer *et al*. (2013a) ont aussi fait le choix d'utiliser les performances du modèle HEC-RAS pour définir les impacts des éclusées sur la morphologie de 4 cours d'eau en Autriche. Vehanen *et al*. (2003) utilisent quant à eux un modèle hydraulique 2D pour évaluer l'utilisation de l'habitat par l'ombre commun (*Thymallus thymallus*) sur un cours d'eau d'éclusées au nord de la Finlande.

Dans sa thèse, E. Person (2013) travaille à partir du modèle hydraulique Hydro As-2D couplé au modèle d'habitat CASiMiR pour évaluer l'impact des régimes d'éclusées sur l'habitat des truites communes en Suisse.

Enfin, Capra *et al*. (2012) montrent l'intérêt de la modélisation bidimensionnelle pour comprendre le comportement des poissons en réponse aux éclusées du Haut Rhône.

Pour les acteurs de l'eau en France, la problématique des éclusées s'avère majeure avec le risque de non atteinte du bon état écologique au sens de la DCE pour nombres de cours d'eau. Cette préoccupation de pouvoir préserver la faune aquatique dans ces conditions s'avère largement partagée au plan international puisque près d'un quart des interventions au dernier congrès "Ecohydraulics" 2014 y étaient relatives. Pour répondre aux questions engendrées et selon l'avis d'experts réunis lors d'un workshop en Suisse en novembre 2014, il faut notamment progresser dans la connaissance du comportement nycthéméral des espèces à l'échelle de leurs habitats lors de fortes variations de débits. Lors des pics d'éclusées les poissons se situent sur les bords du cours d'eau et il leur faut pouvoir quitter ces zones de refuges hydrauliques lors de la décrue pour éviter le piégeage et l'échouage. Selon les

conclusions de ce workshop, pour transférer des modèles d'un site d'éclusée à l'autre, il faudra utiliser des simulations hydrauliques fines en 2D transitoire qui sont capables d'une meilleure représentation des variations sub-journalières des vitesses locales. Ces simulations devront ensuite être couplées à des modèles biologiques encore à définir, attendu que ceux disponibles pour l'heure sont *a priori* plutôt "calés" sur des comportements de jour et à l'étiage. Il faut donc développer en France la culture de tels outils tant pour la recherche que pour les chargés d'études.

3) Les modèles d'habitat numériques, un enjeu pour la restauration des cours d'eau

Depuis de nombreuses années les cours d'eau sont le siège d'une forte artificialisation, qui est due principalement au développement industriel, agricole, et à la croissance urbaine. Ces aménagements sur les abords et dans le lit des cours d'eau portent atteinte à la dynamique fluviale. Cette dynamique est la source de la grande diversité biologique qui se retrouve sur les linéaires des cours d'eau. Il est alors important de préserver ou restaurer leurs hydromorphologies diversifiées. C'est pourquoi la notion de restauration des cours d'eau a pris de l'importance ces dernières années. Les politiques de restauration visent à diminuer l'impact des aménagements en conciliant les besoins des milieux aquatiques et les besoins humains.

Des outils d'aide à la décision existent déjà pour les études de restauration. Ce sont des outils qui se focalisent sur la description de la morphologie des rivières (Carhyce). Mais les descriptions de type Carhyce ne permettent pas de comparer des scénarios de restauration ni d'évaluer en totalité les modifications hydrauliques apportées par des opérations de restauration. Ainsi, les modèles d'habitat pourraient apporter une information complémentaire pour ce type d'études. La restauration morphologique engendrant des changements spatialisés en deux dimensions, la modélisation numérique 2D semble un outil approprié pour comparer *a priori* divers scenarios de restauration physique.

4) Le modèle hydraulique à choisir dépend du contexte de l'étude

Les outils numériques qui permettent d'appliquer la méthode des micro-habitats sont nombreux et offrent différentes possibilités de couplage (Figure 3). Les plus populaires sont les modèles dits « complets/classiques » qui utilisent un modèle hydraulique 1,5D couplé à un modèle biologique pour fournir les valeurs d'habitat (PHABSIM [USA], RYHABSIM [Nouvelle-Zélande], EVHA [France]). Dans la gamme de ces mêmes modèles « complets » mais moins classiques, l'utilisation des simulations en deux dimensions avec le logiciel River2D [Canada] a fait son apparition. Il existe aussi des modèles d'habitats qui nécessitent de passer par un outil extérieur pour exécuter leurs simulations hydrauliques, c'est le cas du modèle CASiMiR [Allemagne]. Ensuite, vient une multitude d'outils hydrauliques (1D ou 2D), biologiques, graphiques, qui peuvent être combinés entre eux pour fournir les évaluations de préférences d'habitat du poisson.

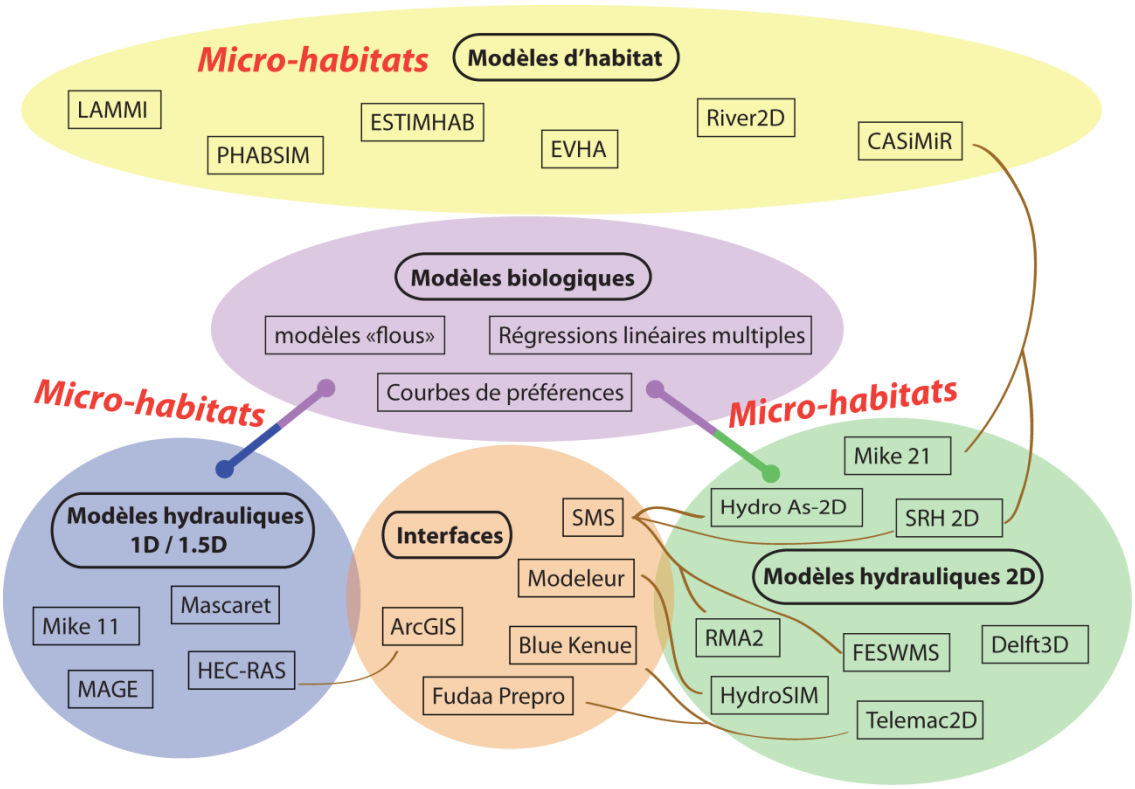


Figure 3 : Organigramme synthétique représentant la connectivité entre plusieurs outils qui permettent de faire du micro-habitat.

Grâce à cette multitude d'outils à disposition, la question n'est donc pas de savoir lequel des modèles 1D, 2D ou statistiques est le meilleur, mais, quel type de modélisation est le plus adapté aux conditions de l'étude à mener.
Le choix d'un modèle hydraulique dépend du type de cours d'eau et de l'étendue spatiale de la modélisation (Crowder and Diplas 2000), du temps et des financements accordés, des outils à disposition et du contexte écologique dans lequel s'inscrit le projet.
L'avenir du micro-habitat ne semble pas résider pas dans une unique méthodologie normalisée, mais plutôt dans une stratégie adaptée à la multitude d'outils à disposition.

V Les différents scénarios

En France, les modèles d'habitat à base statistique sont fréquemment utilisés mais les modèles à base numérique sont aujourd'hui dépassés et parfois mal adaptés aux différents besoins des utilisateurs. Par contre, les projets pour lesquels ces modèles nécessitent d'être utilisés requièrent des outils efficaces et modernes.
Il est important qu'un nouvel outil numérique adapté aux besoins et aux progrès techniques soit mis à disposition des usagers. Il existe différents scénarios envisageables pour améliorer la mise à disposition d'une large gamme de modèles d'habitat numériques et statistiques.

1) Scénario 1 : créer un nouveau modèle d'habitat de type « classique »

Le modèle d'habitat EVHA développé par l'Irstea pour répondre à des besoins français n'est plus mis à jour et offre peu de suivi et d'aide aux utilisateurs en cas de problèmes. C'est un modèle « vieillissant » qu'il faut remplacer.
L'intérêt majeur de repartir sur un modèle d'habitat « classique » est le confort que cela pourrait apporter aux utilisateurs. Les bureaux d'études étant habitués à une méthodologie, il serait pratique pour ces futurs utilisateurs de simplement repartir sur un modèle d'habitat, qui comprendrait un modèle hydraulique 1,5D capable d'un calage automatique et un modèle biologique décrit sous forme de préférences mono-variées.
Cependant, il parait peu réaliste de développer spécifiquement un modèle hydraulique car ces outils sont complexes et requièrent un suivi très important en termes de mises à jour et de réponses à la communauté des utilisateurs. Rappelons que les codes de calculs hydrauliques d'EVHA ont été dérivés à l'origine des codes 1D de TALWEG et FLUVIA mis au point par les hydrauliciens du Cemagref/Irstea (Baume and Poirson 1984).
De plus, à l'étranger les modèles se complexifient, se diversifient afin de répondre aux besoins de plus en plus transverses des utilisateurs (chroniques hydrologiques, qualité d'eau, végétation aquatique, transport sédimentaire,…). Il faut pouvoir apprendre de ces développements pour proposer une solution en France.

2) Scénario 2 : construire une interface, modulaire et évolutive

Comme nous l'avons vu précédemment, les outils qui permettent d'implémenter la méthode des micro-habitats sont nombreux et variés et le choix d'un protocole à suivre dépend du contexte de l'étude. Il serait idéal de construire un outil capable d'utiliser à convenance les résultats de différents modèles hydrauliques (statistiques et numériques 1,5D, 2D voire 3D) et de pouvoir les coupler à des modèles biologiques (Figure 4).

Cette démarche prendrait la forme d'une interface dont nous allons décrire brièvement les fonctions basiques :
- En entrée hydraulique l'interface devrait, pour un tronçon donné, transformer les différents types de données hydrauliques numériques (1,5D, 2D voire 3D) en un format unique à la norme HDF5, soit, un ensemble de polygones ayant des valeurs locales moyennes (H,V,S) correspondant à un état hydraulique (un instant t en régime transitoire ou un débit Q en régime permanent).
- En entrée biologique l'interface devrait proposer à l'utilisateur le choix de préférences espèces/guildes sous forme de courbes mono-variées dans un premier temps puis sous forme de modèles bi-variées (e.g. préférences pour des couples (H,V)).
- L'interface devrait aussi pouvoir gérer des entrées hydrologiques afin de simuler les écoulements dans le temps en fonction des chroniques de débit.
- Le noyau de l'interface aurait pour mission d'effectuer pour chaque espèce/guilde et chaque état hydraulique les calculs de SPU/VH dans chaque polygone.
- Les fichiers de résultats seraient en format ASCII et au choix, soit sous la forme de sorties SIG, soit dans un format couramment utilisé comme serafin (.slf) pour Telemac2D.

Les formats serafin sont compatibles avec le visualiseur Open Source ParaView, mais aussi avec le SIG gratuit QGIS.
Un interfaçage avec R permettrait aux utilisateurs (notamment académiques) de développer leurs propres procédures de couplage. D'autres scripts permettraient de résumer les résultats en rapports au format PDF comportant les statistiques et les graphiques résumant les calculs d'habitats. L'intérêt des scripts R est l'utilisation d'un langage répandu chez les chercheurs pour obtenir de l'interface les informations recherchées sans pour autant devoir se plonger dans le code source.
- La visualisation spatiale serait possible dans un Système d'Information Géographique classique via une sortie en format shapefile (.shp) qui est compatible avec la plupart des logiciels (ArcGIS, QGIS, MapInfo, GRASS,..) et dans le cas d'un format serafin dans le logiciel gratuit Blue Kenue par exemple ou la plateforme Salomé d'EDF. Cela éviterait ainsi de programmer des sorties graphiques dans l'interface car celles-ci sont souvent une grande source de problèmes de maintenance et de portabilité entre systèmes d'exploitations. Notons que dans le cas d'éclusées où les simulations varient dans le temps, le choix de fournir des fichiers de sortie en format serafin permet de visualiser le film des événements. Le format shapefile classique des SIG offrira aux utilisateurs familiers de ces outils toutes leurs possibilités de visualisations et d'analyses spatiales et statistiques.
- La description fine du substrat en termes de « composition » qui est une composante du modèle biologique n'est pas prise en compte par les hydrauliciens. Il faudrait donc a priori préconiser un protocole descriptif de terrain et une implémentation de cette couche spatiale d'information dans la démarche.

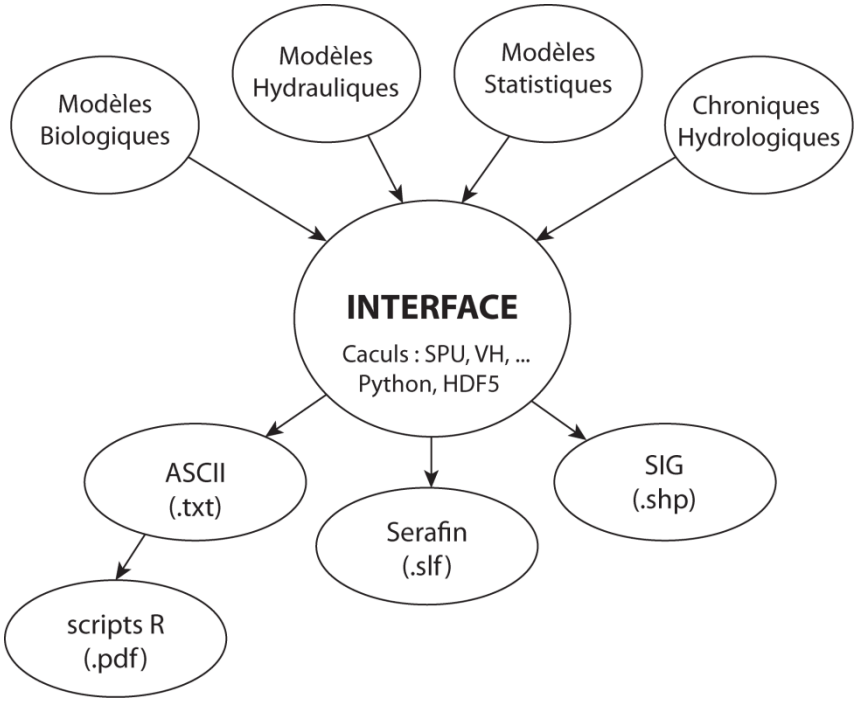


Figure 4 : Diagramme des entrées et sorties de l'interface

Le développement de l'interface se ferait en licence du type Open Source pour pouvoir bénéficier du concours de chacun. Le langage Python semblerait un choix judicieux pour sa

réalisation car lisible et clair et plus dans la culture Irstea qui aurait en charge une partie de la réalisation. Notons également que des librairies SIG et serafin existent déjà dans ce langage.

Le format de fichier ouvert NetCDF (Network Common Data Form) permet la création, l'accès et le partage de données scientifiques stockées sous la forme de tableaux. Ce format international est une norme utilisée en climatologie, en météorologie et en océanographie. Des bibliothèques logicielles permettent l'accès en lecture/écriture aux fichiers NetCDF dans tous les langages usuels. Il s'agit d'un format de données « auto-documenté ».
Nous ne connaissons pas de normes/formats de fichiers internationaux pour l'hydraulique qui pourraient servir de base à l'implémentation de modèles biologiques. Un tel format devrait gérer a minima les types de maillages les plus courants avec des informations (H,V,…) fournies aux nœuds ou dans la maille et une évolution temporelle de ces paramètres en cas d'éclusées par exemple.
En fait cette norme d'échange est une question clé, car si elle existe et qu'elle permet de rajouter des informations valeurs d'habitat par [espèces/guilde]x[Classes de tailles] alors le développement collaboratif s'en trouve facilité via la construction de briques/bibliothèques logicielles (modèles d'habitats, rapports automatiques de statistiques d'habitats, création de fichiers d'exports vers les SIG). Selon notre première analyse le format binaire « auto-documenté » HDF5 qui depuis 2008 est supporté par les bibliothèques NetCDF, serait un choix judicieux.

L'interface qui sera proposée ne devra pas être trop coûteuse en temps de développement par rapport à l'utilisation qui en sera faite par la suite. C'est pourquoi, dans un premier temps, seuls quelques logiciels de référence seront admis par l'interface:

- Pour la modélisation 2D : le modèle le plus utilisé en France Telemac2D (EDF) et le modèle Rubar (Irstea).
- Pour la modélisation 1D : Mage (Irstea), Mascaret (EDF) ou HEC-RAS (USA). Le choix du modèle 1D s'avère plus complexe puisqu'il faudra à l'instar d'EVHA transformer ses sorties hydrauliques en 1,5D, ce qui est déjà possible avec HEC-RAS. De plus, il faudra pouvoir implémenter l'équation de Limerinos à la place de celle de Manning seule, dans le cas d'une utilisation sur cours d'eau à forte rugosité.

Cependant, si la communauté d'utilisateurs de modèles d'habitat en France grandit, alors les attentes envers l'interface pourraient aussi évoluer. C'est pourquoi il faudrait que l'interface soit un outil à la fois convivial et évolutif, pour faciliter son utilisation et l'ajout de nouvelles fonctionnalités.

Chaque acteur/utilisateur serait sollicité pour contribuer à la démarche collective en renseignant ses propres données dans une base nationale accessible via internet, cette action pouvant être imposée par les commanditaires à leur prestataire de service. Cette base pourrait servir notamment à la construction d'équations de préférences pour ESTIMHAB.

L'interface pourrait faire l'objet d'un co-développement entre l'ONEMA, l'Irstea, EDF R&D, et avec d'autres acteurs tels que le CNRS et le CEREMA. Les universités seraient conviées

par la suite à participer. L'Onema continuera d'organiser les formations / guides dans le domaine.
Cette nouvelle interface pourrait s'appuyer sur des outils existant afin de faciliter et d'accélérer son développement.

Pour conclure sur cette partie, une interface permettrait d'offrir une grande liberté aux utilisateurs. Ils auraient le choix de l'utilisation et de l'interaction des modèles. Mais cette liberté peut aussi être un inconvénient du fait de la complexité des usages possibles.
Pour les études hydrobiologiques se posent aussi les problèmes :

- du contrôle qualité par les donneurs d'ordres nécessitant une double compétence hydraulique et hydrobiologique,
- des formations à cet outil qui seront a priori modulaires avec au minima de l'hydraulique et de la biologie, et
- du risque d'écarter certains bureaux d'études du marché actuel compte tenu des compétences attendues en hydraulique.

3) Outils existants sur lesquels s'appuyer

Chacun de ces scénarios peut néanmoins s'appuyer sur des outils existant qu'il serait intéressant de développer pour leur permettre d'avoir les fonctionnalités nécessaires énoncées précédemment.

Le monde de l'hydrobiologie regroupe peu d'acteurs en regard des questions urgentes qui sont posées pour la préservation des hydrosystèmes. La voie collaborative apparait donc la plus rationnelle dans une démarche d'amélioration des performances des modèles d'habitat. Dans cette optique, des réflexions internationales sont à l'œuvre afin de définir de nouveaux procédés permettant d'implémenter et de combiner des modèles physiques et biologiques.

SEFA

En restant dans la continuité du modèle d'habitat de type « classique » mais avec de nouvelles capacités citons la plateforme SEFA construite à partir de l'expertise de Bob Milhous (concepteur de PHABSIM), Ian Jowett (concepteur de RHYHABSIM) et Tom Payne (concepteur de RHABSIM). En effet, SEFA revient aux bases de la définition du protocole IFIM par son intégration multidisciplinaire qui permet de prendre en compte de nombreux paramètres dans la définition des préférences d'habitat comme par exemple, la température, l'oxygène dissout ou encore le transport sédimentaire. Ce modèle utilise une description unidimensionnelle des écoulements mais peut aussi intégrer des données bidimensionnelles ou empiriques provenant d'autres modèles hydrauliques une fois celles-ci mises au format adéquat (Payne and Jowett 2012).

Pour le second scénario qui est la création d'une interface, trois outils semblent avoir les bases nécessaires pour appliquer la méthode des micro-habitats.

Salomé

Salomé est une plateforme de conception assistée par ordinateur, Open Source, développée par EDF, le CEA et une vingtaine d'autres partenaires industriels. C'est un outil de simulation avancé qui permet d'accéder à des capacités de modélisation très fines, notamment en hydraulique. « Sa conception rend possible la représentation détaillée de l'ensemble des phénomènes physiques et de leurs interactions. Elle offre un environnement commun (maillage, visualisation, supervision des calculs) qui augmente considérablement la productivité des études»[4]. Elle met en œuvre un format de fichier MED très proche du HDF5 dont elle utilise la bibliothèque.

Comme nous l'avons vu précédemment nous souhaitons privilégier la culture hydraulique française pour le nouvel outil destiné à faire de l'habitat. La plateforme Salomé, qui contient déjà les technologies de Telemac et de Mascaret, serait une bonne base de travail. Une solution attractive serait de lui ajouter une extension capable de gérer les modèles biologiques dans le but de calculer les valeurs d'habitat.
Salomé a par ailleurs l'avantage d'avoir une grande communauté d'utilisateurs, en France et à l'étranger, une équipe de développeurs pour la tenir à jour et un service de support et d'assistance pour répondre aux différents problèmes rencontrés.

OpenMI

L'interface OpenMI a été créée au niveau Européen afin de faciliter l'utilisation combinée de plusieurs types de modèles découlant des sciences de l'eau (météorologie, hydrologie, hydraulique, voire habitat) afin de fournir une vision générale des procédés complexes qui interagissent dans le cycle de l'eau pour aider à la prise de décisions dans le contexte de la Directive Cadre sur l'Eau (Moore and Tindall 2005).
OpenMI est une interface Open Source qui a été spécialement construite pour accueillir de nouveaux logiciels de façon « simple ». Le modèle hydraulique 1D ISIS est le seul modèle français déjà optimisé pour être utilisés par cette interface. Il est nécessaire donc de créer les ponts nécessaires pour intégrer les logiciels tels que Telemac2D, Mascaret et Mage à l'interface. Selon Gregersen *et al*. (2007) cela ne devrait pas nécessiter plus de deux mois de travail par modèle.
OpenMI permet, grâce à une "norme", d'interfacer les calculs des logiciels entre eux pendant leur fonctionnement. Cette fonctionnalité est prisée par les hydrologues pour composer avec différents types d'écoulements. Elle n'apparait pas pour l'heure centrale à notre démarche ou la biologie intervient peu dans le calcul hydraulique, même si la végétation aquatique peut modifier les écoulements et influer sur le transport sédimentaire.

[4] *http://chercheurs.edf.com/logiciels/salome-41218.html*

La possibilité de connecter des modèles d'habitats à des modèles hydrauliques est un scénario envisagé par les créateurs de l'interface. Cependant, la question de sa faisabilité reste entière et requiert de se plonger dans les codes de programmation de l'interface.

Projet IRIC

L'International River Interface Cooperative (IRIC) est aussi une plateforme ouverte pour l'étude des cours d'eau. Elle semble être la plus internationale avec une forte participation des pays asiatiques. Notons qu'elle comporte déjà une modélisation biologique puisqu'elle intègre River2D. IRIC comporte une interface graphique, des outils de maillages, et plusieurs modèles hydrauliques notamment le 2D SToRM (U.S.G.S) et Delft3D (DELTARES). C'est une communauté active et en pleine expansion.

4) Préconisations

Résumons ici les préconisations qui se dégagent des chapitres précédents. La solution choisie devrait idéalement :

1) Apporter une offre variée de modélisations hydrauliques :
    - avec du 1,5D, si possible avec l'équation de Limerinos pour les rivières à forte rugosité ;
    - avec du 2D, si possible non stationnaire pour répondre au mieux aux problématiques des éclusées ou des scénarios de restauration morphologique ;
    - avec des approches statistiques avancées et largement utilisées en France ;
    - avec des possibilités de couplages (transport sédimentaire, chroniques hydrologiques, qualité de l'eau, …) ;
    - avec une entrée Telemac/Mascaret (EDF) qui apparait indispensable pour éviter de rompre avec la culture hydraulique Française.
2) Proposer pour le modèle biologique :
    - des courbes de préférences à minima, et a priori contrôlées par l'Irstea ;
    - la construction d'une bibliothèque de modèles d'habitat évolutive.
3) Fournir des fichiers de sorties :
    - au format ASCII pour les résultats hydrauliques et d'habitats ;
    - des scripts R s'implémentant à partir des sortie ASCII et produisant des rapports au format .pdf avec les statistiques et les graphiques associés ;
    - au format shape (.shp) pour les SIG ;
    - au format serafin (.slf) pour les simulations temporelles d'écoulements.
4) Avoir les caractéristiques informatiques suivantes :
    - le choix de l'Open Source gratuit parait nécessaire ; la responsabilité de l'utilisation des outils proposés restant de l'entière responsabilité des utilisateurs ;
    - le langage de programmation des modules à développer serait le python et R pour les scripts synthétisant les résultats biologiques ;

- la norme de fichiers manipulés par les modules à programmer serait l'HDF5.

5) Et le pilotage :
    - l'ONEMA pourrait être en charge de la formation à l'usage de l'interface. Le développement se ferait en partenariat entre l'ONEMA, l'Irstea, EDF R&D et d'autres acteurs tels que le CNRS, le CEREMA et les universités.
    - une base nationale des résultats des études serait accessible via internet. Cette action devant être imposée par les commanditaires à leur prestataire de service. Selon l'expérience passée, cette base parait nécessaire aux développements des futures recherches et des travaux de synthèses utiles au législateur etc. Selon nos échanges, EDF ne souhaite pas rendre public immédiatement les résultats des études. Leurs services auraient alors à contrôler le dépôt selon la norme de la base dans leurs propres serveurs sécurisés. La responsabilité et le contrôle des autres dépôts dans la base nationale restent à définir.

Scénarios	Outils existants	Avantages	Inconvénients	Nécessités
Créer un modèle d'habitat	**SEFA**	International logiciel d'écohydraulique Tout est intégré Expérience	Open Source Hors culture ingénierie française Langue	Ponts : entrées Telemac, R ?
Construire une interface	**Salomé**	culture hydraulique française Open source Tout est intégré HDF5 Programmeurs + communauté d'utilisateurs	Complexe Pas construit pour faire de l'habitat	1.5D Limérinos protocole parallèle pour le substrat modèles biologiques + calculs d'habitat entrées R
	OpenMI	Hydrologie Tout est intégré International Open source communauté d'utilisateurs	Complexe Hors culture ingénierie française Langue	1.5D Limérinos protocole parallèle pour le substrat modèles biologiques + calculs d'habitat
	IRIC project	International communauté d'utilisateurs	Hors culture ingénierie française Langue	1.5D Limérinos protocole parallèle pour le substrat

Figure 5 : Tableau synthétique des différents scénarios envisagés

VI Conclusion

La méthode des micro-habitats est largement utilisée à travers le monde pour l'évaluation de l'impact de la gestion physique des cours d'eau sur la qualité de l'habitat hydraulique des espèces. C'est un outil d'aide à la décision qui s'inscrit principalement dans le cadre de la définition de débits/régimes minimums nécessaires à l'aval des barrages, ou dans le cadre de la gestion quantitative des bassins. Ces dernières années, cet outil connait également une utilisation grandissante dans le cadre de restauration de cours d'eau ou pour l'évaluation des impacts des régimes d'éclusées.

Pour répondre aux différents besoins de modélisation d'habitat il est essentiel de disposer de deux types d'outils. Un modèle statistique de type ESTIMHAB capable d'apporter des résultats rapides, fiables et peu coûteux en temps, mais aussi un modèle numérique plus complet permettant de faire des analyses plus poussées.

Un modèle d'habitat numérique est composé d'un modèle hydraulique qui permet la description physique du cours d'eau et d'un modèle biologique qui permet de quantifier les préférences d'habitat des espèces/stades selon les principales variables physiques (H,V,S). La partie modélisation hydraulique représente la plus grosse part du temps ingénieur de ce type de développement. Différents modèles hydrauliques peuvent être utilisés pour implémenter la méthode des micro-habitats. La modélisation bidimensionnelle s'avère être l'outil le plus adéquat notamment dans pour la définition des régimes d'éclusées et la restauration morphologique. La modélisation unidimensionnelle reste toutefois incontournable dans le cas de cours d'eau ou les rugosités avoisinent les hauteurs d'eau.

Le modèle numérique d'habitat unidimensionnel EVHA, qui est le plus utilisé en France, apparait limité dans son utilisation et n'est plus maintenu informatiquement. Un nouvel outil est donc nécessaire.
Pour cela, différents scénarios ont été envisagés : le développement d'un nouveau modèle d'habitat numérique ou la construction d'une interface, modulaire et évolutive. Mais, que le choix se porte sur l'un ou l'autre de ces scénarios, il semble judicieux de s'appuyer sur des outils existants tels que le modèle d'habitat numérique SEFA ou bien l'une des trois plateformes : Salomé, OpenMI ou IRIC Project.

A la suite de la réunion qui s'est tenue à l'Irstea de Lyon en décembre 2014 entre les différents partenaires de cette action (Irstea, ONEMA, EDF et Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie) le choix du meilleur scénario s'est orienté vers le développement d'une interface au sein de la plateforme Salomé. En effet ce scénario semble le plus adapté pour bénéficier de la culture d'ingénierie hydraulique française, des possibilités de développements informatiques et hydrauliques d'EDF R&D, et pour fournir un outil collaboratif et évolutif aux utilisateurs. Il a alors été décidé que le programme d'action pour l'année 2015, consistera à proposer un cahier des charges de la future extension de Salomé dont la construction pourrait débuter en 2016.

Liens Internet

ADCIRC http://adcirc.org/
Blue Kenue http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/blue_kenue_index.html
CASiMiR http://www.casimir-software.de/ENG/aufbau_eng.html
Delft3D http://oss.deltares.nl/web/delft3d/home
ESTHIMAB http://www.irstea.fr/estimhab
EVHA http://www.irstea.fr/evha
Fudaa PrePro http://prepro.fudaa.fr/index.fr.php
FSTRESS http://www.irstea.fr/logiciel-stathab-fstress
HEC-RAS http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/
IRIC Project http://i-ric.org/en/introduction
LAMMI http://chercheurs.edf.com/logiciels/lammi-84735.html
OpenMI http://www.openmi.org/
SALOME http://www.salome-platform.org
SEFA http://sefa.co.nz/
SMS http://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction
STATHAB http://www.irstea.fr/stathab
TELEMAC / MASCARET http://www.opentelemac.org

Références

Ahmadi-Nedushan, B., A. St-Hilaire, M. Bérubé, É. Robichaud, N. Thiémonge & B. Bobée, 2006. A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment. River Research and Applications 22(5):503-523.

Baume, J.-P. & M. Poirson, 1984. Modélisation numérique d'un écoulement permanent dans un réseau hydraulique maillé à surface libre, en régime fluvial. La houille blanche(1-2):95-100.

Boavida, I., V. Dias, M. T. Ferreira & J. M. Santos, 2014. Univariate functions versus fuzzy logic: Implications for fish habitat modeling. Ecological Engineering 71:533-538.

Boavida, I., J. M. Santos, M. T. Ferreira & A. Pinheiro, 2013. Fish Habitat-Response to Hydropeaking. In Proceedings of the 35th IAHR World Congress (Vol. 8, p. e13).

Bovee, K. D., 1982. A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, Washington, D.C., 248.

Bovee, K. D., 1996. Perspectives on two-dimensional river habitat models: the PHABSIM experience, Part B. In: Leclerc, A., Capra, H., Valentin, S., Boudreault, A., Côté, Y. (Eds.), Ecohydraulics 2000. Proceedings of 2nd Symposium on Habitat Hydraulics, B. Quebec, Canada, June 1996. INRS-Eau.

Brown, R. A. & G. B. Pasternack, 2009. Comparison of methods for analysing salmon habitat rehabilitation designs for regulated rivers. River Research and Applications 25(6):745-772.

Capra, H., E. Mcneil, M.-C. Bouillon, H. Pella & C. Alfaro, 2011. Intérêt d'un modèle hydrodynamique en deux dimensions pour interpréter le comportement des poissons dans les grands cours d'eau. La Houille Blanche(6):28-33.

Capra, H., M. Ovidio, H. Pella, J. Bergé & E. Mcneil, Fish responses to artificial flow and water temperature variability in a large river (Rhône, France). In: Proceedings of the 9th International Conference on Ecohydraulics, 2012.

Cook, A. C., 2008. Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping. Purdue University.

Crowder, D. W. & P. Diplas, 2000. Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance. Journal of Hydrology 230(3–4):172-191 doi:**http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00177-3**.

Dørge, J. & J. Windolf, 2003. Implementation of the water framework directive–can we use models as a tool in integrated river basin management? International Journal of River Basin Management 1(2):165-171.

Filipe, A., I. Cowx & M. Collares-Pereira, 2002. Spatial modelling of freshwater fish in semi-arid river systems: a tool for conservation. River Research and Applications 18(2):123-136.

Gard, M., 2009. Comparison of spawning habitat predictions of PHABSIM and River2D models. International Journal of River Basin Management 7(1):55-71 doi:10.1080/15715124.2009.9635370.

Gezahegn, H., 2008. Comparison of 2D Hydrodynamic models in River Reaches of Ecological Importance: Hydro_AS-2D and SRH-W. Auslandsorientierter Studiengang Wasserwirtschaft.

Ghanem, A., P. Steffler, F. Hicks & C. Katopodis, 1996. TWO-DIMENSIONAL HYDRAULIC SIMULATION OF PHYSICAL HABITAT CONDITIONS IN FLOWING STREAMS. Regulated Rivers: Research & Management 12(2-3):185-200 doi:10.1002/(SICI)1099-1646(199603)12:2/3<185::AID-RRR389>3.0.CO;2-4.

Girard, V., D. Monti, P. Valade, N. Lamouroux, J. P. Mallet & H. Grondin, 2013. Hydraulic preferences of shrimps and fishes in tropical insular rivers. River Research and Applications.

Goodwin, R. A., J. M. Nestler, J. J. Anderson, L. J. Weber & D. P. Loucks, 2006. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian–Lagrangian–agent method (ELAM). Ecological Modelling 192(1):197-223.

Gregersen, J., P. Gijsbers & S. Westen, 2007. OpenMI: Open modelling interface. Journal of Hydroinformatics 9(3):175-191.

Hardy, T. B. & R. C. Addley, 2003. Instream Flow Assessment Modelling: Combining Physical and Behavioural-Based Approaches. Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques 28(2):273-282 doi:10.4296/cwrj2802273.

Hauer, C., B. Schober & H. Habersack, 2013a. Impact analysis of river morphology and roughness variability on hydropeaking based on numerical modelling. Hydrological Processes 27(15):2209-2224 doi:10.1002/hyp.9519.

Hauer, C., G. Unfer, H. Holzmann, S. Schmutz & H. Habersack, 2013b. The impact of discharge change on physical instream habitats and its response to river morphology. Climatic Change 116(3-4):827-850 doi:10.1007/s10584-012-0507-4.

Jay Lacey, R. W. & R. G. Millar, 2004. REACH SCALE HYDRAULIC ASSESSMENT OF INSTREAM SALMONID HABITAT RESTORATION1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 40(6):1631-1644 doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb01611.x.

Jowett, I. G. & M. J. Duncan, 2012. Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river. Ecological Engineering 48(0):92-100 doi:**http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.036**.

Lacey, R. & R. G. Millar, 2004. REACH SCALE HYDRAULIC ASSESSMENT OF INSTREAM SALMONID HABITAT RESTORATION1. Wiley Online Library.

Lamouroux, N. , B. Augeard, P. Baran, H. Capra, Y. Le Coarer, V. Girard, V. Gouraud, L. Navarro, O. Prost, P. Sagnes, E. Sauquet, L. Tissot. Débits écologiques : la place des modèles d'habitat dans une démarche intégrée, in prep.

Lamouroux, N., S. Mérigoux, H. Capra, S. Dolédec, I. Jowett & B. Statzner, 2010. The generality of abundance-environment relationships in microhabitats: A comment on Lancaster and Downes (2009). River research and applications 26(7):915-920.

Lamouroux, N., J. M. Olivier, H. Persat, M. Pouilly, Y. Souchon & B. Statzner, 1999. Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics. Freshwater Biology 42(2):275-299.

Lancaster, J. & B. J. Downes, 2010. Linking the hydraulic world of individual organisms to ecological processes: putting ecology into ecohydraulics. River Research and Applications 26(4):385-403.

Lane, S., D. Mould, P. Carbonneau, R. Hardy & N. Bergeron, 2006. Fuzzy modelling of habitat suitability using 2D and 3D hydrodynamic models: biological challenges.

Le Pichon, C., G. Gorges, P. Boët, J. Baudry, F. Goreaud & T. Faure, 2006. A spatially explicit resource-based approach for managing stream fishes in riverscapes. Environmental Management 37(3):322-335.

Leclerc, M., A. Boudreault, T. A. Bechara & G. Corfa, 1995. Two-dimensional hydrodynamic modeling: a neglected tool in the instream flow incremental methodology. Transactions of the American Fisheries Society 124(5):645-662.

Leopardi, A., E. Oliveri & M. Greco, 2002. Two-dimensional modeling of floods to map risk-prone areas. Journal of water resources planning and management 128(3):168-178.

Macwilliams, M. L., J. M. Wheaton, G. B. Pasternack, R. L. Street & P. K. Kitanidis, 2006. Flow convergence routing hypothesis for pool-riffle maintenance in alluvial rivers. Water Resources Research 42(10):W10427 doi:10.1029/2005WR004391.

Maddock, I., A. Harby, P. Kemp & P. J. Wood, 2013. Ecohydraulics: an integrated approach. John Wiley & Sons.

Mathur, D., W. H. Bason, E. J. Purdy Jr & C. A. Silver, 1985. A critique of the in stream flow incremental methodology. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences 42(4):825-831.

Moore, R. V. & C. I. Tindall, 2005. An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI). Environmental Science & Policy 8(3):279-286 doi:**http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2005.03.009**.

Mouton, A., H. Meixner, P. L. M. Goethals, N. De Pauw & H. Mader, 2007. Concept and application of the usable volume for modelling the physical habitat of riverine organisms. River Research and Applications 23(5):545-558 doi:10.1002/rra.998.

Muñoz-Mas, R., F. Martínez-Capel, V. Garófano-Gómez & A. Mouton, 2014. Application of Probabilistic Neural Networks to microhabitat suitability modelling for adult brown trout (< i> Salmo trutta</i> L.) in Iberian rivers. Environmental Modelling & Software 59:30-43.

Parasiewicz, P. & M. Dunbar, 2001. Physical habitat modelling for fish-a developing approach. Archiv für Hydrobiologie Supplementband Large rivers 12(2-4):239-268.

Pasternack, G. B., C. L. Wang & J. E. Merz, 2004. Application of a 2D hydrodynamic model to design of reach-scale spawning gravel replenishment on the Mokelumne River, California. River Research and Applications 20(2):205-225 doi:10.1002/rra.748.

Payne, T. R. & I. G. Jowett, SEFA-Computer software system for environmental flow analysis based on the instream flow incremental methodology. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2012), 2012.

Person, E., 2013. Impact of Hydropeaking on Fish and their Habitat. EPFL-LCH.

Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegaard, B. D. Richter, R. E. Sparks & J. C. Stromberg, 1997. The natural flow regime. BioScience:769-784.

Poff, N. L., B. D. Richter, A. H. Arthington, S. E. Bunn, R. J. Naiman, E. Kendy, M. Acreman, C. Apse, B. P. Bledsoe & M. C. Freeman, 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. Freshwater Biology 55(1):147-170.

Rathburn, S. & E. Wohl, 2003. Predicting fine sediment dynamics along a pool-riffle mountain channel. Geomorphology 55(1):111-124.

Ricciardi, A. & J. B. Rasmussen, 1999. Extinction rates of North American freshwater fauna. Conservation Biology 13(5):1220-1222.

Shen, Y. & P. Diplas, 2008. Application of two- and three-dimensional computational fluid dynamics models to complex ecological stream flows. Journal of Hydrology 348(1–2):195-214 doi:**http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.060**.

Tharme, R. E., 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):397-441 doi:10.1002/rra.736.

Vadas Jr, R. L. & D. J. Orth, 2001. Formulation of habitat suitability models for stream fish guilds: do the standard methods work? Transactions of the American Fisheries Society 130(2):217-235.

Vehanen, T., A. Huusko, T. Yrjänä, M. Lahti & A. Mäki-Petäys, 2003. Habitat preference by grayling (Thymallus thymallus) in an artificially modified, hydropeaking riverbed: a contribution to understand the effectiveness of habitat enhancement measures. Journal of Applied Ichthyology 19(1):15-20 doi:10.1046/j.1439-0426.2003.00354.x.

Waddle, T., P. Steffler, A. Ghanem, C. Katopodis & A. Locke, Comparison of one and two-dimensional hydrodynamic models for a small habitat stream. In: Ecohydraulics 2000: Proceedings of the 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics, 1996.

Annexes

I) Fonctionnement de la modélisation bidimensionnelle

Ici, nous allons nous atteler à fournir une description plus technique du procédé de modélisation bidimensionnelle pour comprendre la complexité de ce type de modélisation.

Un modèle 2D permet de résoudre numériquement les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement selon la composante longitudinale et transversale de l'écoulement. Donc deux hypothèses principales sont faites :

- La répartition des vitesses sur la verticale est uniforme,
- La distribution des pressions sur la verticale est hydrostatique.

Les modèles 2D demandent tous le même type de données en entrée :

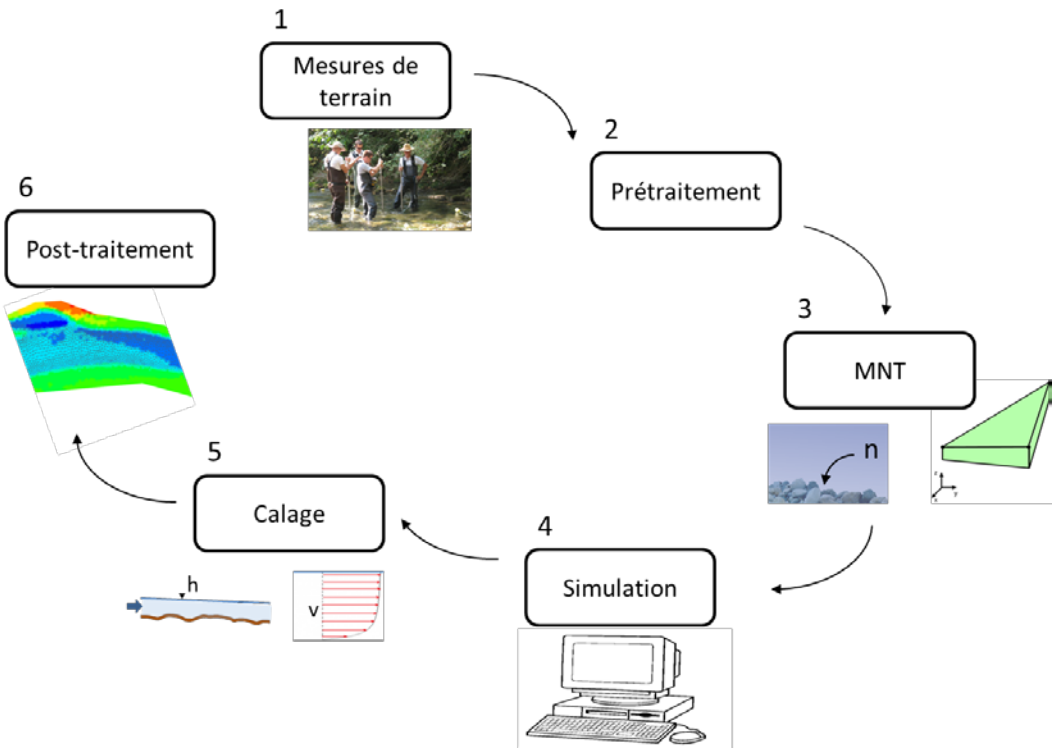
- la topographie du lit du cours d'eau,
- la description des frottements par la distribution de la rugosité (e.g. Manning), et la description des turbulences par le terme de viscosité turbulente (E),
- les conditions aux limites,
- les conditions initiales.

Les modèles 2D sont basés sur un large éventail de schémas numériques, d'où une grande variété de logiciels en circulation. Ces modèles varient selon :

- le système de coordonnées (cartésien ou curviligne)
- la forme des équations de mécanique des fluides qu'ils résolvent
- la méthode de résolution numérique (différences finies, éléments finis, volumes finis)
- la capacité à gérer les écoulements fluviaux et/ou torrentiels
- la capacité à être en régime permanent et/ou transitoire
- la robustesse de l'algorithme couvrant/découvrant
- la ou les méthodes utilisées pour gérer la fermeture des turbulences
- les différences dans les comportements secondaires et les ajouts (transférer les résultats pour du transport de sédiment, bonne interface graphique,…).

Chaque méthode de résolution des équations de Barré de Saint-Venant a ses avantages. Les différences finies sont plus simples à résoudre mais plus lourdes en termes de calculs car effectuées sur les nœuds du maillage. Les éléments et les volumes finis sont plus efficaces dans leurs calculs mais plus compliqués à résoudre.
Les volumes finis offrent une meilleure stabilité et un meilleur rendement alors que les éléments finis offrent une plus grande flexibilité géométrique. La méthode des volumes finis est fortement recommandée pour le calcul de discontinuités telles que les ressauts ou les changements soudains sur une section en travers.

Pour obtenir la simulation des écoulements d'un cours d'eau à partir d'un modèle hydraulique bidimensionnelle il faut passer par 6 étapes résumées ci-après.



1) Mesures terrain : C'est la partie en amont de la modélisation pendant laquelle on récupère les différentes données qui serviront à faire tourner le modèle hydraulique. Pour cela il faut les levés de la bathymétrie et de la topographie (GPS différentiel et tachéomètre, sondeurs mono- ou multifaisceaux, LIDAR,...) ainsi que les mesures hydrauliques (H,V) (courantomètres, ADCP, échosondeurs, …) pour deux débits au minimum. Il faut aussi définir les coefficients de frottement et leurs répartitions sur la zone d'étude.
Obtenir une bonne représentation topographique du lit d'un cours d'eau est une étape importante car elle définira la qualité de la simulation. C'est souvent une étape longue qui requière de la précision.

2) Prétraitement des données topographiques et hydrauliques : C'est la phase de préparation des données où il faut pouvoir repérer les erreurs et les données manquantes. A l'issue de cette étape il peut être décidé de retourner faire des campagnes de mesures pour parfaire la gamme de données.

3) Modèle Numérique de Terrain (MNT): Le modèle numérique de terrain est une représentation de la topographie de la zone étudiée sous une forme adaptée à son utilisation par le modèle hydraulique. Il s'effectue en plusieurs étapes que sont la construction du maillage, l'assemblage topographique et la définition des frottements (n) et des turbulences (E).

4) Simulation : On définit les conditions aux limites (débit en section d'entrée et hauteur d'eau en section de sortie), les conditions initiales (elles caractérisent l'état hydraulique du modèle au début de la simulation) et on lance la simulation pour obtenir une convergence des calculs.

5) Calage : Aucun modèle n’est capable de prédire exactement la réalité, il existe toujours des différences entre le mesuré et le simulé. Le but du calage est de minimiser ces écarts.
Le calage des données simulées est une étape importante dans un procédé de modélisation. Il permet de mettre en accord le simulé avec le mesuré en faisant varier les paramètres de rugosité et de viscosité.
On cherche à caler les hauteurs d’eau et les champs de vitesses pour différents débits mesurés. On peut aussi vérifier la conservation des débits et s’attarder sur les phénomènes particuliers d’écoulements comme les recirculations à l’arrière des roches. Cependant, il arrive très souvent que le calage d’un modèle ne se fasse qu’en fonction de la surface libre pour économiser du temps.
Une fois le modèle calibré, il faut le valider. Pour cela, il suffit de simuler les écoulements à au moins deux débits différents et vérifier si les hauteurs d’eau et les champs de vitesses obtenues sont similaires aux mesures effectuées à ces mêmes débits dans la réalité. Si ce n’est pas le cas, il faut reprendre la phase de calage.

6) Post-traitement : C’est la dernière phase du processus de modélisation pendant laquelle les écoulements simulés sont visualisés et les résultats exportés en vue d’une exploitation.

II) Tableau des différents modèles hydrauliques

Logiciels	Gestionnaires	Gratuit/Payant	Format en sortie	Open source	Langage	Système d'exploitation	Installation	régime	
								permanent	transitoire
Delft3D	Deltares systems	Payant	ASCII, SIG, binaire	oui	Fortran	Windows, Linux	Compilateur	X	X
FESWMS-2DH	Federal Highway Administration (développeur : Dr Froelich)	Gratuit	SMS		Fortran 77			X	X
HEC-RAS	US Army Corps of Engineers	Gratuit		non		Windows, Linux	Excécutable	X	X
Hydro As 2D	Ingenieurburo NUJIC (développeur : Dr Marinko)	Payant (7875 euros)	SMS					X	X
HydroSIM	INRS-ETE (développeurs : Dr Leclerc, Dr Secretan, Dr Heniche)	Gratuit	ASCII		Fortran	Windows 98		X	X
Mascaret	LNHE chez EDF	Gratuit		oui	Fortran 90	Windows, Linux	Excécutable	X	X
Mike 11	DHI	Payant	ASCII	non		Windows		X	X
Mike 21	DHI	Payant		non		Windows		X	X
River2D	Université d'Alberta	Gratuit	ASCII (.csv)	non				X	X
RMA2	Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (développeur : King I.P.)	Payant	SMS					X	X
SRH-2D	the United States Bureau of Reclamation (développeur : Yong Lai)	Gratuit	SMS, TECPLOT et GENERIC	oui				X	X
Telemac2D	LNHE chez EDF	Gratuit		oui	Python, Perl	Windows, Linux	Compilateur	X	X
OpenMI	OpenMI association	Gratuit		oui		Windows, Linux, Mac			
Salomé	LNHE chez EDF	Gratuit		oui	C++, Python	Windows, Linux	Compilateur		
SEFA	I. Jowett, T. Payne, R. Milhous	Payant		non		Windows	Excécutable		

Logiciels	Gestionnaires	maillage (densité)		maillage (type)		maillage		résolution numérique / discrétisation			transport sédimentaire	qualité de l'eau
		flexible	régulier	triangle	quadrangle	structuré	déstructuré	différences finies	éléments finis	volumes finis		
Delft3D	Deltares systems	X		X	X	X		X			X	X
FESWMS-2DH	Federal Highway Administration (développeur : Dr Froelich)			X	X				X		X	
HEC-RAS	US Army Corps of Engineers											
Hydro As 2D	Ingenieurburo NUJIC (développeur : Dr Marinko)			X	X		X			X	X	X
HydroSIM	INRS-ETE (développeurs : Dr Leclerc, Dr Secretan, Dr Heniche)	X							X			
Mascaret	LNHE chez EDF											
Mike 11	DHI										X	X
Mike 21	DHI	X	X		X		X	X			X	X
River2D	Université d'Alberta	X		X		X			X			
RMA2	Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (développeur : King I.P.)			X	X				X			
SRH-2D	the United States Bureau of Reclamation (développeur : Yong Lai)	X		X	X	X	X			X	X	
Telemac2D	LNHE chez EDF	X		X			X		X			
OpenMI	OpenMI association											
Salomé	LNHE chez EDF											
SEFA	I. Jowett, T. Payne, R. Milhous											

Légende information inconnue

III) Liste des bureaux d'études interrogés

Bureaux d'études en hydrobiologie	coordonnées	Utilisateurs
AQUABIO	ZA du Grand Bois Est - Route de Créon - 33750 Saint-Germain-du-Puch	X
AQUASCOP	Technopole d´Angers, 1 avenue du Bois l´Abbé, 49070 Beaucouze	X
ARALEP	Campus Lyontech la Doua - Bât CEI 1, 66 Bld Niels Bohr - CS 52132 - 69603 Villeurbanne	X
ASCONIT	Parc Scientifique Tony Garnier, 6-8 espace Henry Vallée, 69366 Lyon Cedex 07	X
ASPECT Service Environnement	1 Route de Chailly, 57365 Ennery	
BECQ EAU	12 Avenue Des Genevriers, 74200 Thonon Les Bains	
Caricaie (groupe BIEF)	5 impasse des Vergers, 57580 Lemud	
CINCLE environnement	83 rue du Foirail, 63800 Cournon d'Auvergne	X
CLIMAX	7 rue des Rochelles, 68290 Bourbach Le Haut	
DREAL Franche-Comté	17 Rue Alain Savary, 25000 Besançon	
DUBOST Environnement	15, rue au Bois, 57000 Metz	
Eccel Environnement	8 av Lavaur, 31590 Verfeil	X
ECODEVE	Les Roches, 71190 Saint Nizier sur Arroux	
ECOGEA	10 avenue de Toulouse, 31860 Pins-Justaret	X
ECOLOR	7 Place Albert Schweitzer, 57930 Fenetrange	
ECOSCOP	9, rue des Fabriques, 68470 Fellering	
Eurofins Expertises Environnementales	Rue Lucien Cuenot - Site Saint Jacques II, 54521 Maxeville	
Fédérations De Pêche de la Saône-&-Loire	123 rue de Barbentane, BP 99 SENNECE, 71004 Mâcon cedex	
Fish-Pass	3 Rue des Grands Champs, 35890 Laillé	X
Géo-Hyd (groupe ANTEA)	Parc technologique du Clos du Moulin, 101 rue Jacques Charles, 45160 Olivet	X
GREBE	23, rue Saint Michel, 69007 Lyon	X
Hydrosphère	2 Avenue de la Mare, 95310 Saint-Ouen-l'Aumône	X
Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse	Allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse	X
IRAP	BP 413, 74013 Annecy cedex	X
Iris consultants	40, passage Messidor, 07160 Mariac	